

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

Красилов Максим Николаевич

Взаимосвязи прочностных и акустических свойств осадочных горных пород при различных схемах и режимах циклических механических нагружений

Специальность 25.00.20

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Москва – 2020

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Повторяющиеся или циклические нагрузки 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 аппаратного 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 циклических и импульсных повторяющихся нагружений 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований прочностных и акустических свойств горных пород при циклических механических нагружениях, сформулированы цель и задачи исследования.

Горные породы вокруг выработок находятся под воздействием не только статических, но также и циклических нагрузок, среди которых изменения давления в подземных хранилищах при закачке и отборе углеводородов, других газов и жидкостей; воздействия на пласты–коллекторы при добыче тяжелой и сверхтяжелой нефти; повышенная природная и техногенная сейсмичность горных массивов; взрывы при открытых и подземных горных работах; движение крупногабаритного транспорта, вибрации от вентиляторов проветривания и др.

Следует отметить недостаточный объем исследований влияния циклических механических нагрузок на прочность горных пород. Среди отечественных ученых следует упомянуть работы Миндели Э.О. и Мохначева М.П. За рубежом работы по исследованию горных пород при циклических нагружениях вели Cerfontaine B., Collin F., Roberts L.A., Jinyang Fan, Min Zhang, Chongfeng Chen, Momeni A., Jamali S. и др. Совместные исследования акустической эмиссии (АЭ) и механических свойств горных пород при повторных или циклических нагружениях проводили Лавров А.В., Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.Л., Третьякова К.В., Бельтюков Н.Л. и др. При циклических нагружениях связи прочности горных пород со скоростями распространения упругих волн исследовали Rao M.V.M.S. и Ramana Y.V., Lockner D., Chow T.M., Meglis I.L., Young R.P., а Куткин Я.О. исследовал связь прочности с акустической добротностью. Необходимость дальнейшего исследования влияния циклических нагружений на прочность широкого класса горных пород во взаимосвязи с их акустическими свойствами при различных видах испытаний обуславливают актуальность выбранной темы диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрены аппаратное и методическое обеспечение исследований.

В испытательном комплексе, на котором были получены результаты, изложенные в диссертации, были использованы две установки для нагружений образцов. Для медленных нагружений с временем цикла от 10 до 60 секунд был использован универсальный автоматизированный испытательный комплекс АСИС производства компании ООО «НПП «Геотек», г. Пенза. Динамические нагружения образцов при силовых воздействиях длительностью от единиц до нескольких десятков миллисекунд производились на разработанной при участии автора установке с разрезным стержнем Гопкинсона. Измерения скоростей продольных и поперечных упругих волн между сериями усталостных циклических нагружений производились с помощью установки «Ультразвук» (ООО «ЭкогеосПром», г. Тверь, Россия). Акустическая добротность Q образца измерялась резонансным методом на установке, разработанной с участием автора. Во время серий усталостных нагружений производилась регистрация АЭ в полосе частот от 20 до 200 кГц с помощью системы QM-Vox (ООО «R-Technology», Moscow, Russia) в связке с прибором АФ-15.

Третья глава посвящена исследованиям закономерностей изменения прочностных и акустических свойств пород сложной текстуры доломит–гипс при циклических изгибных нагружениях.

Автором показано, что природные или техногенные сейсмические события с энергией $1,0 \cdot 10^7$ Дж могут вызвать в кровле подземных выработок циклические напряжения с амплитудой более 0,3 МПа. Это может привести к снижению прочностных свойств пород, для оценки которых были проведены эксперименты на образцах размером $40 \times 40 \times 200$ мм пород Новомосковского месторождения Тульской площади при циклическом изгибе по трехточечной схеме. Всего испытано 12 образцов. Пять были испытаны для определения первоначального предела прочности при растяжении по испытаниям на изгиб. На четырех образцах отрабатывалась методика испытаний. Основные результаты были получены на трех образцах G2-04, G2-18 и G2-05. Образцы имели сложную двухкомпонентную текстуру и включали участки с пятнистым гипсом и доломитом. Перед испытанием, а также между сериями нагружений (по

100 циклов каждая) измерялись скорости продольных C_p и поперечных C_{s1} и C_{s2} упругих волн, а также акустическая добротность Q образцов. На рисунке 1а приведены результаты испытаний образца G2-5 при максимальной нагрузке в цикле 2,4 кН в серии, предшествующей разрушению. Стадия нагружения состояла из 100 циклов нагрузки-разгрузки. На графиках показана зависимость активности АЭ $\dot{N}_\Sigma$, максимальное значение которой составляло 103 имп./с, а затем уменьшалось с каждым циклом до 1–2 имп./с. На рисунке 1б представлены показания тензорезистора, наклеенного снизу в центральной части образца, верх графика соответствует растяжению, а его низ – сжатие тензорезистора. На рисунке 2 показаны деформации тензорезистора в серии, в которой произошло разрушение на шестом цикле нагружения.

