

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования**

“Национальный исследовательский технологический университет

«МИСиС»”

На правах рукописи

Куткин Ярослав Олегович

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО
КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ИХ
АКУСТИЧЕСКОЙ ДОБРОТНОСТИ**

Специальность 25.00.20 - «Геомеханика, разрушение горных пород, руднич-
ная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук,

профессор Вознесенский А. С.

Москва 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ В ОБЛАСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ИХ ВЗАИМОСВЯЗЯМ С ДРУГИМИ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ И ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	10
1.1 Проблема обеспечения устойчивости массива горных пород вокруг выработок и ее связь с прочностью геоматериалов; остаточная прочность пород	10
1.2 Современные представления о прочности геоматериалов и физических механизмах ее снижения	21
1.3 Методы неразрушающего геофизического контроля и прогноза прочности горных пород	26
1.4 Недостатки существующих подходов и постановка задачи разработки метода неразрушающего акустического контроля и прогноза остаточной прочности горных пород.....	34
2 УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ МЕЖДУ АКУСТИЧЕСКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ И ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ НАРУШЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВАНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	37
2.1 Основная идея и методика лабораторных экспериментов по определению акустических свойств и остаточной прочности	37
2.2 Методика механических испытаний	38
2.3 Методика акустических испытаний	41
2.4 Влияние преобразователей на величину акустических добротностей образцов горных пород при их исследовании методом акустической резонансной спектроскопии.....	43
2.4.1 Резонансные свойства и АЧХ образца без акустических преобразователей.....	43

2.4.2 Влияние тонких преобразователей поршневого типа при прозвучивании Р-волнами	46
2.4.3 Образец меньшего размера	50
2.3.4 Влияние на акустическую добротность пьезопреобразователей с защитным корпусом	52
2.5 Зависимость акустической добротности и остаточной прочности осадочных горных пород при термическом воздействии на горные породы	55
2.6 Зависимость акустической добротности и остаточной прочности осадочных горных пород от количества циклов усталостного нагружения осадочных горных пород (известняк и травертин)	57
2.7 Зависимость акустической добротности и остаточной прочности от количества циклов усталостного нагружения изверженной горной породы (габбро)	60
2.8 Зависимость акустической добротности и остаточной прочности от количества циклов усталостного нагружения метаморфических горных пород (мрамор)	62
2.9 Анализ взаимосвязей между акустической добротностью и остаточной прочностью для различных типов горных пород	64
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	68
3. ВЛИЯНИЕ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И МАСШТАБНОГО ФАКТОРА НА ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ АКУСТИЧЕСКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ И ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ ГОРНЫХ ПОРОД	69
3.1 Образцы пород для исследования	69
3.2 Влияние напряженного состояния и масштабного фактора для гипсосодержащих пород на зависимость акустической добротности и остаточной прочности от количества циклов усталостного нагружения	70

3.2 Особенности взаимосвязей между акустической добротностью и остаточной прочностью пород при одноосном сжатии и растяжении...	73
3.3 Влияние масштабного фактора на взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью пород	75
3.4 Оценка влияния масштабного фактора на взаимосвязи между остаточной прочностью и акустической добротностью на образцах известняков различной длины	77
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	80
4. ОБОСНОВАНИЕ ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД В МАССИВЕ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ИХ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ И АКУСТИЧЕСКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ	81
4.1 Описание мест проведения натурных экспериментов	81
4.2 Свойства пород.....	83
4.3 Общие предпосылки методики оценки остаточной прочности на натурных объектах	89
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	101

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы следует из необходимости создания и совершенствования методов неразрушающего контроля остаточной прочности горных пород вокруг выработок и подземных сооружений, что важно для повышения эффективности и безопасности горного производства. Под воздействием выветривания, ползучести, трещинообразования, пластического деформирования прочность пород снижается по сравнению с их первоначальным значением. Под остаточной прочностью здесь понимается прочность горных пород в определенный момент времени после воздействия указанных неблагоприятных факторов. Известные методы определения остаточной прочности базируются на регрессионных зависимостях между прочностными и другими физическими свойствами пород. Широкое распространение получили взаимосвязи прочностных и акустических свойств, таких, как скорости распространения упругих волн. К недостаткам их использования можно отнести то, что они не позволяют с достаточной достоверностью оценивать остаточную прочность пород на начальных стадиях накопления поврежденности геоматериала. В то же время, динамические акустические характеристики пород и среди них акустическая (механическая) добротность, обладают высокой чувствительностью по отношению к повреждениям и позволяют оценивать остаточную прочность уже на ранних стадиях их накопления. Как показал анализ публикаций, исследованиям взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью горных пород посвящено недостаточное количество исследований, и этот недостаток должен быть устранен с целью создания на этой основе метода определения остаточной прочности горных пород без проведения механических испытаний.

Таким образом, тема диссертации, связанная с обоснованием и разработкой метода неразрушающего контроля остаточной прочности горных пород по их акустической добротности является актуальной научной задачей. Исследования по данной тематике проводились при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (№ 14-05-00362), а

также в рамках проекта № 109 базовой части государственного задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности Минобрнауки России на 2014-2016 гг.

Целью работы является установление взаимосвязи между остаточной прочностью и акустической добротностью горных пород при их различной нарушенности и разработка на этой основе метода контроля остаточной прочности горных пород без механических испытаний.

Идея работы заключается в учете одновременного влияния нарушенности горных пород, как на остаточную прочность, так и на акустическую добротность, получении регрессионного уравнения связи между ними, определении с его помощью остаточной прочности путем измерения акустической добротности.

Основные научные положения, разработанные лично соискателем, и их новизна.

1. Остаточная прочность образцов осадочных, магматических и метаморфических горных пород может быть определена по акустической добротности на основании их взаимосвязи, предварительно получаемой с помощью усталостного циклического нагружения образцов, причем, при увеличении числа циклов остаточная прочность и акустическая добротность известняков и габбро уменьшаются, а для мрамора они уменьшаются при количестве циклов менее 50 и увеличиваются при количестве циклов более 50.

2. Для исследованных горных пород (известняк, габбро, мрамор, гипсо-содержащие породы) при механическом усталостном нагружении установлена взаимосвязь между их акустической добротностью и остаточной прочностью, которая при одноосном сжатии аппроксимируется логарифмической зависимостью, а при одноосном растяжении – экспоненциальной.

3. Для образцов гипсосодержащих пород Новомосковского месторождения масштабный фактор влияет на их взаимосвязь между акустической добротностью и остаточной прочностью при одноосном сжатии, что обуславливает необходимость проведения испытаний на образцах стандартных

размеров. При соответствующих испытаниях на растяжение масштабный фактор не оказывает влияние на взаимосвязь между акустической добротностью и остаточной прочностью.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- непротиворечивостью полученных результатов общим законам физики, теории прочности и акустики;
- применением в экспериментах отлаженных 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 акустической добротности;
- положительными результатами проверки на модельных задачах разработанных алгоритмов и компьютерных программ, использованных для обработки и анализа результатов экспериментов;
- удовлетворительной сходимостью результатов оценки акустической добротности, полученных несколькими методами ее измерения;
- представительным объемом экспериментальных данных, полученных при испытаниях не менее 50 образцов горных пород каждого типа, позволяющим получить статистически значимые результаты.

Методы исследований включают анализ литературных источников и обоснование методов решения поставленных задач, экспериментальные лабораторные исследования на образцах пород, спектральный и статистический анализ результатов экспериментов.

Научная новизна работы заключается:

- в разработке метода определения остаточной прочности горных пород по предварительно установленной взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью;
- в разработке методики исследования зависимости между акустической добротностью и остаточной прочностью горных пород;
- в установлении взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью магматических, метаморфических и осадочных горных пород;
- в установлении влияния вида напряженного состояния и масштабного фактора на взаимосвязь между остаточной прочностью и акустической добротностью горных пород;
- в обосновании и разработке возможного подхода к оценке остаточной прочности горных пород в массиве на основе предварительно установленной взаимосвязи между их остаточной прочностью и акустической добротностью.

Научное значение работы состоит в установлении взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью горных пород различных типов при сжатии и растяжении с учетом масштабного фактора и разработке на этой основе соответствующего метода неразрушающего контроля остаточной прочности горных пород.

Практическая значимость работы. Выводы и рекомендации, полученные на основе проведенных исследований, позволили разработать «Методические рекомендации по определению взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью горных пород».

Апробация работы. Результаты работы получили одобрение на научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2012, 2013, 2014, 2015 гг), XXIV сессии Российского акустического общества (2011 г), IV Международной научно-технической конференции «Горная геология, геомеханика и маркшейдерия» (15-16 октября 2013), XX конференции с участием ино-

странных ученых. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли (07-11 октября 2013 г., Новосибирск), 1-ой Всероссийской акустической конференции (6-10 октября 2014 г., Москва, 2014), IX Международной школе-семинаре «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» (Иркутск, Россия, 2-6 сентября 2013 г). По результатам работы получен грант Американского акустического общества (2015 г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 11 таблиц, 34 рисунка, список использованных источников из 148 наименований.

1 АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ В ОБЛАСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ИХ ВЗАИМОСВЯЗЯМ С ДРУГИМИ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ И ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Проблема обеспечения устойчивости массива горных пород вокруг выработок и ее связь с прочностью геоматериалов; остаточная прочность пород

Одной из основных проблем в горном деле является обеспечение устойчивости выработок, т.е. массива горных пород вокруг них.

В геомеханике под устойчивостью незакрепленной выработки (породного обнажения) понимают способность обнажаемых горных пород сохранять форму и размеры выработки, заданные по условиям нормальной эксплуатации [1]. Геологический словарь определяет устойчивость пород как способность пород сопротивляться обрушению в горных выработках и буровых скважинах [2]. Устойчивость пород зависит от их физико-механических свойств, структур и текстур, степени и характера нарушенности их сплошности, величины и габаритов незакрепленной части выработки.

Понятие устойчивости в горном деле в большинстве случаев рассматривается применительно к горным породам [3]. Их устойчивость зависит от прочностных свойств и действующих на соответствующие объекты нагрузок. Здесь же указывается, что устойчивость контролируется путём визуальных наблюдений и инструментальных замеров видимых деформаций и напряжений в массиве, а также с помощью акустической диагностики. В то же время, несмотря на то, что устойчивость зависит также и от прочности, здесь не говорится о возможности контролировать их прочность, поскольку эта величина определяется путем разрушения образцов или участков массива горных пород, а это недопустимо в реальных действующих объектах.

В течение многих лет при проектировании туннелей руководствовались эмпирическими правилами. В XX в. начали обращать внимание на прочностные, упругие и пластические свойства скальных пород,

а позднее – на напряженное состояние и деформации массива вокруг подземных выемок, в том числе вокруг напорных и безнапорных туннелей. Развертывание строительства крупных подземных сооружений различного назначения дало толчок дальнейшему развитию аналитических способов расчета напряженно-деформированного состояния трещиноватых скальных массивов, в том числе методом конечных элементов. Затем возникла проблема релаксации напряжений и связанного с ней уменьшения модулей деформации породы. Эти концепции определили новое направление в развитии механики скальных пород [4].

В [5] отмечается, что на устойчивость приконтурного породного массива, как правило, влияют три основных показателя: прочностные свойства пород, первоначальное напряженное состояние массива и трещиноватость горных пород. Интенсивность трещиноватости горных пород является показателем, который характеризует уменьшение физических свойств и определяется количеством трещин на 1 м в направлении, перпендикулярном к плоскости трещин. При оценке трещиноватости учитываются только трещины, разбивающие массив на структурные блоки размерами от десятков сантиметров до нескольких метров.

Кроме того, ввиду постепенного разрушения породных массивов с течением времени для успешного обеспечения устойчивости необходим мониторинг прочности горных пород, слагающих конструктивные элементы систем разработки, т.е. в первую очередь целики и кровлю очистных выработок.

Рассмотренная в [6] добыча полезных ископаемых открытой и подземной геотехнологиями связана со строительством горных сооружений – карьеров и подземных рудников. Каждый этап этого строительства должен быть обоснован расчетами как для обеспечения безопасности горных работ, так и для достижения максимальной их эффективности.

Специфической особенностью горного дела является необходимость получения информации о физико-механических свойствах массива горных

пород, его напряженном состоянии, создания методов расчета устойчивости горных конструкций и разработки основных направлений их преобразования для достижения максимальной эффективности выполнения их функций в сложнейших горнотехнических условиях. Это крупнейшие проблемы в 60-70-х годах 20 века. Проблемы в знаниях по любой из этих проблем создавали искаженное, а иногда и в корне неверное представление о законах формирования напряжений в конструктивных элементах горных сооружений, об их устойчивости и причинах разрушения. Это, в свою очередь, приводило к крупным ошибкам в конструировании новых или преобразовании известных систем разработки, определении параметров их конструктивных элементов.

В [7] рассмотрен комплекс вопросов, связанных с повышением устойчивости выработок на больших глубинах. Изложены результаты исследований прочности и деформируемости горных пород при различных видах напряженного состояния и изменения скорости нагружения, приведены уравнения связи между напряжениями и деформациями в предельном и запредельном состояниях. Отмечены особенности поведения горных пород при малых скоростях деформирования, описан механизм разрушения при ползучести горных пород, а также случаи хрупкого, вязкого и смешанного разрушения. Приведены методики прогнозирования процессов деформирования горных пород вокруг горных выработок и оценки их устойчивости, выбора оптимальной податливости и несущей способности крепей.

Важность определения прочности и ее изменения во времени в проблеме обеспечения устойчивости горных пород вокруг выработок подтверждается значительным числом публикаций, продолжающих появляться также и в последнее время.

Часть публикаций посвящена влиянию трещиноватости и других факторов ослабления, а также размеров структурных блоков на прочность массивов горных пород.