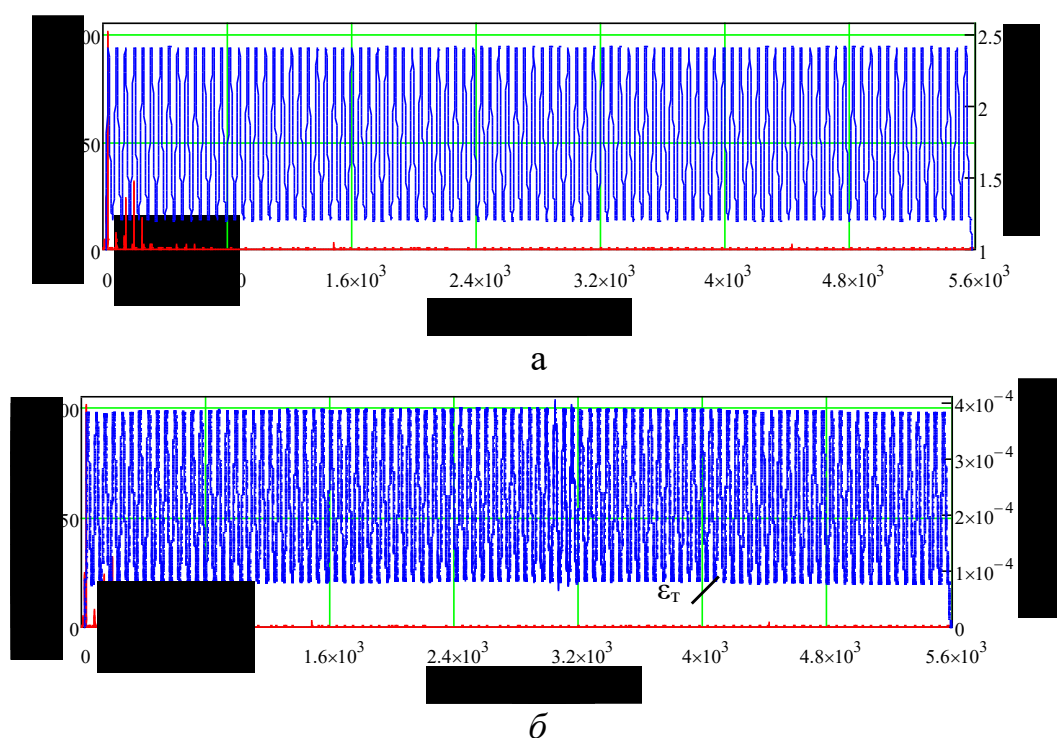


Рисунок 1 – Графики зависимостей от времени нагрузки (а) и деформаций тензорезистора ϵ_T (б), а также ААЭ $\dot{N}_\Sigma$ при циклических изгибных нагружениях с максимальной нагрузкой 2,40 кН в серии перед разрушением

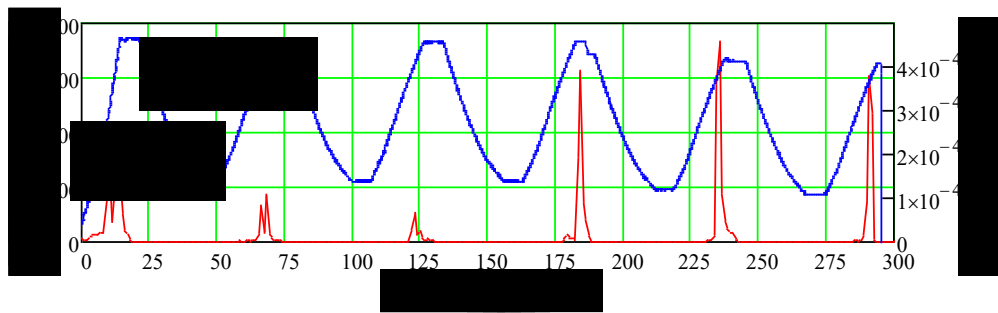


Рисунок 2 – Графики зависимостей от времени относительных деформаций тензорезистора, а также ААЭ $\dot{N}_\Sigma$ при циклических изгибных нагружениях с максимальной нагрузкой 2,45 кН в серии, в которой образец разрушился

Здесь следует отметить увеличение ААЭ и резкое уменьшение показаний тензорезистора на 4 цикле перед разрушением на 6-м цикле.