В [8] предложен метод оценки возможной потери устойчивости естественных и искусственных склонов, основанный на обобщенном критерии разрушения Кулона–Мора с учетом напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Поиск наиболее вероятной поверхности сдвижения осуществляется пошаговой итерационной процедурой по схеме метода локальных вариаций. Показана необходимость оценки состояния и поведения оползневого тела в процессе динамического сдвижения с целью определения его конечного положения. Приведены примеры такой оценки

В [9] приведены результаты исследования состава и физико-механических свойств пород Ерунаковского Южного месторождения. Результаты исследования показали, что наибольшей прочностью обладают песчаники и алевролиты, незатронутые выветриванием, что во многом предопределяет их поведение и устойчивость в бортах карьеров.

В [10] наблюдения последних лет за деформациями реальных откосов, проводимые уральским филиалом ВНИМИ на ряде угольных и рудных карьеров, а также результаты моделирования показывают, что нарушение устойчивости слоистых откосов происходит не только путем сдвига по площадкам, совпадающим с поверхностями ослабления или под углом к ним, но и в результате качественно отличающегося от общепринятого характера деформирования слоев горных пород в виде их поворота и последующего опрокидывания. При этом поворот и опрокидывание блоков происходит в нижней части откоса под действием веса вышележащих пород, в результате чего обрушается по наслоению весь внешний слой. Далее процесс циклически повторяется до тех пор, пока обрушенные породы не создадут у подошвы откоса определенную пригрузку, приводящую к снижению высоты обнаженных слоев. В связи с этим для условий, когда поверхность откоса совпадает с наслоением, возникает необходимость в рассмотрении деформаций, связанных с поворотом слоев и потерей их устойчивости при напряжениях, не превышающих предел прочности пород на срез.

В [11] различная степень тектонической нарушенности и наличие жильных тел, секущих рудное тело, создает блочное строение массива со сложной формой взаимодействия блоков, формирует неоднородность поля напряжений, так как тектонические швы являются зонами природных концентраторов напряжений. Горные породы и рудное тело имеют различные прочностные характеристики, поэтому в местах пересечения выработками их контактов отмечается рост нагрузок. Сезонное увеличение водообильности массива приводит к снижению прочностных межпоровых характеристик горных пород, уменьшает сцепление на контактах структурных элементов и тектонически ослабленных блоков и создает условия для толчкообразного деформирования всей блочной системы.

В рамках модели геомеханического состояния анизотропного по прочности массива горных пород с различными его параметрами проведены исследования устойчивости целиков около системы горизонтальных выработок прямоугольного сечения [12].

В [13] предложены новые геомеханические критерии оценки устойчивости массива и жесткой крепи горных выработок в широком диапазоне горно-геологических и горнотехнических условий.

В [14] неизменными условиями безопасной отработки калийных месторождений являются минимальное оседание земной поверхности и сохранение сплошности водозащитной толщи. Достигается это путем возведения в выработанном пространстве жестких геомеханических систем с запасом прочности междукамерных целиков не менее 2,5. Для снижения потерь полезного ископаемого на 10-20% в процессе отработки залежей необходимо формировать стандартные геомеханические системы из неограниченной последовательности жесткопластичных целиков с запасом прочности не менее 1,7, а затем за счет возведения комбинированных барьерных полос и ликвидационного заполнителя повышать запас прочности целиков до 2,5, т. е. создавать жесткую геомеханическую систему, обеспечивающую длительную устойчивость налегающих пород и земной поверхности.

В [15] отмечается, что в скальных породах устойчивость массива в обнажениях зависит, в основном, от глубины залегания отрабатываемой залежи, размеров обнажения и напряженного состояния пород. Для исследования влияния глубины на прочностные свойства горных пород и на устойчивость налегающей толщи массива Казского месторождения под выработанным пространством Северной зоны участка «Центральные штоки» в этажах -90...-20 м; -20...-50 м; -50...-120 м, были использованы следующие материалы: планы горизонтов, разрезы по разведочным линиям, продольная, вертикальная и горизонтальная проекции Северной зоны, данные по выходу керна из скважин, пробуренных с поверхности в массиве горных пород, ограниченном углами сдвигения (75°) от выработанного пространства гор. - 90 м, в интервале глубины, равной мощности налегающей толщины. Глубина залегания слепых рудных тел Северной зоны составляет в среднем 406 м от поверхности. Мощность наносов достигает 14 м. Коренные породы налегающей толщи представлены известняками, скарнами, диоритами, скарнированными и порфиоровидными диоритами. Коэффициент крепости пород $f=8-18$. Согласно горно-геологической характеристике в налегающей толще не отмечено крупных тектонических трещин и карстовых полостей. Наибольшая длина рудной зоны по простиранию 520 м. Средняя горизонтальная проекция рудной зоны составляет 155,5 м, максимальная 214 м. Представленный расчет устойчивости налегающей толщи над выработанным пространством Северной зоны выполнен в соответствии с «Временной инструкцией по условиям безопасной отработки слепых рудных залежей на железорудных месторождениях Горной Шории и Хакасии». Расчет произведен с учетом отработки рудной зоны до гор. - 90 м по трем факторам: эквивалентным пролетам; критическим деформациям; критическим напряжением.

В [16] на основе упругохрупкой модели и предложенного механизма взаимодействия берегов численным экспериментом установлена функциональная зависимость средней нормальной жесткости нарушения от прочности вмещающих пород и фрактальной размерности.

В [17] обсуждаются различные критерии трещинностойкости подрабатываемых горных массивов. Представлены данные прочностных испытаний трещиноватых горных пород. Результаты анализа использованы для прогноза устойчивости кварцевых песчаников в районе строящегося гидроузла в Китае.

В [18] состояние пород, предшествующее потере устойчивости, следует рассматривать как предельное, то есть таким, при котором горная выработка перестает удовлетворять эксплуатационным требованиям. При этом различают две группы предельных состояний: по потере несущей способности (полной непригодности к эксплуатации) и по непригодности к нормальной эксплуатации. Обе группы в значительной мере зависят от прочности пород, на которую свое влияние оказывает ползучесть. Целью оценки устойчивости пород по предельным состояниям первой группы является предупреждение хрупкого (очень редко - вязкого) разрушения пород, окружающих выработку. При расчетах по второй группе предельных состояний оценивается возможность недопущения чрезмерных деформаций, перемещений, образований открытых трещин, то есть причин, затрудняющих нормальную эксплуатацию выработок, пройденных, как правило, в вязко-упруго-пластичных массивах.

Вторая часть публикаций связана с изучением влияния напряженного состояния на прочность.

Рассмотренные в [19] результаты посвящены важной научно-технической проблеме инструментального определения модулей деформации образцов горных пород при обеспечении условий их сложного напряженного состояния в массиве. На основании показанных исследований и экспериментов по определению модулей деформации образцов каменной соли, изготовленных из поднятого с глубины 970–1000 м керна, получены продуктивные результаты и методические рекомендации.

Рассмотренное в [20] напряженно-деформированное состояние скального массива имеет большое значение для устойчивости и, следовательно, для проектирования и строительства сооружений в нем. В подземных выра-

ботках даже при относительно небольшой перекрывающей толще скальная порода в сочетании с разного рода креплением и облицовкой, как правило, является непосредственной несущей конструкцией. При передаче сосредоточенных нагрузок на скальное основание, например, у арочных плотин, скальный массив также является основным несущим элементом. Деформации скального основания вызывают напряжения в плотине и наоборот, т.е. оба элемента сооружения оказывают друг на друга взаимное влияние. В скальных откосах порода, взаимодействуя, например, с удерживающими сооружениями, воспринимает нагрузки от собственного веса и других воздействий.

При большом разнообразии строения и свойств скальных пород чрезвычайно трудно разработать модель, которая могла бы описать напряженно-деформированное состояние всех встречающихся в природе разновидностей скальных пород и использовать ее в качестве основы проекта. Такая модель должна быть настолько простой, чтобы разработанные на ее основе методы исследования устойчивости можно было применять без чрезмерных затрат труда.

Поведение горных выработок, описанное в [21], вызывает изменение начального поля напряжений массива горных пород. В общем случае характер образующегося поля напряжений вокруг выработок зависит от совокупного действия многих взаимосвязанных факторов, которые можно подразделить на несколько групп.

Первую группу факторов составляют пространственно-геометрические параметры рассматриваемых выработок. К ним, прежде всего, относятся форма и размеры поперечного сечения, соотношение длины, ширины и высоты выработки, близость соседних параллельных и наличие пересекающихся выработок и пр.

Ко второй группе относятся деформационные характеристики пород, непосредственно окружающих выработку, поскольку именно эта часть массива воспринимает дополнительные нагрузки при образовании выработок.

Третья группа факторов охватывает особенности начального поля напряжений в массиве, т.е. до проведения выработок.

Наконец, четвертую группу факторов составляют характеристики воздействия на породы вокруг выработки в процессе ее проходки и дальнейшей эксплуатации. Наибольшее значение среди факторов этой группы имеют динамические нагрузки во время взрывных работ при проведении выработок или вблизи них, а также изменение свойств пород под влиянием процессов выветривания – движения воды и воздуха, изменения температурного режима и пр.

Учесть в равной мере все выделенные группы факторов при определении напряженного состояния пород вокруг выработок не представляется возможным. Наиболее полно могут быть учтены факторы первой и третьей групп, поскольку разработаны аналитические (на базе методов механики сплошной среды) и экспериментальные методы определения компонент напряжений и деформаций вокруг выработок при любых статических нагрузках и конфигурациях поперечных сечений. В меньшей степени учитываются факторы второй группы, так как разработанные аналитические методы, как правило, основаны на использовании упругих моделей массива или предполагают приведение к режимам упругого деформирования (например, в случае учета развития деформаций во времени – ползучести пород).

Четвертую группу факторов при определении напряженного состояния пород вокруг выработок пока учитывают лишь качественно. Аналитические методы оценки влияния факторов этой группы еще практические вовсе не разработаны, а экспериментальные разработаны в недостаточной степени.

В [22] рассмотрено влияние параметра Надаи-Ладе на прочность горных пород при сдвиге. В [23] приведены результаты экспериментальных исследований для определения коэффициента запаса прочности горных пород от глубины залегания.

В [24] приведенные результаты исследования напряженно-деформированного состояния массива вокруг горных выработок позволили:

1) установить оптимальные технологические схемы образования полостей для разгрузки массива вокруг выработки в зависимости от горного давления; 2) разработать метод определения длины полостей для разгрузки массива вокруг выработок проводимых впереди очистного забоя или одним забоем с ним, а также с отставанием; 3) определить, что породы с пределом прочности на сжатие 50-100 МПа вокруг выработок, проводимых на границе с лавами длиной 100 м на глубине 800 м и более, от нормальных напряжений разрушаются. При разгрузке массива от нормальных напряжений на этой глубине породы с указанной прочностью вокруг горных выработок на границе с лавой длиной до 250 м могут сохранять устойчивость

В [25] для условий карьера «Восточный» Олимпиадинского месторождения автором разработаны требования к проведению испытаний образцов горных пород для определения прочностных показателей по поверхностям ослабления. При выполнении разработанных требований, за счет применения специального оборудования, достигается соответствие нагружения образцов горных пород напряженным состоянием, при котором происходит сдвиг структурных блоков в естественном массиве, и сохранение идентичности условий нагружения образцов при создании в плоскости контакта напряженных состояний, характеризующихся сжатием, сдвигом со сжатием, чистым сдвигом и отрывом, что обеспечивает надежность результатов испытаний. Точность оценки устойчивости откосов во многом зависит от того, насколько полно и точно применяемая расчетная схема соответствует реальному механизму деформации и разрушения откоса.

В [26] анализируется геомеханическое состояние породного массива месторождения «Трудовое» (Киргизия) на основе реконструкции тектонических структур: складок и разрывных нарушений, установленных геологоразведочными работами. Данные прогнозной карты напряженно-деформированного состояния породного массива и результаты определения прочности пород свидетельствуют о том, что в породном массиве существует дополнительная потенциальная энергия упругой деформации, аккумулиро-

ванная горными породами и обусловленная наличием тектонических напряжений. При этом ее величина на достигнутых глубинах разработок в несколько раз превосходит ожидаемую за счет только сил гравитации, что необходимо учитывать при производстве буровзрывных работ и вопросах устойчивости горных выработок. Прогнозная карта позволяет выбрать благоприятное направление горизонтальных и наклонных горных выработок исходя из условий наименьшей напряженности пород, рациональное расположение смежных выработок, исключая возможность взаимного наложения повышенных напряжений, рациональную последовательность проведения пересекающихся выработок.

В целом можно отметить, что количество публикаций, посвящённых влиянию трещиноватости и других факторов ослабления на прочность горных пород, значительно больше, чем о влиянии напряженного состояния на это свойство пород.

Поскольку прочность породных массивов с течением времени и под воздействием различных факторов меняется, возникает необходимость определения остаточной прочности горных пород, т.е. прочности в определенный момент времени существования выработок. Согласно [27, 28] остаточная прочность горной породы – уровень сохранившейся прочности разрушенной породы, равный соответствующим максимальным напряжениям при данном значении запредельной деформации. Для получения значений остаточной прочности в соответствии с этим определением необходимо иметь экспериментальную кривую $\sigma(\epsilon)$. Такая кривая снимается на образцах горной породы или в натурных условиях и предполагает жесткое нагружение породы вплоть до ее разрушения. В реальных конструкциях разрушения пород стараются избегать ввиду катастрофических последствий, поэтому снять такую кривую не представляется возможным. Это определяет необходимость создания новых методов, позволяющих определять прочность без разрушения горных пород.

1.2 Современные представления о прочности геоматериалов и физических механизмах ее снижения

Теориям прочности, разрушения, механике геоматериалов и массивов горных пород посвятили свои работы Баклашов И.В. [29, 30], Барях А.А. [31], Влох Н.П. [32], Гриффитс А.А. [33], Дамаскинская Е.Е. [34], Ершов Л.В. [35], Иофис М.А. [36], Картозия Б.А. [1, 29], Козырев А.А. [37], Куксенко В.С. [38], Курленя М.В. [39, 40], Макаров А.Б. [41], Одинцев В.Н. [42, 43], Протосеня А.Г. [7], Ржевский В.В. [44], Руппенейт К.В. [45], Ставрогин А.Н. [7], Фисенко Г.Л. [46], Г.В. Черепанов [47], Чирков С.Е. [53], Шемякин Е.И. [48, 49] и другие ученые.

Большой вклад в развитие данной проблемы внесли работы, выполненные в ОАО ННПП «ИГД им. А.А. Скочинского», ФГБУН «ИПКОН» РАН, Кольский научный центр РАН, ФГБУН «Горный институт» УрО РАН, ФГБУН ИГД УрО РАН, ФГБУН ИГД РАН и другие.

В настоящее время природа механической прочности твердых тел объясняется с позиции кинетической теории прочности [50], разработанной в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. В ней решающая роль в процессе разрушения отводится тепловому движению атомов. Для описания процесса разрушения горных пород используется двухстадийная модель [51].

Из [32] известно, что для создания устойчивой конструкции любого сооружения и, в частности, подземных выработок различного назначения необходимо знать напряженное состояние ее элементов и закономерности его изменения в процессе разработки месторождений полезных ископаемых. Но для определения этих напряжений необходимо также знать исходное (первоначальное) поле напряжений массива горных пород разрабатываемых месторождений.

Зная закономерности перераспределения первоначального напряженного состояния массива горных пород вокруг горных выработок любого назначения, можно создавать инженерные способы по уменьшению концентрации напряжений в тех или иных элементах систем для обеспечения их

устойчивости или по увеличению их концентрации для обрушения части или всего массива, вызванного необходимостью разработки месторождения.

В [52] предельные условия прочности не могут быть охарактеризованы одним численным значением. Как механизм разрушения породы, так и предел прочности зависят от характера приложенной нагрузки. Задачами теории прочности являются: установить механизм разрушения и найти закономерности, позволяющие прогнозировать прочностные свойства на разнообразные виды напряженного состояния по результатам испытаний при сравнительно ограниченном числе вариантов напряженного состояния.

Для расчета устойчивости горных выработок прежде всего необходимо знать условия, при которых происходит разрушение. Анализ границ напряженного состояния, на которых происходит разрушение, посвящены механические теории прочности.

Эти теории рассматривают комплекс внешних прочностных свойств как заданное явление (феномен), как факт, поэтому они являются феноменологическими.

Результатом всякой механической теории является тот или иной критерий, описывающий условие предельного напряженного состояния. Для горных пород представляет интерес рассмотрение критериев (механических теорий) Мизеса, Кулона и Мора.

Закономерности взаимосвязи прочностных параметров хрупких тел, и в том числе горных пород, находят удовлетворительное истолкование в рамках микродефектной теории прочности, основы которой были сформулированы Гриффитсом. Новейшие разработки в области теории прочности горных пород в большинстве своем ведутся именно в области микродефектной теории.

В [53] рассматриваются причины различия свойств горных пород и углей в лабораторных образцах и в массиве, заключающиеся, главным образом, во влиянии трещиноватости пород на их прочность, описывается происхождение трещиноватости углей и пород. Анализируются методы оценки трещиноватости и прочности в массиве, излагается и обосновывается комплексный

метод оценки прочности и трещиноватости пород в массиве по данным лабораторных исследований образцов разных размеров, с учетом огибающих наибольших кругов напряжений, влияния масштабного фактора и вариации данных прочности. Приводятся сопоставления данных о прочности пород в целиках, полученных этим методом, с данными непосредственных замеров в забое. Причины образования и виды трещиноватости и неоднородности углей и пород весьма разнообразны. Рассмотрим их.

Прежде всего в стадии накопления осадков и диагенеза условия периодически изменяются, вследствие чего образуются пласты различных горных пород. Известно, что пласты угля, например, часто состоят из пачек с различными механическими свойствами. Особенно ярко это свойство выражено в кизеловских углях. При внимательном рассмотрении каждой из пачек, особенно под микроскопом, легко заметить, что угли имеют полосчатую структуру. Эти полосы состоят из различных петрографических ингредиентов, резко различающихся по механическим свойствам. Таким образом, угли и некоторые осадочные породы характеризуются слоистостью и полосчатостью, вследствие чего, образуются слабые слои и возникают слабые контакты между слоями.

В процессе диагенеза слои осадков теряют влагу и уплотняются. При уменьшении объема осадков от усыхания в них возникают вертикальные трещины эндогенного кливажа, которые обычно перпендикулярны к плоскостям напластования и определенным образом ориентированы географически.

Пласты углей и горных пород на большой глубине подвергаются воздействию высоких давлений и температур, при этом угли метаморфизируются, т. е. теряют летучие вещества (водород, пары воды, уголекислоту, метан и др.), что снова ведет к уменьшению объема твердого вещества пород. Уменьшение размеров в вертикальном направлении происходит вследствие воздействия вышележащих пород, поэтому при метаморфизации горизонтальные трещины не развиваются. Наоборот, уменьшение горизонтальных размеров каждого участка угольного пласта сопровождается трением его о

породы кровли и подошвы, которое препятствует горизонтальному уменьшению всего пласта. В результате снова образуются трещины эндогенного кливажа, направление перпендикулярно к мощности пласта.

Третий тип трещин в углях и породах связан с процессом горообразования. Возникающие при этом процессе деформации пластов приводят к образованию трещин среза, расположенных под углом к направлению действующих сил. Эти трещины являются трещинами экзогенного кливажа, чаще всего они располагаются в виде двух взаимно перпендикулярных систем, которые пересекают пласт под углом к напластованию.

Как правило, определение прочности производится прямыми методами, т.е. путем механического разрушения [54]. Для таких объектов как целики и кровля подземных горных выработок разрушающие методы определения остаточной прочности являются неприемлемыми, поскольку могут привести к катастрофическому обрушению налегающих пород и выходу из строя горного предприятия. Единственным путем решения этой проблемы является разработка неразрушающих геофизических методов, основанных на регрессионных зависимостях между остаточной прочностью и значениями измеряемых геофизических величин.

Учитывая важность проблемы, исследования геомеханики горных пород в натурных условиях и в образцах проводятся и в настоящее время.

В [55] как показали проведенные исследования на Качарском карьере, карьерах Тургайского бокситового рудоуправления и Майкаинского ГОКа, при использовании в качестве исходных данных для расчетов устойчивости откосов показателей сопротивления пород сдвигу, полученных на основе обратных расчетов оползней в однородном массиве, корректировки их значений путем введения некоторого коэффициента запаса не требуется, поскольку эти показатели в неявном виде учитывают совокупность определенных инженерно-геологических условий и особенностей деформирования горного массива. Однако область надежного их использования зачастую ограничивается условиями оползневого участка, либо ему подобными. Поэтому расши-

рение диапазона применения параметров сопротивления горных пород сдвигу на основе обратных расчетов оползней представляется весьма перспективным.

В [56] динамические свойства горных пород представляют собой основную информацию, с помощью которой можно оценивать устойчивость горных массивов при динамических воздействиях различной интенсивности, например, во время разработки карьеров с помощью взрывов.

В [57] представлены результаты лабораторных экспериментов по определению трещиностойкости и усталостной прочности горных пород. Эксперименты проводились с образцами туфов в режимах статической и циклической нагрузки. Циклическая нагрузка задавалась как в виде последовательности циклов одинаковой амплитуды, так и в виде последовательности, наложенной на восходящий тренд нагрузки. Дополнительно методом сканирующей электронной микроскопии производилось изучение изменения внутренней микроструктуры туфов. Показано, что основной причиной долговременного снижения прочности под нагрузкой является формирование сети нерегулярных межзеренных микротрещин.

В [58] представлен диаграммный метод установления областей устойчивости и неустойчивости двухсвязного массива горных пород с прочностной анизотропией, основанный на фиксации моментов начального «смыкания» зон нарушения сплошности двух протяженных цилиндрических выработок. Проведен количественный анализ нарушенности и устойчивости двухсвязного массива в зависимости от характеристик модельной среды и взаимного положения выработок.

В [59] исследовано обобщенное выражение для описания критического состояния горных пород в окрестности тоннеля. Массив горных пород неоднороден, его механические параметры описываются вероятностными распределениями. С учетом параметров этих распределений предложена упрощенная формула для оценки прочности массива. Модельные расчеты выполнены для крупного протяженного тоннеля скоростной автотрассы. Результаты рас-

четов сопоставлены с результатами, полученными с использованием традиционного метода Монте-Карло. Относительное расхождение между оценками, проведенными двумя способами, не превысило 0,388 %.

В [60] сформулирован инвариантный деформационно-энтропийный критерий прочности горных пород, устойчивости горных выработок. Критическая энтропия и критическая деформация характеризуют состояние геомеханической системы в момент ее гибели.

1.3 Методы неразрушающего геофизического контроля и прогноза прочности горных пород

Весомый вклад в развитие геофизических методов прогнозирования строения, свойств, состояния, прочности горных пород внесли такие ученые, как Блохин Д.И. [61, 62], Вознесенский А.С. [63], Вильямов С.В. [64], Загорский Л.С. [65], Захаров В.Н. [66], Исаев Ю.С. [67], Лавров А.В. [68], Лебедев А.В. [69], Леонтьев А.В. [70], Набатов В.В. [71], Нарышкин Д.А. [72], Николенько П.В. [73], Новиков Е.А. [74], Опарин В.Н. [75], Пономарев А.В. [76], Рубан А.Д. [77], Соболев Г.А. [78], Шкурятник В.Л. [79], Яковлев Д.В. [80], Ямщиков В.С. [81, 82] и другие.

В [83] исследования, проведенные на апатитовых рудниках Кольского полуострова в течение последних 5 лет, позволяют положительно оценить возможности геофизического комплекса, состоящего из сейсмического и ультразвукового методов при решении ряда практических задач, связанных с оперативной оценкой и мониторингом геомеханического пространства рудников в процессе их отработки. Размеры контролируемых участков сопоставимы с размерами очистных пространств при подэтажной системе отработки или размерами технологических блоков при этажной системе отработки и составляют порядка 50-300 м в поперечнике. Создание долговременных полигонов позволит выполнять инструментальный мониторинг опасных участков с необходимой временной периодичностью, которая определяется конкретным геомеханическим состоянием данного участка массива. Практически разработана и прошла всестороннюю апробацию методика наблюдений и

оценок геомеханического состояния массива, позволяющая с высокой надежностью и точностью (по месту) локализовать потенциально опасные по напряженному и нарушенному состоянию участки в пределах рабочих горизонтов рудника, оперативно оценивать их реальную опасность и на основе совокупности экспертных оценок рекомендовать конкретные профилактические мероприятия по приведению этих участков в безопасное состояние. Комплекс и методику контроля можно рекомендовать для широкого внедрения на всех горизонтах, которые в настоящее время отрабатываются или подготавливаются к отработке.

На основании известных данных по моделированию, рассмотренных в [84], лабораторных измерений и теоретического рассмотрения показывается, что преобладающий механизм затухания упругих волн в твердых горных породах в сейсмоакустическом диапазоне частот связан с рассеянием на неоднородностях типа трещин и границ зерен. Поэтому по измеренному затуханию проходящих волн можно оценивать на качественном уровне трещинную пустотность пород типа известняков и доломитов. Приводится приближенная формула для такого определения

В [85] рассматриваются условия комплексного мониторинга процессов деформирования геоматериалов с использованием записей акустической эмиссии и параметров инфракрасного излучения с поверхности образцов. Описываются выполняемые с целью выбора наиболее информативных режимов деформирования эксперименты по исследованию особенностей изменений во времени интенсивности теплового излучения при различных скоростях приложения нагрузки.

В [86] рассматривается электрическая (точнее, электромагнитная) разведка, сокращенно электроразведка – это раздел геофизических методов исследования, называемых также разведочной или прикладной геофизикой. Она предназначена для изучения геосфер Земли и геологической среды, поисков и разведки полезных ископаемых на основе изучения различных естественных и искусственных электромагнитных полей. Предметом исследова-

ния электроразведки является литосфера, и прежде всего ее верхняя оболочка – земная кора. Задачи электроразведки: региональные исследования земной коры на суше и под дном океанов (глубинные, структурные и картировочно-поисковые); поисково-разведочные работы на нефть и газ, рудные, нерудные полезные ископаемые и уголь; изучение геологической среды с инженерно-геологическими, гидрогеологическими, мерзлотно-гляциологическими, почвенно-мелиоративными, техногенными и другими целями.

Электроразведка основана на дифференциации горных пород по электромагнитным свойствам.

В [87] проведено экспериментальное исследование влияния трещиновидных дефектов структуры геоматериала на параметры его термоакустической эмиссии в низкотемпературной области. Выявлено, что указанные дефекты приводят к формированию в определенном температурном диапазоне экстремума огибающей активности термоакустической эмиссии, причем пиковое значение этого экстремума не менее чем в полтора раза превосходит значения, ограничивающие экстремальную область. Показана возможность определения, преобладающего в образце геоматериала вида трещиновидных дефектов по взаимному соотношению характера суммарного счета и огибающей активности термоакустической эмиссии этого геоматериала.

В [88] рассматривается проведенное физическое моделирование деформирования твердеющего композита с наполнителем в виде кварцевого зерна различного класса крупности, позволившее установить взаимосвязь между параметрами акустической эмиссии, возникающей при нагревании геоматериала, размерами его минерального зерна и прочностью. Выявлены аномалии активности акустической эмиссии в определенных температурных диапазонах, одна из которых коррелирует с прочностью, а вторая – со средним размером минерального зерна. Полученная экспериментальная зависимость прочности от указанного размера сопоставлена с теоретической моделью Холла – Петча.