Результаты регистрации числа импульсов АЭ N_Σ от количества циклов в расширенном масштабе представлены на рисунке 3а и на рисунке 3б – в растянутом масштабе по вертикальной оси.

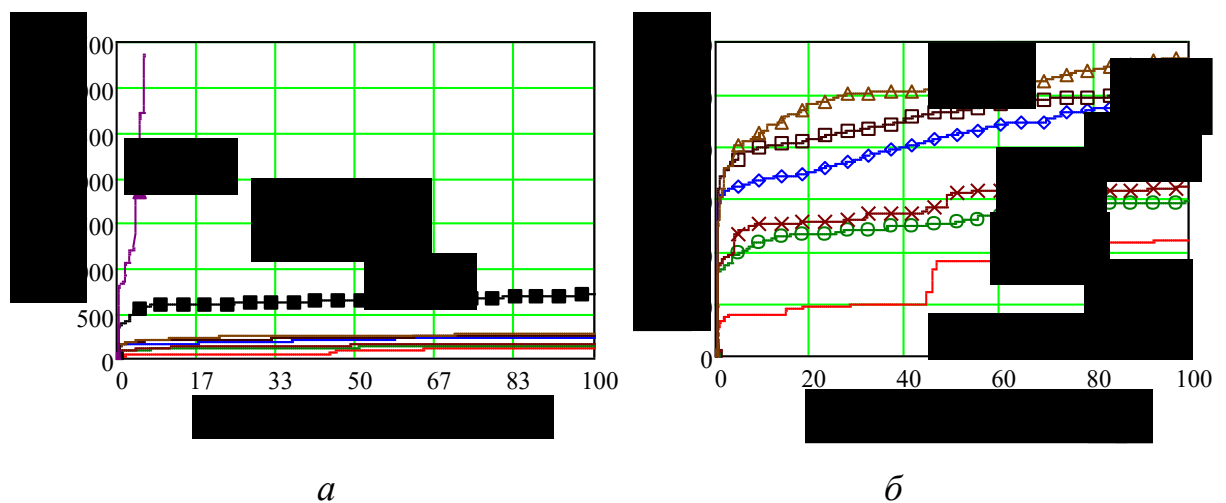


Рисунок 3 – Графики числа импульсов АЭ в зависимости от количества циклов нагружений в обзорном (а) и увеличенном (б) масштабах с указанием максимальной нагрузки в циклах

Полученные зависимости позволили пересчитать нагрузку в каждой серии в параметр поврежденности по формуле

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

где ω_i – текущее значение параметра поврежденности после i -той серии нагружений; $\Sigma N_{\Sigma i}$ – текущее значение суммарной АЭ с начала эксперимента; N_f – суммарная АЭ при разрушении, $N_f = 5226$ имп. Параметр поврежденности, введенный Ю.Н. Работновым, характеризует относительное уменьшение несущего сечения образца при деструкции и возрастание напряжений.

Следует также отметить следующее. В своих работах Л.М. Качанов писал, что поврежденность носит тензорный характер, т. е. оценивается в зависимости от направления. В данном же случае параметр ω , рассчитываемый по АЭ, характеризует эффективную (суммарную) поврежденность образца.

На рисунке 4 в зависимости от параметра поврежденности ω представлены графики скоростей продольных C_p (рисунок 4 а) и поперечных упругих волн C_{s1} и C_{s2} (рисунок 4 б), измеренные при направлении поляризации вдоль и поперек направления нагружения образца соответственно. На этих же рисунках представлены графики измеренной Q и модельной Q_{mod} акустических добротностей. 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.

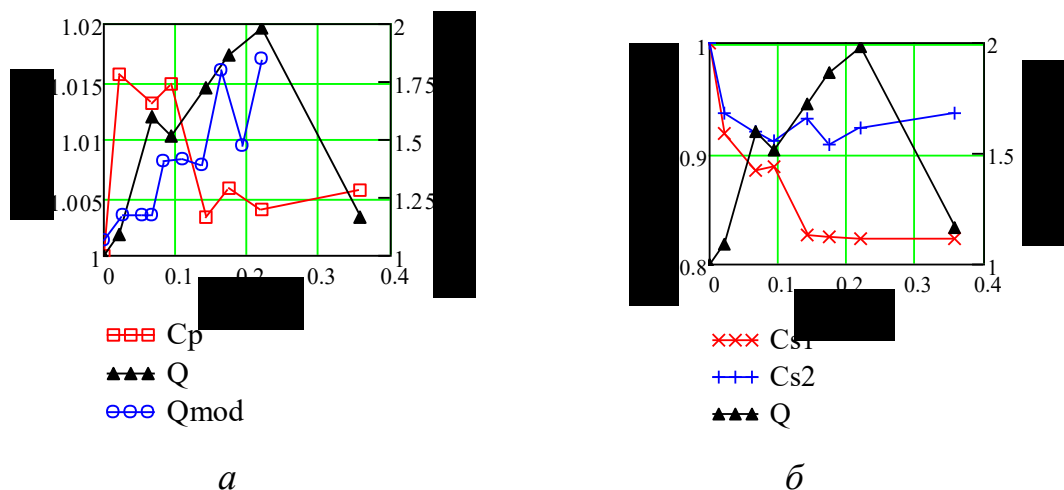


Рисунок 4 – Связи относительных величин скоростей продольной (а) и поперечных волн C_{s1} (вдоль направления нагружения) и C_{s2} (поперек направления нагружения) (б), а также акустической добротности измеренной Q (а, б) и модельной Q_{mod} (а) с параметром поврежденности ω

Экспериментальные графики, представленные на рисунке 4, дают представление об изменении скоростей упругих волн, которые снижаются при увеличении ω , и акустической добротности, характер изменения которой более сложный. При значениях $\omega < 0,23$ отмечается увеличение Q с последующим ее уменьшением. Увеличение добротности при усталостных нагружениях связано с разрушением границ между доломитом и гипсом, а ее снижение связано с последующей деструкцией несущей части образца. Схожие зависимости увеличения добротности Q при увеличении поврежденности с последующим уменьшением перед серией, на которой произошло разрушение, отмечены для всех трех исследованных образцов. Все три образца показали наличие участка возрастания акустической добротности при увеличении параметра поврежденности ω , что дает основание для предположения об одинаковом механизме такого явления. Для подтверждения этого было проведено моделирование изменений акустической добротности в зависимости от нарушенности границ между доломитом и гипсом из-за их различных механических свойств.

Для проверки гипотезы о влиянии разрушения границ между доломитом и гипсом на увеличение акустической добротности в среде COMSOL Multiphysics была разработана численная модель, имевшая размеры $0,04 \times 0,04 \times 0,2$ м. На рисунке 5 представлена расчетная схема модели и ее разбивка по сетке. Сверху и снизу расположены пьезопреобразователи.

Физические свойства доломита и гипса взяты близкими к значениям, полученным из экспериментов. Для пьезопреобразователей был выбран пьезокерамический материал PZT-5A, аналог ЦТС-19.

На внутренних границах в зависимости от поврежденности задавались условия либо неразрывности, либо скользящего контакта, внешние границы оставались свободными.

Модельный параметр поврежденности в данном случае определялся как отношение длины скользящего контакта на внутренних границах к суммарной длине неразрывного и скользящего контактов.

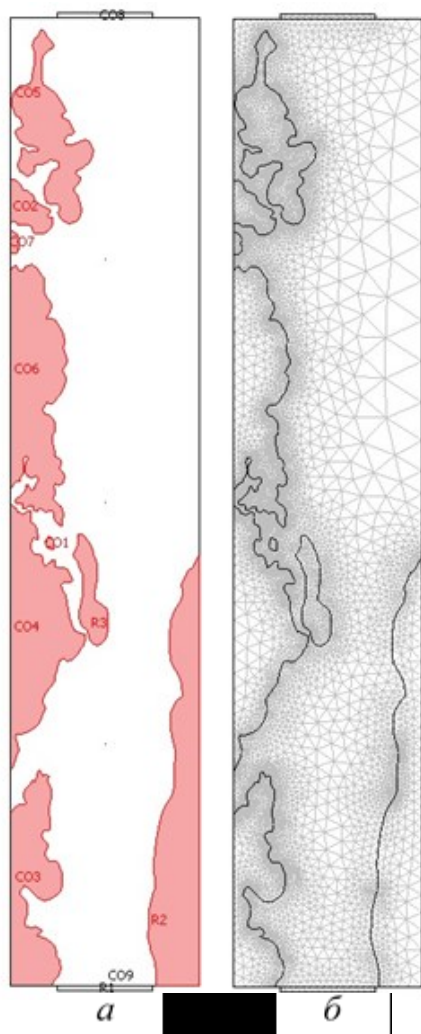


Рисунок 5 – Модель образца породы с подобластями (а) и разбивкой по сетке конечных элементов (б) при исследовании АЧХ, белые области – доломит, закрашенные области – гипс, пьезопреобразователи расположены сверху и снизу

Для определения акустической добротности в модели использовался резонансный метод. На возбуждающий преобразователь в верхней части модели подавался гармонический линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) модельный электрический сигнал амплитудой 100 В в диапазоне частот от 30 до 60 кГц. Выходное напряжение U приемного преобразователя в нижней ча-

сти модели было частотным откликом. Его зависимость от частоты (амплитудно-частотная характеристика, АЧХ) приведена на рисунке 6.