Рассмотренные в [89] возможности лазерной ультразвуковой спектроскопии при исследовании горных пород заключаются в: визуализации сети микротрещин на основе компьютерной обработки высокочастотных ультразвуковых сигналов, отраженных и рассеянных при сканировании образцов; выявлении зависимостей скоростей распространения упругих волн различного типа от частоты и их использовании для изучения свойств и структурных неоднородностей геоматериала; повышении помехоустойчивости ультразвуковых измерений за счет исключения влияния контактных условий при изучении, а также применении зондирующих сигналов с большой базой в сочетании с оптимальными методами их обработки.

Из всего многообразия геофизических методов исследования горных пород особо выделяются акустические методы благодаря своему широкому использованию. Взаимосвязям акустических и механических свойств горных пород посвящено значительное количество публикаций. Однако они касаются связей прочности и кинематических характеристик упругих волн. В то же время связям акустической добротности с пределом прочности горных пород уделялось недостаточно внимания, либо такие связи не исследованы вообще.

К настоящему времени вопросу применения акустического метода для изучения прочностных характеристик горных пород посвящено несколько работ, основанных на установлении эмпирических корреляционных зависимостей между прочностью пород на сжатие и одним из акустических показателей.

На основании анализа этих работ предложено два способа разработки метода изучения прочностных характеристик:

- 1) установление приближенной связи для каждого типа горных пород непосредственно между прочностью и скоростью или затуханием ультразвука, что связано с накоплением экспериментальных данных для построения корреляционных зависимостей;

- 2) установление зависимости между группой акустических свойств и прочностными характеристиками с учетом упругих и пластических деформаций.

ций горных пород, что связано с отысканием физической взаимосвязи между этими двумя видами свойств.

Установление взаимосвязи между пределом прочности на сжатие горных пород и одним из акустических показателей (скоростью, коэффициентом затухания, акустической жесткостью) путем прямой корреляции основано на предположении, что прочность горных пород определяется или только упругими деформациями, или только дефектностью структуры пород (микротрещиноватостью, пористостью) [90].

В [91] описывается, что различные полевые методы определения прочностных свойств горных пород (временного сопротивления сжатию, твердости и др.) не позволяют пока дать полную объективную характеристику массива, так как замеры производятся в единичных точках.

Большие возможности по коренному совершенствованию полевых методов открываются с применением ультразвука. В настоящее время ведутся поисковые работы по установлению взаимосвязей ультразвуковых характеристик (скорости ультразвука, коэффициента поглощения, акустической жесткости) с прочностными свойствами горных пород. Однако следует заметить, что разрабатываемые способы определения прочностных свойств основаны пока на установлении зависимости их от какой-либо одной ультразвуковой характеристики, что не позволяет в настоящее время производить изучение с большой точностью. Более объективные значения прочностных свойств горных пород могут быть получены только при одновременном учете всех ультразвуковых характеристик.

Ультразвуковые методы изучения прочностных свойств в массиве обладают рядом преимуществ по сравнению с другими известными методами, так как позволяют довольно быстро исследовать большую поверхность массива с учетом степени трещиноватости. При этом они не требуют отборки и обработки образцов для проведения измерений; результат в виде одной из ультразвуковых характеристик получается мгновенно.

В [92] экспериментально установлен эффект аномального затухания акустических волн в горных породах, вызванного вариацией амплитуды. Скорости упругих волн увеличиваются, а декремент затухания уменьшается с ростом амплитуды. Затухание по сравнению со скоростью волн более чувствительно к изменению амплитуды. Полученные результаты могут быть использованы для диагностики состояния трещиноватых и пористых пород.

В [93] обсуждаются особенности способа ультразвукового определения упругих модулей горных пород. Исследовано влияние размера неоднородностей структуры горных пород на результаты определений, а также влияние анизотропии. На примере испытаний пяти типов магматических пород показано влияние малой добротности образцов на величины эффективных модулей. Испытания проводились в диапазоне частот ультразвуковых колебаний от 0.01 до 0.1 МГц

Для большинства проводимых исследований характерным является то, что изучаются только акустические свойства [94, 76, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103]. Совместные исследования акустических и механических свойств ограничиваются, как правило, взаимосвязями упругих и акустических свойств, прочностных свойств и скоростей упругих волн [104], а также взаимосвязями деформационных характеристик горных пород и скоростей упругих волн [105, 106].

Известно также применение акустических методов и для решения других задач [107].

В [108] рассматриваются исследования скоростей продольных волн, которые могут дать полезную информацию о развитии повреждений в горных породах. Измерения скоростей продольных волн могут быть использованы для контроля развития поврежденности во время лабораторных испытаний одноосных деформаций и длительных испытаний на ползучесть. Результаты показывают, что во время испытаний на ползучесть, измерение скорости продольных волн позволяет различить три различные фазы ползучести, отличающиеся между собой. Во время первичной ползучести скорость про-

дольных волн возрастает, потому что поры закрываются. Фаза вторичной ползучести характеризуется постоянной скоростью деформирования, которая идентифицируется с помощью линейного снижения скорости волны, эта тенденция снижения ускоряется во время третьей фазы ползучести.

В [109] экспериментально исследованы и теоретически обоснованы закономерности низкотемпературной термостимулированной акустической эмиссии (ТЭ), возникающей в образцах горных пород различных генотипов и пористости при одноосном механическом нагружении. Показано качественное соответствие этих закономерностей для магматических, метаморфических и осадочных горных пород. Проведено сопоставление границ стадий деформирования испытываемых горных пород, определенных по традиционной методике, основанной на деформационных измерениях при механическом нагружении образцов, и измерениях по предлагаемому ТАЭ методу. Дано объяснение механизмов, лежащих в основе рассмотренных термоакустоэмиссионных явлений, связанных с переходом объектов контроля из одной стадии деформирования в другую в зависимости от исходной дефектно-пористой структуры геоматериала. Показана возможность использования метода ТАЭ для контроля действующих в массиве напряжений и их пространственно-временной динамики.

В [110] отмечается, что среди различных геофизических методов исследования скважин широкое распространение получил акустический каротаж. В большинстве геофизических служб он вошел в стандартный комплекс каротажных исследований, поскольку несет объективную физическую информацию об акустических параметрах вскрытых скважиной горных пород. В отличие от других каротажных параметров, которые являются по сути опосредованными, каротажные скорости представляют собой те же физические величины, которые измеряются и на образцах в лабораторных условиях. Однако не всегда можно измерить параметры горных пород в лаборатории, так как много зависит от внешних условий, в которых проявляются в той или иной степени определенные свойства материала. Между тем, часто необхо-

димо знать свойства горных пород именно в условиях залегания. Данная работа посвящена методам определения акустических параметров по данным акустического каротажа в одном из классов горных пород - в солях. Знание строения и свойств соляной толщи может быть полезно при различных шахтных и инженерных работах. Геофизические исследования могут быть направлены и на контроль целостности соляного массива при совместной разработке месторождений солей и нефти. Кроме того, соли являются таким геологическим объектом, в котором по причине малости затухания ярче проявляются различного рода аномалии. С этой точки зрения данная работа носит и методический характер

В [111] тяжелые габбро подвергались лабораторным испытаниям. Образцы были медленно нагреты до максимальной температуры в 1000°C . После тепловой нагрузки на образцах провели испытания на одноосное сжатие. Наблюдалось резкое снижение предела прочности и модуля упругости. Термическое повреждение горных пород также подчеркивалось путем измерения скоростей упругих волн и регистрации акустической эмиссии в процессе испытаний. Микромеханизмы деградации горных пород были исследованы с помощью анализа тонкого среза после каждого этапа теплового нагружения. Было установлено, что существует критическая температура, выше которой происходят коренные изменения в механических свойствах горных пород.

В [69] приведены результаты исследований акустической добротности Q в материалах с высокой концентрацией внутренних дефектов во взаимосвязи с напряженным состоянием. В [112] рассмотрены взаимосвязи скоростей и затухания упругих волн. В [113] производится сопоставление результатов определений акустической добротности по коде S -волн с данными о возрасте, тектонике и уровне сейсмической активности рассматриваемых структур; было показано, что добротность зависит от современной тектонической активности структур и в меньшей степени от возраста коры. Акустическая добротность может быть определена по данным георадарных исследований, основанная на положении о том, что при прохождении энергии в по-

родах высокой добротности ее большая часть не испытывает потерь и, наоборот, в породах низкой добротности распространение энергии сопровождается большими потерями [114]. В [115] акустическая добротность определяется частотным методом для различных блоков мраморизованного известняка. Мера трещиноватости характеризуется различными значениями эффективной и истинной скоростей упругих волн в блоках.

Однако связи акустической добротности с остаточной прочностью не рассматриваются.

1.4 Недостатки существующих подходов и постановка задачи разработки метода неразрушающего акустического контроля и прогноза остаточной прочности горных пород

Как показал проведенный обзор публикаций, проблема определения остаточной прочности горных пород без механических испытаний является с одной стороны, важной и, с другой стороны, еще далекой от своего решения. Существующие методы определения остаточной прочности горных пород предусматривают их разрушение, что неприменимо, например, когда речь идет об устойчивости таких элементов систем разработки, как целики и кровля в подземных рудниках и шахтах. Разрушение даже одного из этих элементов или части его может привести к катастрофическим последствиям. В настоящее время не существует надежных методов оценки и прогноза остаточной прочности горных пород или конструкций. Без решения этой задачи невозможно разработать неразрушающие методы оценки также и ресурса подземных сооружений. Необходима разработка таких технических решений, которые позволили бы определять остаточную прочность горных пород, а впоследствии и ресурс подземных сооружений без их разрушения. Важно также исследовать масштабный фактор. В [116] с позиций кинетической теории прочности твердых тел исследован механизм действия масштабного фактора при разрушении горных пород. Выявлено два механизма действия масштабного фактора: дефектно-статистический при вязком разрушении горных пород и термоактивационный при хрупкой их дезинтеграции. Кроме того,

отдельно должно быть исследовано влияние масштабных факторов для того, чтобы можно было перенести результаты из лабораторных экспериментов на образцах на натуру [117].

Одним из путей решения выше проблемы может стать разработка метода оценки остаточной прочности горных пород на основе установления зависимости между этой величиной и акустической добротностью. В основе этого утверждения лежит тот факт, что обе эти величины зависят от нарушения горных пород. С увеличением нарушения уменьшается как прочность, так и добротность, и измерение последней позволит оценить остаточную прочность.

Как показал проведенный обзор литературных источников, взаимосвязям прочностных свойств горных пород и акустической добротности Q уделяется недостаточно внимания. В то же время такие взаимосвязи важны для прогнозирования предела прочности пород по их добротности. По сравнению со скоростями упругих волн при оценке нарушения внутренней структуры пород акустическая добротность Q является более чувствительным параметром. Такие зависимости будут полезны при прогнозировании землетрясений и проектировании гидроразрыва пластов. Кроме того, измерение добротности позволит определять остаточную прочность и ресурс конструктивных элементов систем разработки на горных предприятиях без их разрушения, что важно для обеспечения эффективной и безопасной добычи полезных ископаемых и сохранности окружающей среды.

Интерес представляют зависимости акустической добротности и остаточной прочности горных пород при их изменении во времени. Однако такие испытания являются чрезмерно длительными и их результаты могут потерять практический смысл. В данной работе рассматриваются зависимости акустической добротности и остаточной прочности при внесении различной поврежденности путем циклических усталостных нагружений образцов горных пород различных типов. При таких нагружениях меняется как добротность, так и остаточная прочность, что позволило получить регрессионные взаимо-

связи между ними. Они найдут свое применение на практике для оценки остаточной прочности и ресурса различных конструкций и сооружений путем неразрушающих измерений их акустической добротности.

Целью данной работы является разработка метода оценки остаточной прочности горных пород на основе связи этой величины с акустической добротностью. Для достижения поставленной цели в работе предполагается решение следующих задач.

1. Разработка методик получения зависимостей между остаточной прочностью и акустической добротностью горных пород в лабораторных условиях.

2. Установление зависимостей между остаточной прочностью и акустической добротностью горных пород различных типов при внесении повреждений в лабораторных условиях.

3. Установление влияния вида напряженного состояния и масштабного фактора на зависимости между прочностными свойствами и акустической добротностью горных пород.

4. Обоснование и разработка подхода к оценке остаточной прочности горных пород в массиве на основе зависимости между их остаточной прочностью и акустической добротностью.

2 УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ МЕЖДУ АКУСТИЧЕСКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ И ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ НАРУШЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВАНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1 Основная идея и методика лабораторных экспериментов по определению акустических свойств и остаточной прочности

Основной идеей экспериментов является установление взаимосвязей между акустической добротностью и остаточной прочностью горных пород при различной степени поврежденности, вносимой нагреванием и усталостными механическими нагружениями образцов. Такие взаимосвязи важны для прогнозирования предела прочности пород по их добротности. По сравнению со скоростями упругих волн при оценке нарушенности внутренней структуры пород акустическая добротность Q является более чувствительным параметром. Такие взаимосвязи будут полезны при определении ресурса сооружений, прогнозировании землетрясений и проектировании гидроразрыва пластов.

Исследование взаимосвязей между остаточной прочностью и акустической добротностью горных пород производилось в следующей последовательности.

1. Для получения одной кривой взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью $\sigma^0(Q)$ отбиралась группа образцов в количестве 10-12 штук. Для каждой группы образцов производились первоначальные измерения добротности Q в исходном состоянии.

2. Определялась начальная прочность усреднением по 3-5 образцам.

3. В диапазоне нагрузок от 2-5 % до максимального уровня, составляющего часть предела прочности σ_{max} и задаваемого заранее из условий эксперимента, производилось усталостное циклическое нагружение оставшихся образцов. Количество циклов N было индивидуальным для каждого образца и подбиралось эмпирически на основе пробных нагружений. Количество усталостных нагружений для образцов различных пород варьировалось, как правило, в диапазоне от 5 до 200.

4. После циклического нагружения производилось вторичное измерение добротности Q и определение остаточной прочности σ каждого образца путем его однократного нагружения до разрушения.

5. По полученным данным на основе испытаний группы образцов строились графики зависимостей $Q(N)$, $\sigma^0(N)$ и устанавливалась регрессионная взаимосвязь $\sigma^0(Q)$. Взаимосвязь $\sigma^0(Q)$ являлась основным результатом исследований, а другие носили вспомогательный характер.

Экспериментальные исследования включают в себя два вида исследований: механические и акустические.

2.2 Методика механических испытаний

Как показано выше, механические испытания включают в себя определение начальной прочности горных пород в образцах путем их однократного нагружения до разрушения, усталостное циклическое нагружение оставшихся образцов различным количеством циклов нагрузка-разгрузка и определение остаточной прочности после циклических усталостных нагружений. Прочностные и усталостные испытания могут быть проведены как на одной испытательной машине, так и на разных. В данном случае испытания проводились на универсальных тестовых машинах Instron 5569 и Instron 300 DX (рис. 2.1), технические характеристики которых приведены в табл. 2.1 и 2.2 соответственно. Для управления этими машинами используется программное обеспечение Bluehill.

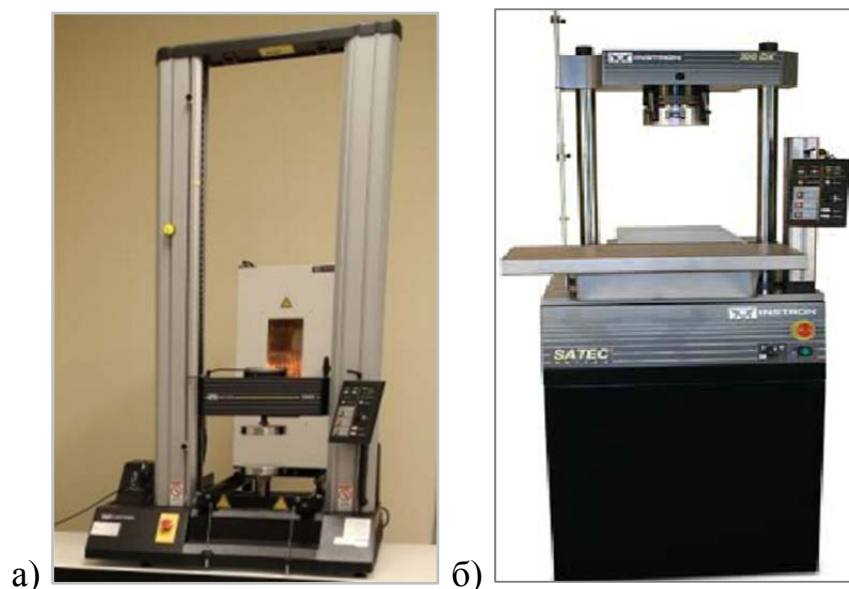


Рис. 2.1 Внешний вид универсальных тестовых машин Instron 5569 (а) и Instron 300 DX серии SATEC (б)

Таблица 2.1. Основные технические характеристики универсальной тестовой машины Instron 5569

Наибольшая предельная нагрузка, кН					50
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений предельной нагрузки, %					$\pm 0,5$
Максимальная скорость перемещения подвижной траверсы, мм/мин					500
Пределы допускаемой относительной погрешности регулировки скорости траверсы					$\pm 0,1$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности датчика перемещения, мм					$\pm 0,015$
Условия эксплуатации:					
- температура окружающей среды, °C					+10 до +38
- относительная влажность, %					10-90
Модификация	Габаритные размеры, мм (вхшхг)	Масса, кг	Потребляемая мощность, Вт	Электрическое питание, В	Максимальная высота раб. пространства, мм
5569	1597x909x700	240	700	220	1205

Таблица 2.2. Основные технические характеристики универсальной тестовой машины Instron 300 DX

Наибольшая предельная нагрузка, кН					300
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений предельной нагрузки, %					$\pm 0,5$
Максимальная скорость перемещения подвижного поршня, мм/мин					76
Пределы допускаемой относительной погрешности регулировки скорости подвижного поршня, %					$\pm 0,25$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности перемещения траверсы, мм					$\pm 0,013$
Условия эксплуатации:					
- температура окружающей среды, °C					+10 до +38
- относительная влажность, %					10-90
Модификация	Габаритные размеры, мм (вхшхг)	Масса, кг	Потребляемая мощность, Вт	Электрическое питание, В	Максимальная высота раб. пространства, мм
300DX	2356x675x675	1000	2500	220	889

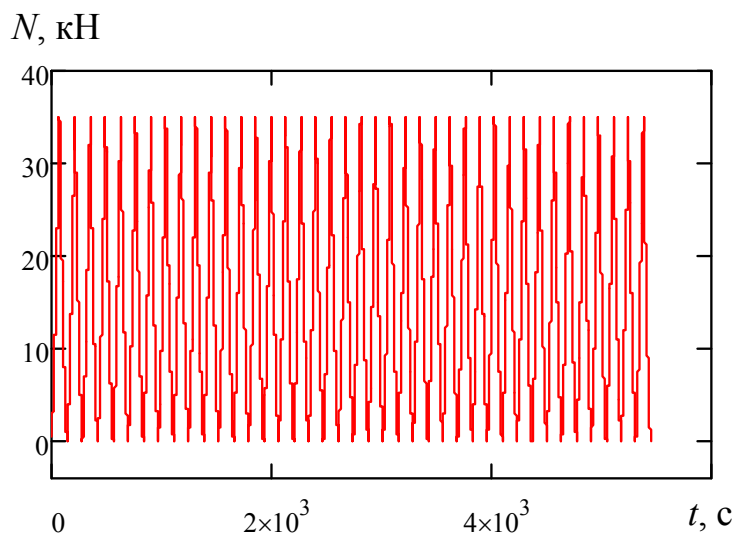


Рис. 2.2. Пример усталостных циклических нагружений образцов гипса на растяжение

Количество циклов нагружения подбиралось для каждой породы индивидуально. Время нагружения равно времени сброса нагрузки. Нагружение производилось со скоростью 30 кН/мин, поэтому время нагружения зависело от величины прочности образца. Пример изменения нагрузки при усталостных циклических испытаниях образцов представлен на рис. 2.2.

2.3 Методика акустических испытаний

Под акустической добротностью понимается параметр колебательной системы, определяющий ширину резонанса и характеризующий, во сколько раз запасы энергии в системе больше, чем потери энергии за один период колебаний. В [118] Акустическая добротность – количественная характеристика резонансных свойств колебательных систем, указывающая, во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний при резонансе превышает амплитуду вынужденных колебаний на частоте много ниже резонансной при одинаковой амплитуде вынуждающей силы.

Акустические измерения включали в себя определение добротностей. При проведении экспериментов были опробованы три методики определения акустической добротности Q .

1. Через пространственное затухание, определяемое в 2 точках пространства по формуле

$$Q = \frac{\pi f_0}{\delta_s v} = \frac{\pi f_0 (x_2 - x_1)}{\ln \left[\frac{p(x_1)}{p(x_2)} \right] v}, \quad (2.1)$$

где $\delta_s = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \left[\frac{p(x_1)}{p(x_2)} \right]$ – пространственный коэффициент затухания (поглощения) упругих волн; $x_1, x_2, p(x_1), p(x_2)$ – расстояния от источника упругих волн до точек измерения и соответствующие амплитуды сигналов; v – скорость распространения упругих волн; f_0 – частота регистрируемых колебаний. При измерениях по этой методике необходимо либо брать два образца разной длины, либо один образец, от которого отпиливается часть, что неудобно и вносит определенные погрешности в результаты.

2. Путем измерения коэффициента затухания колебаний в одной точке, возбуждаемых ударом

$$Q = \frac{\pi f_0}{\delta_t}, \quad (2.2)$$

где δ_t – временной коэффициент затухания свободных колебаний; f_0 – частота регистрируемых колебаний.

3. Методом резонансной акустической спектроскопии путем измерения резонансной частоты и ширины полосы частот вблизи резонанса при возбуждении образца гармоническим сигналом по формуле

$$Q = \frac{f_1}{f_{\max} - f_{\min}}, \quad (2.3)$$

где f_1 – резонансная частота, определяется по максимуму амплитуды первой гармоники сигнала, возникающего при возбуждении образца; f_{\max}, f_{\min} – верхняя и нижняя частоты полосы пропускания сигнала на уровне $1/\sqrt{2}$ от максимального значения амплитуды при резонансе.

Ориентировочное значение резонансной частоты определяется через предварительно измеренное значение скорости

$$f_1 = \frac{v}{2h},$$

где v – скорость распространения упругих продольных волн; h – высота образца. Затем это значение уточняется уже при исследовании образца и определении добротности.

К достоинствам этой методики следует отнести возможность проведения измерений на одном образце, стабильность показаний. Необходимым условием является использование высокостабильного генератора. Этому условию отвечают современные перестраиваемые генераторы с кварцевой стабилизацией частоты, поддерживающие ее заданное значение при измерениях в области резонанса.

Необходимым условием всех перечисленных выше вариантов измерений является высокая собственная добротность преобразователей, что особенно необходимо при измерениях на высокодобротных породах, как, например, долериты и габбро.

После практической оценки всех вариантов с учетом технологичности, удобства проведения измерений и стабильности получаемых результатов предпочтение было отдано третьей методике определения акустической добротности, хотя другие также были использованы.

Исследование образцов производилось с помощью цифровых генератора SFG-2110 и осциллографа GDS-71022. Схема измерений и установка для их реализации представлены на рис. 2.3.

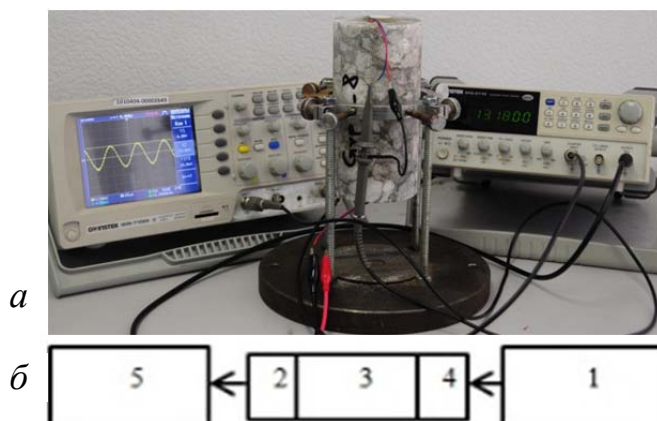


Рис. 2.3 Установка (а) и схема измерения (б) акустической добротности: 1 – генератор GW INSTEK SFG-2110, 2, 4 – пьезопластины, 3 – образец, 5 – осциллограф цифровой GW INSTEK GDS-71022

2.4 Влияние преобразователей на величину акустических добротностей образцов горных пород при их исследовании методом акустической резонансной спектроскопии

2.4.1 Резонансные свойства и АЧХ образца без акустических преобразователей

Расчетная схема и постановка задачи

Было исследовано влияние преобразователей на акустическую добротность образцов горных пород. Исследования проводились с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов.

Модель представляет собой цилиндр диаметром 30 мм и высотой 60 мм. Для определенности рассматривается образец гипсосодержащих пород Новомосковского месторождения Тульской обл. Упругие свойства определены из ультразвуковых измерений, плотность – через взвешивание и геомет-

рический объем. Модуль упругости $E = 35,2$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.08$, плотность $\rho = 2272$ кг/м³. Коэффициент потерь принят равным $\eta = 0.01$, что соответствует акустической добротности $Q = 100$ [119].

Заметим, что для реальных низкодобротных пород, образцы которых не были подвергнуты механическим испытаниям, получены значения добротностей, лежащих в диапазоне от 15-20 до 100-120 [120, 121, 122].

На первом этапе считалось, что все стороны образца свободны. Рассчитывались собственные частоты образца, устанавливался вид колебаний, рассчитывались амплитудно-частотные характеристики в области соответствующих резонансных частот, по ним определялась добротность, значения которой сравниваются с Q , и по их разности оценивалась точность моделирования. Моделирование осуществлялось в среде COMSOL Multiphysics [123], позволяющей рассчитывать собственные частоты моделей по методу А.Н. Крылова с учетом демпфирования, а также частотный отклик на гармоническое воздействие, представляющий собой амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) исследуемой системы.

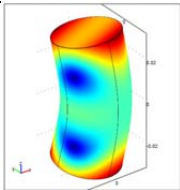
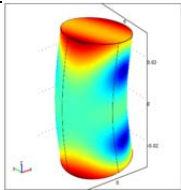
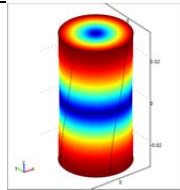
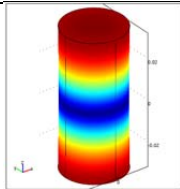
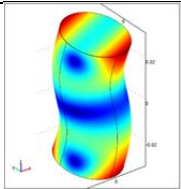
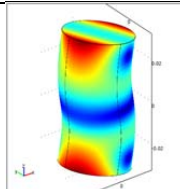
При расчете собственных частот задаются частота, в окрестностях которой будут рассчитаны резонансные частоты, и их количество. При постобработке для каждой частоты может быть получен чертеж формы, которую приобретает образец на данной моде. Приближенный расчет основной частоты осуществляется по формуле $f_1 = C_p/2d$, где f_1 – частота, соответствующая резонансу на низшей частоте на продольных волнах, C_p – скорость распространения упругих продольных P -волн, d – высота образца. Для реального образца при ультразвуковых измерениях получены значения продольной $C_p = 3700$ м/с и поперечной $C_s = 2500$ м/с упругих волн. Расчет по вышеуказанной формуле дает значение $f_1 = 30830$ Гц.