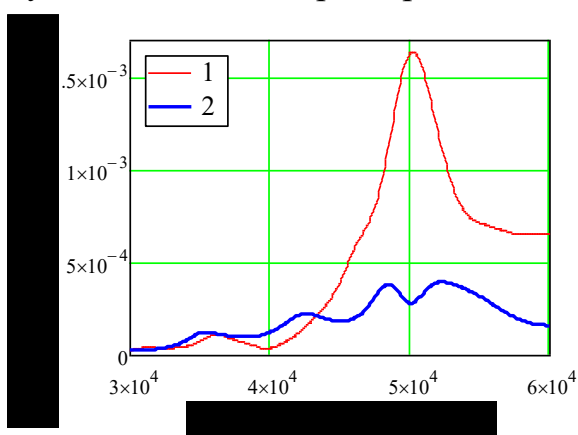


Рисунок 6 – Модельная АЧХ образца доломита и гипса со скользящими условиями на внутренних границах между доломитом и гипсом (1) и с неразрывными границами (2)

Акустическая добротность определялась как отношение частоты максимума АЧХ к его ширине на уровне 0,707 от максимума. Начальное значение акустической добротности образца равно $Q_0 = 14$. Влияние на акустическую

добротность нарушения контактов между гипсом и доломитом в модель моделировалось путем изменения граничных условий на контактах гипс–доломит. Выше, на рисунке 4а показано изменение акустической добротности модельного образца от параметра поврежденности. Как видно из графика, при увеличении поврежденности акустическая добротность модели возрастает также, как и при лабораторных испытаниях образцов пород. Такой результат имеет свое физическое объяснение. Подобласти гипса с большими потерями и, соответственно, с меньшей акустической добротностью Q , демпфируют слой доломита, что приводит к снижению Q . На начальных стадиях появление трещин на границах из-за различия упругих свойств снижает демпфирование доломита гипсом и увеличивает его акустическую добротность. Доломит в этом случае играет основную роль в резонансных явлениях и величине амплитуды на выходном преобразователе. Затем происходит разрушение самих минеральных компонентов и общая добротность снижается. Приведенные результаты подтверждают обоснованность и достоверность *первого научного положения*.

В четвертой главе рассмотрены закономерности изменения прочностных и акустических свойств горных пород при медленных циклических и импульсных повторяющихся нагружениях.

Для обоснования режимов эксперимента произведена оценка максимального и минимального напряжений, действующих на массив каменной соли при закачке и откачке флюидов в подземных хранилищах углеводородов в соляных формациях, составивших для глубины 800 м $P_{\max} = 19,87$ МПа и $P_{\min} = 0,47$ МПа соответственно.

Сравнительные испытания при медленных циклических и импульсных повторяющихся нагружениях при одноосном сжатии проведены на образцах каменной соли диаметром 36,6 мм и высотой 73,2 мм.

На рисунке 7 представлены графики зависимостей предела прочности каменной соли от количества циклов усталостного нагружения M при максимальной нагрузке $\gamma_{\max}$, равной 40, 60, 80 % от первоначальной прочности.

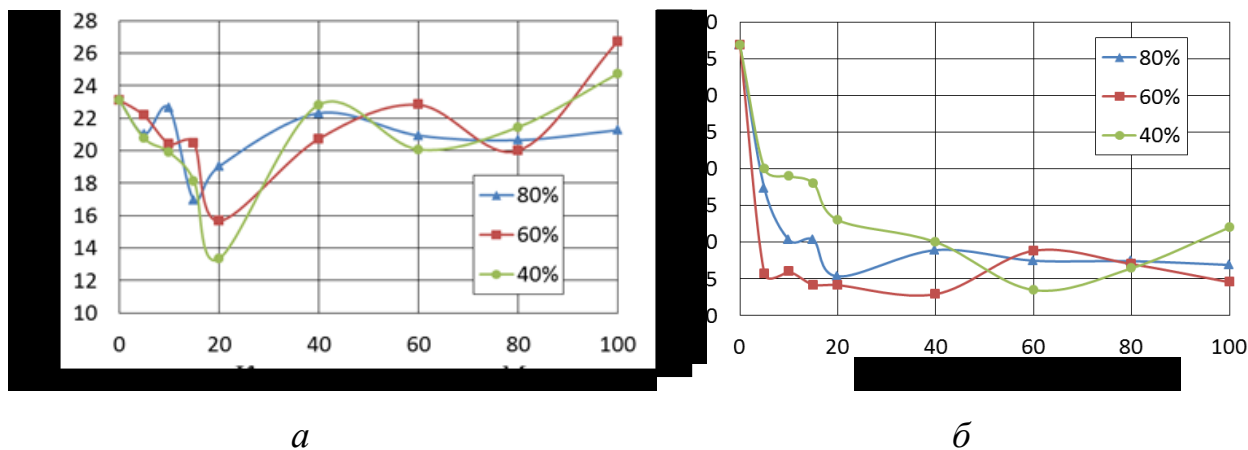


Рисунок 7 – Зависимость $\sigma_r(a)$ и $Q(b)$ от количества циклов нагружения при максимальной относительной нагрузке в цикле $\gamma_{max} = 40, 60$ и 80% от исходного предела прочности