Результаты расчета

Расчет производился с разбивкой по сетке из 3364 элементов. Моделирование и расчет собственных частот в области f_1 дает значения, приведен-

ные в табл. 2.3. В этой же таблице приведены данные по виду (моду) колебаний и их форме. Цветом или яркостью отмечены суммарные деформации.

Таблица 2.3. Частоты, формы и виды колебаний свободного образца

f, Гц	20287,32	20287,44	22351,28
Форма			
Вид	Изгибные	Изгибные	Кручение
f, Гц	32809,06	38604,22	38604,90
Форма			
Вид	Продольные	Изгибные	Изгибные

Для получения АЧХ в системе COMSOL Multiphysics выбирается режим расчета частотного механического отклика. В качестве места съема выходной величины указывается одна из точек модели, в данном случае была выбрана точка на ребре верхнего торца на сопряжении с боковой поверхностью. Минимальная и максимальная границы диапазона частот были заданы равными 32 и 33,5 кГц, в который входит частота продольного резонанса, а шаг расчета составил 20 Гц. Расчет частотного отклика позволил получить кривую амплитудно-частотной характеристики, изображенную на рис. 2.4. Для повышения точности алгоритм обработки предусматривал дополнительную линейную интерполяцию кривой между расчетными точками. Для этой кривой были получены значения частоты максимума $f_m = 32,8$ кГц и полосы частот этой резонансной системы на уровне $A_{max}/\sqrt{2}$, равной $\Delta F = 338$ Гц, что дало значение акустической добротности $Q = 97,0$. Погрешность модель-

ного значения добротности по сравнению закладываемой в расчет в данном случае составила 3%.

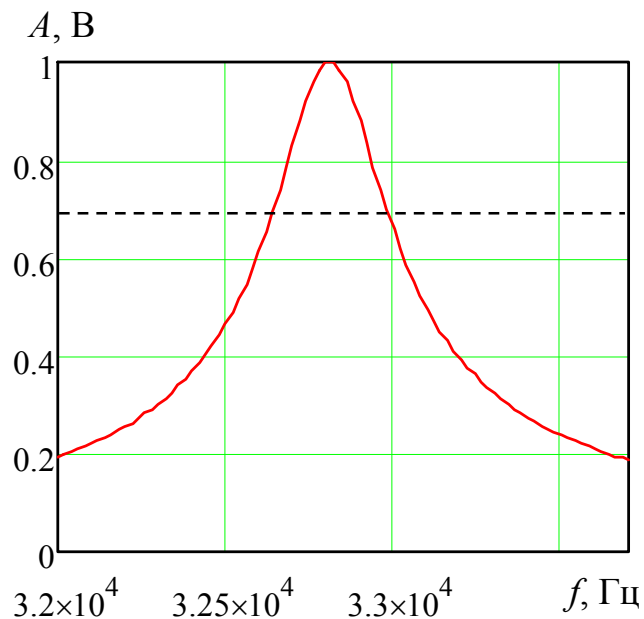


Рис. 2.4. Форма нормированной по максимуму АЧХ образца без преобразователей

Различие значений полученной и закладываемой в расчет акустических (механических) добротностей можно объяснить погрешностями расчета, связанными с методом конечных элементов, используемым для моделирования.

Близость значений акустических добротности, закладываемой в расчет, и полученной в результате моделирования дает основание для использования такой методики с целью анализа влияния преобразователей на значения добротностей, получаемых экспериментальным путем.

2.4.2 Влияние тонких преобразователей поршневого типа при прозвучивании Р-волнами

Расчетная схема и свойства элементов модели

Расчетная скелетная схема образца с тонкими пьезоэлектрическими пластинами толщиной 1 мм каждая на торцах представлена на рис. 2.5. Сам

цилиндрический образец обозначен на ней в виде четырех вертикальных образующих.

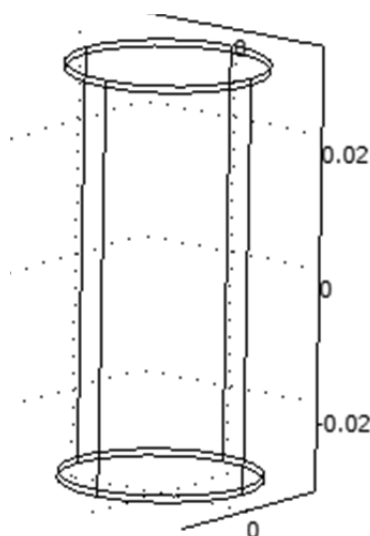


Рис. 2.5 Скелетная схема образца с пьезокерамическими накладками

Расчетные параметры пьезопреобразователей следующие. В качестве материала был выбран широко используемый на практике цирконат-титанат свинца. Для материалов этой группы характерны различные значения механической добротности, значения которой приведены в табл. 2.4, составленной по информации из различных источников [124, 125, 126]. Как следует из данных этой таблицы, для разных типов пьезокерамики добротность может изменяться в диапазоне от 30 до 1300 и выше.

Табл. 2.4. Параметры некоторых пьезоэлектрических материалов

Марка отечественной пьезо-керамики	Зарубежный аналог	Пьезомодуль d_{33} , пКл/Н (в скобках для аналога)	Механическая добротность Q (в скобках для аналога)
ПКР-12	PZT-4	185 (290)	1300 (500)
ПКР-37	PZT-5A	375 (374)	105 (75)
ПКР-7	PZT-5H	610 (593)	80 (65)
ЦТС-19	PZT-5A	340 (374)	70 (75)
ПКР-73	PZT-5H	860 (593)	30 (65)

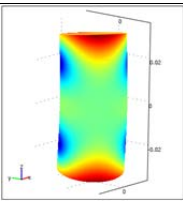
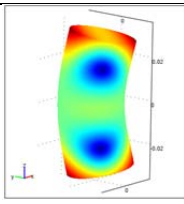
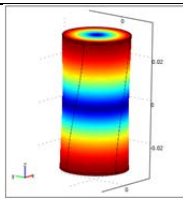
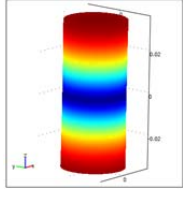
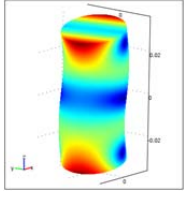
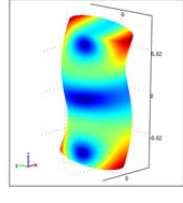
Для наших расчетов для керамики было принято усредненное значение механической добротности $Q = 100$, что соответствует коэффициенту потерь

$\eta = 0,01$. Это значение устанавливается в соответствующем разделе системы COMSOL Multiphysics. Далее для сравнения будут приведены также данные по моделированию с меньшими и большими значениями добротностей пьезоматериалов. Такие же значения потерь и, соответственно, добротности были приняты и для геоматериала.

Результаты расчета

Расчет собственных частот системы с пьезоэлектрическими накладками проводился аналогично предыдущему случаю, т. е. здесь рассматривались чисто механические возбуждение и регистрация колебаний. Результаты расчета приведены в табл. 2.5.

Табл. 2.5. Частоты, формы и виды колебаний образца с тонкими накладками из пьезокерамики

f, Гц	17550,98	17550,99	20147,49
Форма			
Вид	Изгибные	Изгибные	Кручение
f, Гц	29584,18	34872,05	34872,23
Форма			
Вид	Продольные	Изгибные	Изгибные

Как следует из сравнения данных табл. 2.3 и 2.5 частота продольного резонанса сдвинулась вниз по сравнению с колебаниями образца без накладок.

Анализ АЧХ на частоте продольного резонанса

Система COMSOL Multiphysics позволяет пользователю сравнительно простыми средствами моделировать процессы, описываемые различными физическими законами.

Отличие данных расчетов АЧХ от предыдущего случая в том, что здесь рассматривались электрическое возбуждение пьезопреобразователя, расположенного сверху, и регистрация электрического сигнала на преобразователе, расположенном снизу, описанное в [127]. При этом вектор поляризации внутри пьезокерамики направлен снизу вверх, а напряжение прикладывалось к верхней пластине верхнего преобразователя, его нижняя пластина соединена с «землей». Приемный сигнал снимался с нижней пластины нижнего преобразователя, а его верхняя пластина также была соединена с «землей». Т. е. в данном случае происходило преобразование электрического сигнала в упругие волны в образце и последующее их обратное преобразование в электрический сигнал.

При расчете частотного отклика задавались амплитуда электрического гармонического сигнала, равная 100 В, нижняя и верхняя частота в области продольного резонанса. Шаг расчета по частоте был выбран аналогично предыдущему случаю равным 20 Гц.

Расчет частотного отклика дал форму резонансной кривой, приведенную на рис. 2.6.

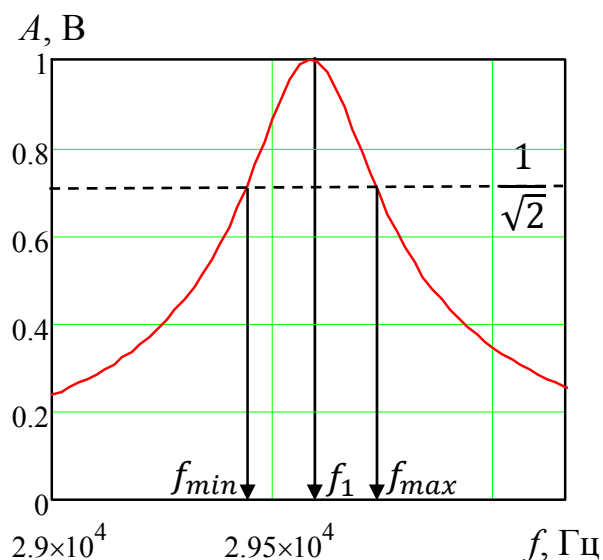


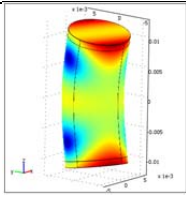
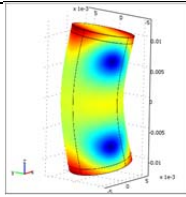
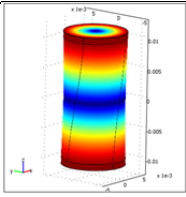
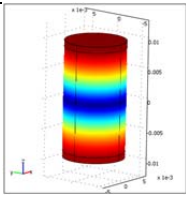
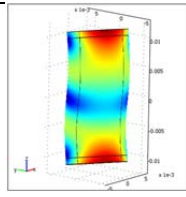
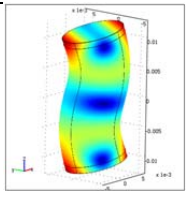
Рис. 2.6 АЧХ образца с тонкими пьезоэлектрическими преобразователями

Для нее $f_1 = 29580$ Гц, $\Delta f = f_{max} - f_{min} = 300$ Гц, $Q = 98,6$. Несмотря на то, что частота резонанса сдвинулась в сторону низких частот, значение акустической добротности близко к тому, которое задавалось при формировании компьютерной модели.

2.4.3 Образец меньшего размера

Проанализируем погрешность при определении акустической добротности образца горной породы меньшего размера диаметром $\varnothing 10$ и высотой 20 мм. При этом толщину преобразователей оставим прежней, уменьшим лишь диаметр в соответствии с диаметром образца. Результаты расчета представлены в табл. 2.6.

Табл. 2.6 Частоты, формы и виды колебаний образца 10x20 с тонкими накладками из пьезокерамики

f, Гц	42998,61	42998,68	50886,80
Форма			
Вид	Изгибные	Изгибные	Кручение
f, Гц	74800,34	90423,36	90425,42
Форма			
Вид	Продольные	Изгибные	Изгибные

Как следует из сравнения табл. 2.4 с табл. 2.1 и 2.3, формы колебаний аналогичные, но для данного случая частоты продольного резонанса выше. Расчет АЧХ, нормированной по максимуму и представленной на рис. 2.7, и определение по ней акустической добротности дает следующие результаты: $f_1 = 74800$ Гц, $\Delta f = 760$ Гц, $Q = 98,4$. Как следует из этого результата, хотя частота максимума увеличилась, добротность все равно осталась близка к 100, погрешность составляет 1,6%.

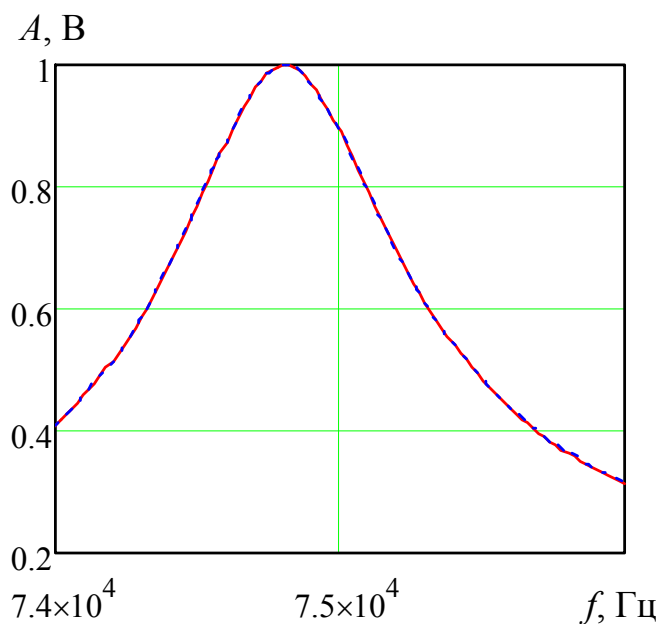


Рис. 2.7 Форма АЧХ при исследовании образца с размерами $\varnothing 10 \times 20$ мм и добротностях пьезокерамики 100 и 1000

Следует отметить также еще одну особенность. На рис. 2.7 представлены две кривые, соответствующие акустической добротности пьезоматериала пластин 100 и 1000. Как следует из графиков, они совпадают, что говорит о слабом влиянии механической добротности материала пьезопластин на форму АЧХ и добротность всей системы. Различие только в том, что абсолютные (ненормированные) значения максимума при добротности преобразователей 100 на 20% ниже, чем при добротности преобразователей 1000.