При увеличении M от 0 до 100 все кривые на рисунке 7а демонстрируют вначале снижение прочности, а затем ее увеличение, как и на рисунке 7б в зависимостях Q от M , где минимум Q наблюдается при $M = 20$ при $\gamma = 80\%$, при $M = 40$ при $\gamma = 60\%$ и при $M = 60$ при $\gamma = 40\%$.

Связи предела прочности при сжатии с соответствующими значениями добротности на участках их уменьшения аппроксимированы логарифмическими зависимостями:

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

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

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

Основным выводом является то, что при увеличении числа циклов медленных нагружений и разгрузок M с длительностью 10–30 с для каменной соли наблюдается не только снижение предела прочности и акустической добротности, но и их дальнейшее увеличение, т. е. кривые $\sigma(M)$ и $Q(M)$ имеют минимумы, что отличает каменную соль от других пород.

Для установления особенностей поведения каменной соли при кратковременных импульсных повторяющихся нагружениях с длительностью цикла в области нескольких десятков миллисекунд были проведены испытания об-

разцов на установке с разрезным стержнем Гопкинсона. На рисунке 8 представлены графики изменения предела прочности и акустической добротности (а) и скоростей упругих волн (б) от количества циклов импульсных повторяющихся нагружений M .

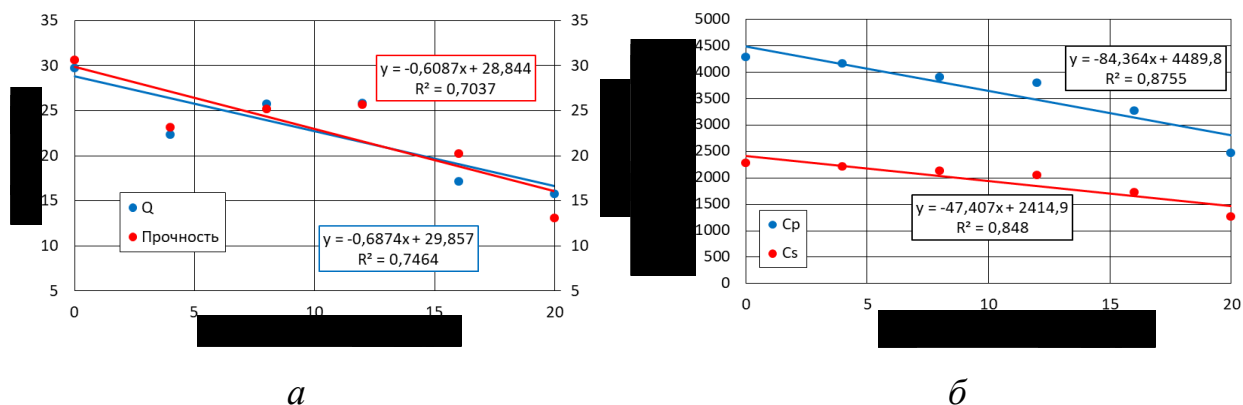


Рисунок 8 – Зависимость предела прочности при одноосном сжатии, добротности (а) а также скоростей упругих волн (б) образцов каменной соли от количества циклов импульсных повторяющихся воздействий

В отличие от медленных циклических нагружений с увеличением M наблюдается монотонное снижение всех величин.

Аналогичные результаты были получены на образцах мраморизованного известняка месторождения «Перевальное» (Дагестан) при медленных циклических и импульсных повторяющихся нагружениях. На рисунке 9а представлены графики изменения добротности и предела прочности образцов мраморизованного известняка при медленных циклических нагружениях, имеющие немонотонный характер изменения как предела прочности, так и добротности. После достижения минимумов они возрастают. При импульсных повторяющихся нагружениях образцы мраморизованного известняка, показали монотонный характер уменьшения, как предела прочности, так и акустической добротности при увеличении числа импульсных воздействий M , что показано на рисунке 9б.

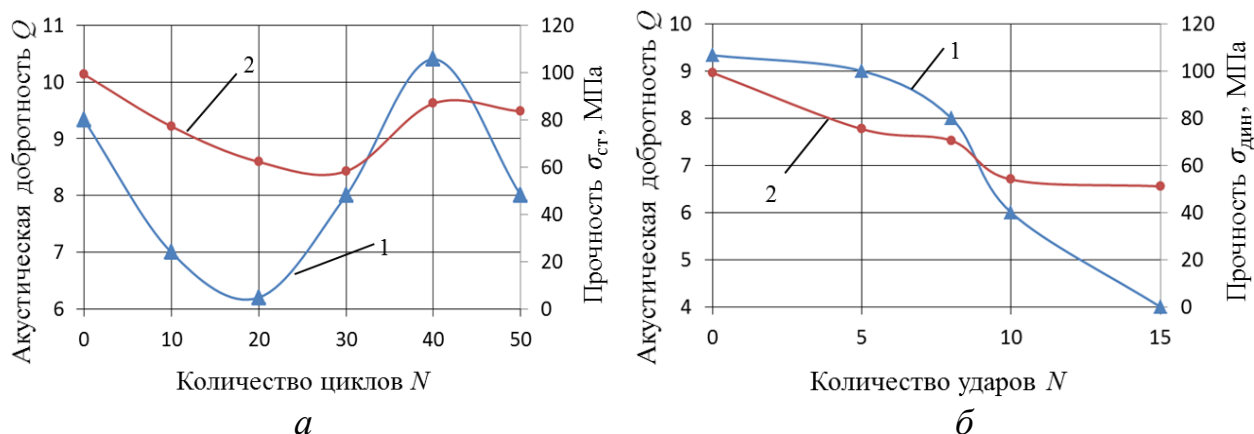


Рисунок 9 – Зависимости акустической добротности Q (1) и предела прочности (2) при медленных (а) и импульсных (б) нагружениях образцов мраморизованного известняка

Таким образом, как для каменной соли, так и для мраморизованного известняка значения акустических свойств и предела прочности при медленных циклических нагружениях и разгрузках имели минимум с последующим возрастанием, а при импульсных повторяющихся нагружениях монотонно уменьшались, что подтверждает обоснованность и достоверность *второго научного положения*.

В пятой главе рассмотрено сравнение прочностных и акустических свойств известняка при циклических нагружениях в одном, а также в одном и перпендикулярном направлениях.

С помощью компьютерного моделирования в среде COMSOL Multiphysics автором показано, что в натуральных условиях при воздействии на участок массива двух взрывов с двух сторон энергия воздействия и поврежденность массива по одному направлению меньше, чем при воздействии двух взрывов с одной стороны.

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. Для исследований были взяты пары образцов известняка Касимовского

месторождения (Рязанская область, Россия). Всего было испытано 5 пар образцов при определенном числе медленных циклов усталостных нагружений. Измерения акустических свойств производились для каждой пары образцов первый раз до испытаний, и затем повторно после серии заданного количества нагружений. После этого образцы разрушались для определения предела прочности при одноосном сжатии.

На рисунке 10 представлены результаты измерения скоростей продольных C_{pij} и поперечных упругих волн C_{sij} 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. Значения скоростей при нагружении в двух направлениях, как правило, больше скоростей, измеренных при воздействии в одном направлении.

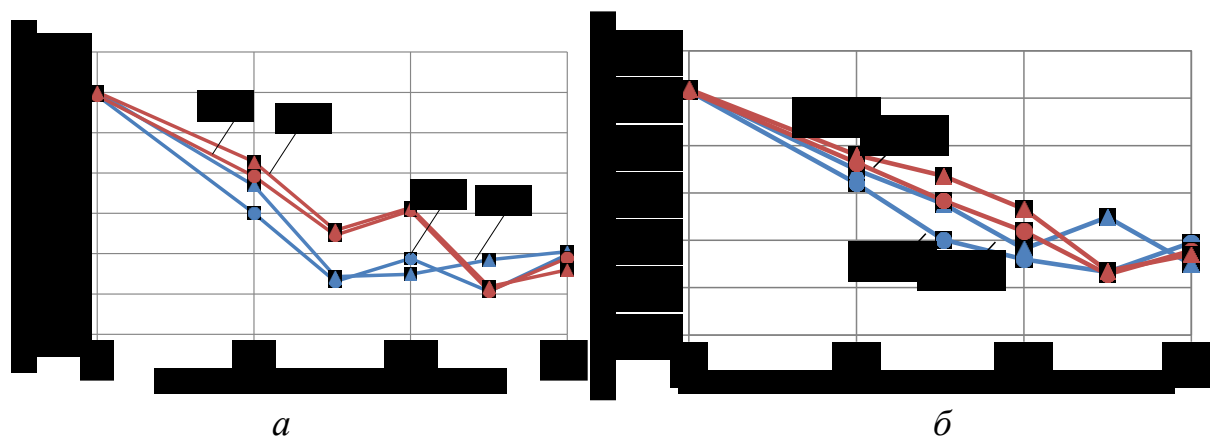


Рисунок 10 – Графики зависимостей скоростей продольных C_p (а) и поперечных C_s (б) упругих волн от количества циклов нагружения M

На рисунке 11 представлены графики изменения акустических добротностей Q_1 и Q_2 (а) и пределов прочности σ_1 и σ_2 (б).