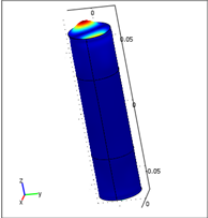
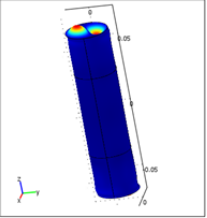
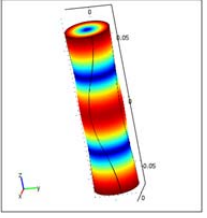
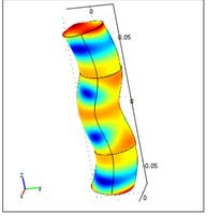
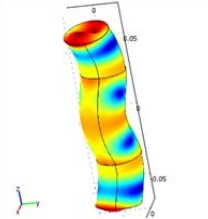
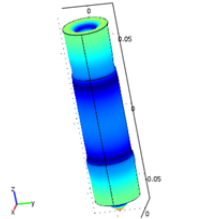
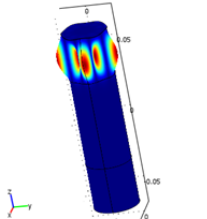
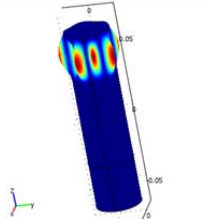
2.3.4 Влияние на акустическую добротность пьезопреобразователей с защитным корпусом

Для защиты пьезопреобразователей от внешних воздействий и размещения электрических разъемов они закрываются кожухом. В этом случае модель представляла собой цилиндр диаметром 30 и высотой 60 мм, на обоих торцах которого размещались пластины преобразователей диаметром 28 и высотой 1 мм и защитные цилиндрические корпуса из стали толщиной 1 мм, внешним диаметром 30 мм и высотой 30 мм.

По данным [128] добротность сталей находится в диапазоне от 900 для инструментальных сталей до 1500 для нержавеющей сталей. Примем $Q=1000$ и, соответственно, коэффициент потерь $\eta = 1/Q = 0,001$.

В таблице 2.7 представлены результаты расчета собственных частот образца с преобразователями, имеющими защитный корпус.

Табл. 2.7. Результаты расчета собственных частот образца породы с преобразователями с защитным корпусом

f, Гц	22122,01	22131,28	22202,42	24870,01
Форма				
Вид	Изгиб торцов крышек	Изгиб торцов крышек	Крутильные	Изгибные
f, Гц	24870,72	29433,17	31452,89	31473,57
Форма				
Вид	Изгибные	Продольные	Продольное сжатие с изгибом крышек	Продольное сжатие крышек с изгибом

Для этого случая мода продольных колебаний соответствует частоте 29433,17 Гц. Построение АЧХ в области этой частоты дает график, представленный на рис. 2.8.

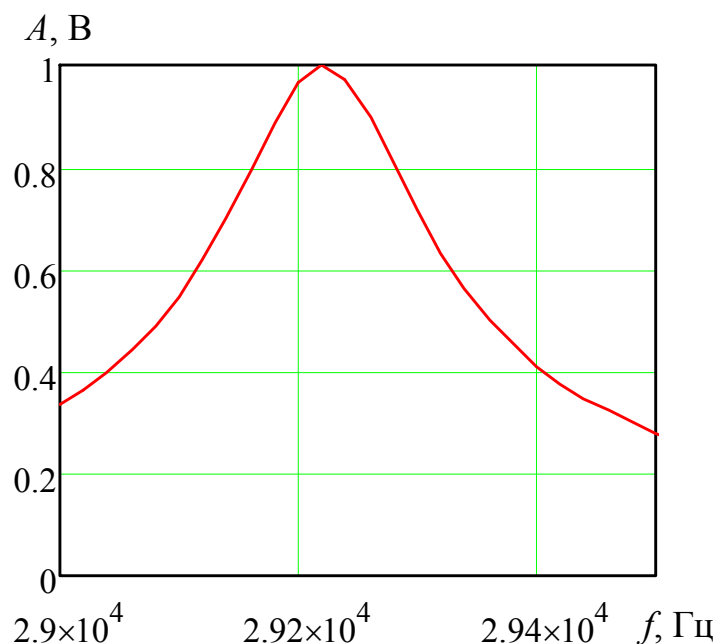


Рис. 2.8 Форма АЧХ для образца с преобразователями, имеющими защитный корпус

Для этого случая расчет дает значения $f_0 = 29220$ Гц, $\Delta f = 178$ Гц, $Q = 164,15$. В этом случае отличие измеренного значения акустической добротности отличается в значительной степени от акустической добротности образца, закладываемой в расчет. Поэтому использование таких преобразователей вносит недопустимые погрешности. Следует заметить, что если в преобразователях приняты меры для акустической развязки пьезопластин от корпуса, то их использование возможно. Для окончательного решения следует сравнить результаты измерений такими преобразователями с результатами измерений с помощью тонких пьезопластин. Их возможно применять, если разница будет находиться в допустимых пределах, по крайней мере не превышать разброс, обусловленный статистическим характером регрессионной зависимости остаточной прочности геоматериала от акустической добротности.

2.5 Зависимость акустической добротности и остаточной прочности осадочных горных пород при термическом воздействии на горные породы

Для внесения повреждений в образцы горных пород использовалась установка, включающая в себя трубчатую печь Nabertherm RT 50/250/11, нагревание в которой осуществлялось с управлением от программируемого контроллера Р 320, позволяющая нагревать образцы с заданной скоростью до определенной величины. Данная установка использовалась в экспериментах, в которых были отработаны различные режимы нагревания, отличающиеся скоростями увеличения температуры. Нагревание с меньшей скоростью приводило к химическим преобразованиям минералов, слагающих породу. Нагревание с большей скоростью приводило к появлению термических напряжений, вызывающих интенсивное образование трещин. Кроме того, для правильной интерпретации результатов нагревания с различной скоростью производилось компьютерное моделирование напряжений, возникающих в образцах в форме параллелепипеда [129, 130].

Термическое нагружение на каждой ступени осуществлялось для отдельной пары образцов, т. е. количество пар образцов равнялось количеству ступеней нагревания, включая исходную температуру. При такой методике в большей степени будет сказываться разброс свойств отдельных экземпляров образцов. Поэтому отбор пар образцов осуществлялся по значениям скорости ультразвука, не выходящим за 5-процентные границы для всех испытываемых образцов. Для определения затухания упругих волн проводились УЗ испытания до и после разрушающего воздействия. По этим данным рассчитывалась акустическая добротность Q при помощи первой методики. После нагревания каждой пары образцов до определенных температур T устанавливались зависимости акустической добротности $Q(T)$ и остаточной прочности $\sigma_{сж}^0(T)$ от температуры нагревания для каждой ступени разрушающего воздействия, по которым строилась зависимость $Q(T)$.

Достоинство данной методики в том, что известны промежуточные значения остаточной прочности $\sigma_{сж}^0$, определенные прямыми измерениями на каждой ступени нагружения.

Недостатком такой методики является большой разброс показаний, обусловленный тем, что испытываются разные экземпляры пар образцов, а также большее количество образцов. При подготовке эксперимента необходим тщательный отбор образцов с почти одинаковыми характеристиками, осуществляемый по УЗ испытаниям до внесения искусственных повреждений. На практике удается получить отбор образцов со скоростями, разброс которых не превышает 2-5%.

Конечной целью данных исследований является установление взаимосвязей между остаточной прочностью горных пород и их акустической добротностью. На рис. 6 представлена такая зависимость 1, полученная по второй методике исследований. Экспериментальные точки аппроксимированы экспонентой вида

$$\sigma_{сж}^0 = 0,001076e^{-0,675Q} + 10,547 \text{ МПа}$$

при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,973$, ее график 2 также приведен на рис. 2.9.

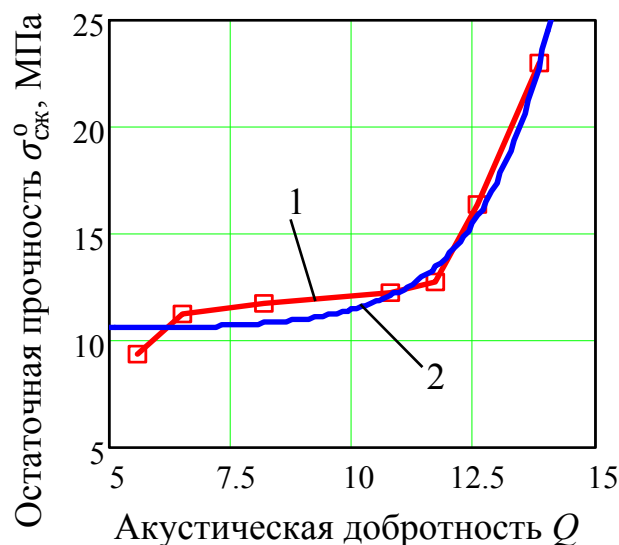


Рис. 2.9 Графики взаимосвязи акустической добротности Q и остаточной прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}^0$ (1) и сглаживающей экспоненциальной функции (2)

Полученные зависимости дают возможность следить во времени за изменениями акустической добротности горных пород и по ее изменениям оценивать их остаточную прочность. Экстраполяция такой зависимости по времени позволит оценить ресурс конструкции и спрогнозировать разрушение конструктивных элементов систем разработки уже на ранних стадиях их существования [131].

2.6 Зависимость акустической добротности и остаточной прочности осадочных горных пород от количества циклов усталостного нагружения осадочных горных пород (известняк и травертин)

Испытывались две группы образцов известняка месторождения Тигинское (Россия). При разбивке на группы для получения более стабильных результатов была учтена закономерность, согласно которой большему пределу прочности соответствуют большие значения скоростей упругих волн. В первую группу, испытанную затем при максимальном значении циклической нагрузки до 0,3 от разрушающей, были отобраны образцы с меньшими значениями скоростей, а во вторую, испытанную при нагрузке до 0,5 от разрушающей, – с большими значениями скоростей распространения упругих волн, что соответствовало меньшим и большим прогнозным значениям остаточной прочности.

Количество циклов нагрузка-разгрузка N в первой группе составляло 0, 10, 20, 30, 40. При большем N образцы разрушались уже в процессе усталостного нагружения. Для образцов второй группы N было равно соответственно 0, 10, 15, 20, 30 циклов нагрузка-разгрузка. Несмотря на то, что в эту группу были отобраны образцы с большими значениями прогнозного остаточной прочности при одноосном сжатии, образцы разрушались уже при количестве циклов нагрузка-разгрузка более 30.

На рис. 2.10 представлены зависимости акустической добротности Q и остаточной прочности $\sigma_{сж}^0$ от количества циклов нагрузка-разгрузка N .

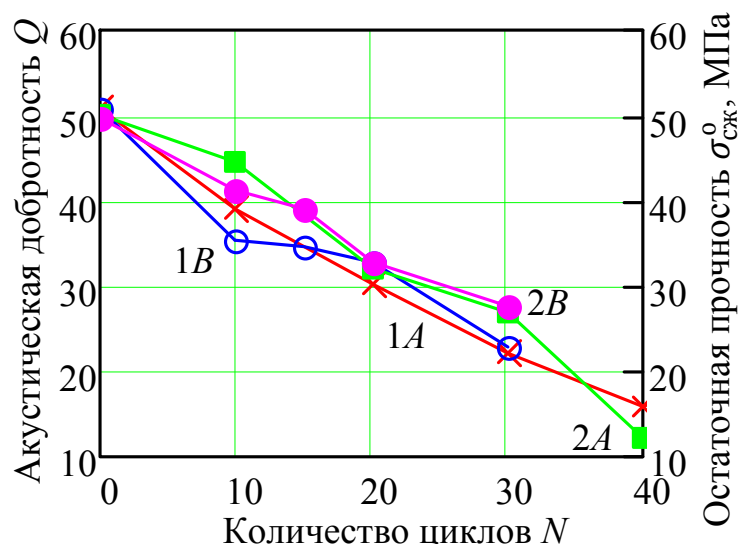


Рис. 2.10 Графики зависимостей акустической добротности (1) и остаточной прочности (2) от количества циклов нагрузка-разгрузка для образцов известняка месторождения Тигинское при максимальной нагрузке в циклах 0,3 (A) и 0,5 (B) от разрушающей

Как и следовало ожидать, внесение поврежденности при циклических усталостных испытаниях приводит к уменьшению, как остаточной прочности, так и акустической добротности. В обеих группах образцов обращает на себя внимание также то, что на участке N от 0 до 10 акустическая добротность Q уменьшается быстрее, чем остаточная прочность. При этом относительное уменьшение акустической добротности для образцов первой группы равно 0,23, остаточной прочности 0,12, а для образцов второй группы 0,3 и 0,17 соответственно. Большее значение этой величины для акустической добротности говорит о том, что Q обладает высокой чувствительностью по отношению к нарушенности и может служить для прогноза остаточной прочности на ранних стадиях разрушения геоматериала. Следует отметить также еще одну особенность. Поскольку графики, как акустической добротности, так и остаточной прочности для одной и другой группы близки друг к другу, а большие нагрузки в циклических тестах привели к меньшему количеству циклов до разрушения, можно высказать гипотезу, что акустическая

добротность отражает изменение остаточной прочности. Она в значительно меньшей степени отражает величину нагрузки.