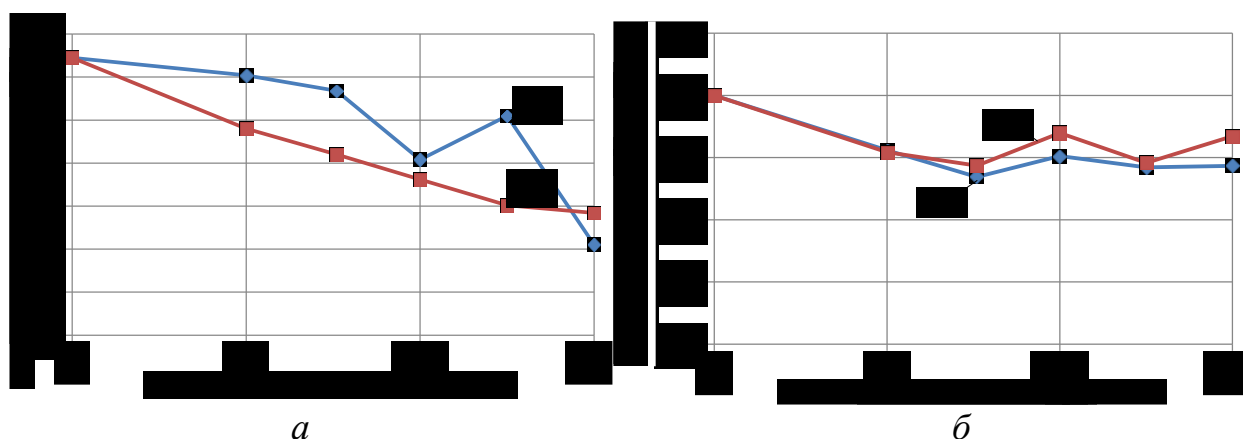


Рисунок 11 – Результаты измерения акустических добротностей (a) и предела прочности (b) при нагружениях по одному (Q_1) и последовательно по двум (Q_2) направлениям в зависимости от количества циклов M

Измерения акустических добротностей производились только в одном направлении первого нагружения. При увеличении M они также, как и пределы прочности, уменьшались. При количестве циклов до $M < 150$ $Q_2 < Q_1$, что свидетельствует о большей эффективной поврежденности образцов при нагружениях в двух перпендикулярных направлениях, чем при нагружениях по одному направлению. Предел прочности при одноосном сжатии при нагружениях в двух перпендикулярных направлениях был больше, чем при нагружениях по одному направлению.

Расчет динамических модулей упругости E_{din} показал их большее значение при нагружениях в двух перпендикулярных направлениях по сравнению с нагружениями по одному направлению при их общем уменьшении с возрастанием числа нагружений M . Поскольку E_{din} рассчитывался по скоростям упругих волн, на которых отражается нарушение в одном направлении, можно сделать вывод, что при нагружениях в двух перпендикулярных направлениях нарушение в одном направлении меньше, чем при нагружении по одному направлению.

Регистрация суммарных значений числа импульсов акустической эмиссии, накопленной всеми образцами при испытаниях, показала, что при нагру-

жениях в двух перпендикулярных направлениях $N_{\Sigma} = 5984$ имп., и эффективная (т. е. по всем направлениям) поврежденность больше, чем при нагружениях по одному направлению, для которых $N_{\Sigma} = 4690$ имп.

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*.

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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

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

1. 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.

2. 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.

3. Красилов М.Н. Влияние параметров Рэлеевской модели затухания упругих волн на характеристики сейсмограмм и акустическую добротность

массива горных пород // Ученые записки Физического факультета Московского университета. 2017. №5. С. 1750807.

4. 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>. (Квартиль по SJR Q1).

5. 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. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-05749-7_41.

6. 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.

7. 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. С. 132–137. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-132-137.

8. 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.

9. Voznesenskii A.S., Kutkin Y.O., Krasilov M.N., Komissarov A.A. The influence of the stress state type and scale factor on the relationship between the acoustic quality factor and the residual strength of gypsum rocks in fatigue tests // International Journal of Fatigue. 2016. Т. 84. С. 53–58. (Квартиль по SJR Q1).

– в других изданиях

10. 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.

11. 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.

12. 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.