Следующая серия экспериментов производилась на образцах травертина одного из месторождений области Денизли (Турция). В этой серии максимальная нагрузка цикла составляла 0,1 от предела первоначальной прочности. Количество циклов N равнялось 0, 10, 20, 30. Малая величина выбранной нагрузки объяснялась тем, что травертин имел слоистость, параллельную оси нагружения, и при больших нагрузках происходило отделение слоев друг от друга по границам контактов. При нагрузках, больших чем 0,1, образец разрушался уже при незначительном числе циклов усталостного нагружения (2-3).

Результаты испытаний образцов травертина представлены на рис. 2.11.

Здесь, как и в предыдущем случае, наблюдается уменьшение и добротности и остаточной прочности при увеличении количества усталостных циклов нагрузка-разгрузка. Однако в изменении остаточной прочности проявилась специфика строения породы образца и направления нагружения. Начиная с 10 циклов нагружения остаточная прочность показывает резкое падение по сравнению с первым участком от 0 до 10 циклов. Но также, как и в предыдущем случае, обращает на себя внимание, что на первом участке от 0 до 10 циклов большему относительному изменению акустической добротности, равному 0,14, соответствует меньшее изменение остаточной прочности, составляющее 0,03, что также свидетельствует о высокой чувствительности акустической добротности Q к увеличению нарушенности и снижению остаточной прочности.

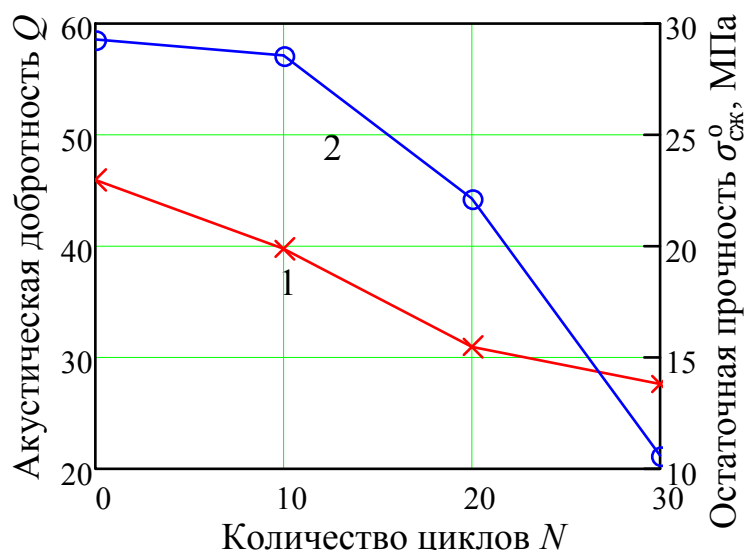


Рис. 2.11 Зависимости акустической добротности Q (1) и остаточной прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}^0$ (2) образцов травертина при нагружении вдоль слоистости

Можно сделать вывод, что акустическая добротность позволяет осуществлять ранний прогноз разрушения геоматериалов уже на первых стадиях.

2.7 Зависимость акустической добротности и остаточной прочности от количества циклов усталостного нагружения изверженной горной породы (габбро)

Приведем результаты аналогичных исследований, полученных для образцов габбро из Головинского месторождения (Украина), являющейся изверженной горной породой основного состава. Испытания проводились при максимальной нагрузке в цикле, составляющей 0,5 от предела прочности и количествах циклов нагружения N , равных 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60. Результаты испытаний представлены на рис. 2.12.

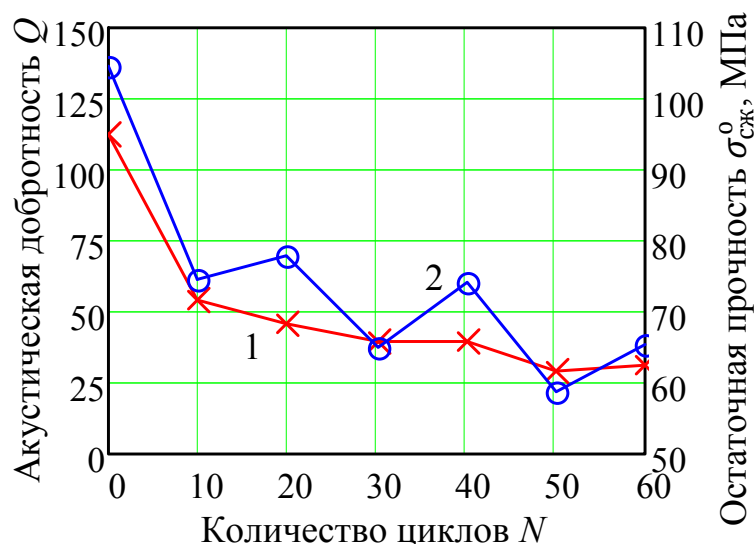


Рис. 2.12 Зависимость акустической добротности Q (1) и остаточной прочности $\sigma_{сж}^0$ (2) для габбро от количества циклов N усталостного нагружения

Для габбро характерен большой разброс значений остаточной прочности отдельных образцов, изменения акустической добротности носят более стабильный монотонный характер, уменьшаясь с увеличением количества циклов нагружения.

В целом закономерность изменения Q и $\sigma_{сж}^0$ аналогична их изменениям, полученным для осадочных пород, и демонстрирует уменьшение остаточной прочности с увеличением количества циклов нагрузка-разгрузка, приводящим к увеличению дефектности геоматериала. На первом участке от начала испытаний до 10 циклов нагружения относительное изменение добротности равно 0,52, относительное изменение остаточной прочности составило 0,28. На последующих участках при переходе от 10 к 60 циклам нагружений эти изменения равны 0,42 и 0,12 соответственно. Большее изменение акустической добротности Q по сравнению с изменением остаточной прочности свидетельствует о ее высокой чувствительности по отношению к нарушенности геоматериала.

2.8 Зависимость акустической добротности и остаточной прочности от количества циклов усталостного нагружения метаморфических горных пород (мрамор)

При исследовании зависимостей акустической добротности и остаточной прочности от количества усталостных циклов мрамора одного из месторождений острова Тассос (Thassos, Греция), было установлено отличие характера изменения изучаемых свойств от свойств пород, упомянутых в данной статье выше.

Как следует из графиков, приведенных на рис. 2.13, закономерности, заключающиеся в том, что при увеличении количества циклов нагрузка-разгрузка увеличивается поврежденность геоматериала, наблюдается только при сравнительно небольшом количестве циклов, в данном случае до 50. Затем происходит увеличение остаточной прочности и соответствующее ему увеличение акустической добротности. При этом увеличение акустической добротности при 150-200 циклах «отстает» от увеличения остаточной прочности, которое отмечено при 100-200 циклах.

В этом проявляется взаимосвязь акустической добротности и остаточной прочности геоматериала и то, что при увеличении нарушенности акустическая добротность уменьшается раньше, чем уменьшается остаточная прочность.

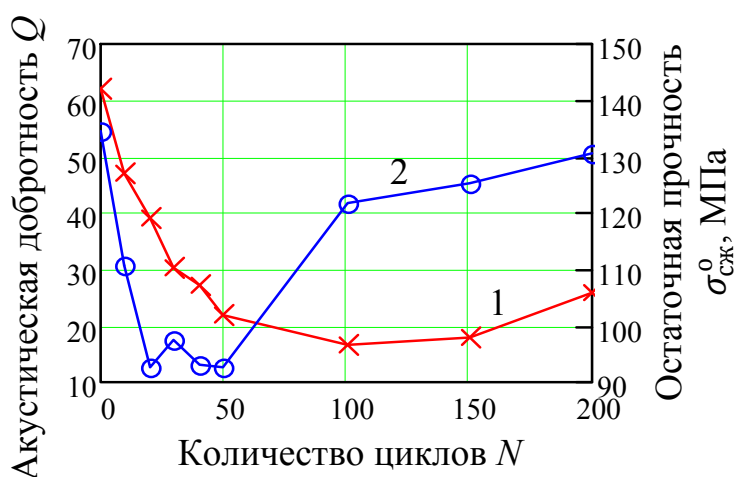


Рис. 2.13 Зависимости акустической добротности Q (1) и остаточной прочности $\sigma_{сж}^0$ (2) от количества циклов N усталостного нагружения для мрамора месторождения Тасос (Thassos)

Подобное явление увеличения остаточной прочности мрамора при усталостных испытаниях может быть объяснено уплотнением его структуры. Этого не наблюдается у известняка, поскольку при числе усталостных нагружений более 2-20 происходит разрушение образцов. В [132] упоминаются несколько механизмов, посредством которых материалы упрочняются, это деформации (или работа) упрочнения (а), упрочнение твердых растворов за счет внедренных атомов или атомов замещения (b), влияние границ зерен и размера зерна (с), вторая фаза упрочнения за счет осадков, других частиц и атомов примесей (d). На наш взгляд, наибольшее влияние здесь оказывают причины а и с.

Аналогичные явления упрочнения/разупрочнения наблюдаются в металлах в зависимости от структурного состояния материала. Механизмы деформационного упрочнения при усталости связаны с взаимодействием движущихся дислокаций с различного рода препятствиями – с другими дислокациями, границами зерен, растворенными чужеродными атомами. В [133] и [134, 135] 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 прочности, наблюдающееся у мрамора, на наш взгляд схоже с третьим случаем. Оно связано с циклической микротекучестью и неомогенным пластическим течением материала.

2.9 Анализ взаимосвязей между акустической добротностью и остаточной прочностью для различных типов горных пород

Зависимости акустической добротности Q и остаточной прочности $\sigma_{сж}^0$ пород от количества циклов нагружения, приведенные выше, позволяют построить взаимосвязи между акустической добротностью Q и остаточной прочностью $\sigma_{сж}^0$.

Такие зависимости для известняка Тигинского месторождения при различных уровнях нагружения в усталостных циклах, а также травертина показаны на рис. 2.14.

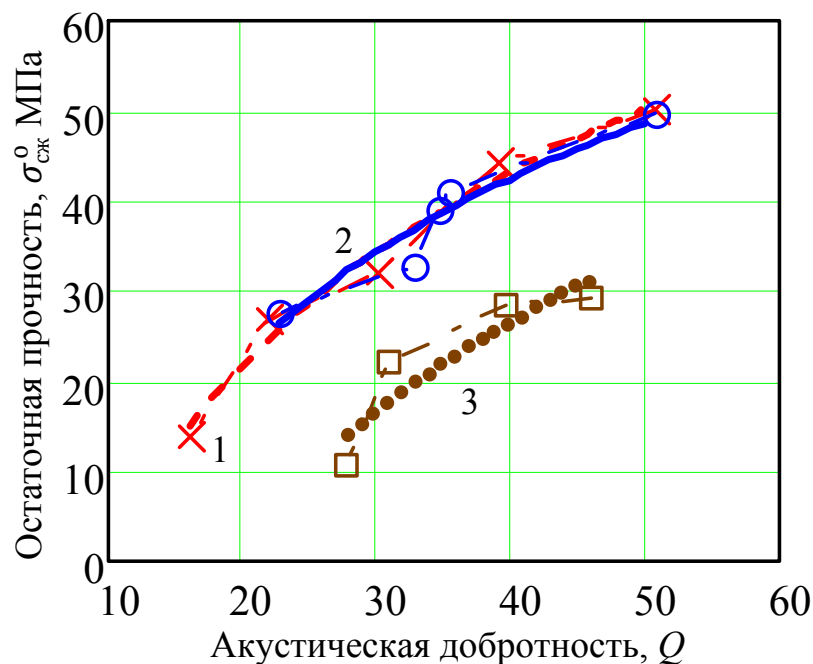


Рис. 2.14 Взаимосвязи между акустической добротностью Q и остаточной прочностью $\sigma_{сж}^0$ при сжатии для осадочных пород: известняка при максимальной нагрузке $0,3\sigma_{max}$ (1), $0,5\sigma_{max}$ (2), и слоистого травертина при нагрузке $0,1\sigma_{max}$ (3)

Как следует из графиков, приведенных на рис. 2.14, для известняков Тигинского месторождения при больших значениях добротности и остаточной прочности степень изменения второй величины меньше, чем первой, как это было показано ранее. Эти связи могут быть аппроксимированы логарифмической зависимостью, для первого случая она имеет вид

$$\sigma_{сж}^0 = 31,11 \times \ln(Q) + 71,44 \text{ МПа,}$$

для второго она аналогична

$$\sigma_{сж}^0 = 28,34 \times \ln(Q) + 62,03 \text{ МПа}$$

при коэффициентах детерминации $R_1^2 = 0,98$ и $R_2^2 = 0,92$ соответственно. Обе зависимости близки друг к другу и отличаются незначительно, что свидетельствует о малом влиянии уровня механического нагружения при усталостных циклах.

Такая же закономерность проявляется и для травертина. Это, как уже было указано ранее, говорит о возможности высокочувствительного прогнозирования остаточной прочности пород по их акустической добротности, в особенности на начальных участках механического нагружения и ранних стадиях разрушения геоматериала.

Изменение прочности при механическом нагружении может быть описано с позиций двухстадийной модели кинетической теории прочности [136], согласно которой на первой стадии разрушения геоматериала микротрещины образуются равномерно по всему объему, не снижая значительно прочность. При этом акустическая добротность, реагируя на потери в среде из-за образующихся трещин, показывает существенное свое уменьшение. На прочность развитие микротрещиноватости оказывает меньшее влияние. На следующей стадии происходит группирование трещин в кластеры, приводя уже к существенному снижению прочности. Но поскольку количество трещин нарастает с той же скоростью, акустическая добротность уменьшается приблизительно также, как и на первой стадии.

Схожая зависимость наблюдается и для габбро. Она представлена на рис. 2.15. Аппроксимация экспериментальных данных логарифмической функцией дает следующую зависимость

$$\sigma_{сж}^0 = 31,86 \times \ln(Q) + 47,25 \text{ МПа}$$

при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,93$.

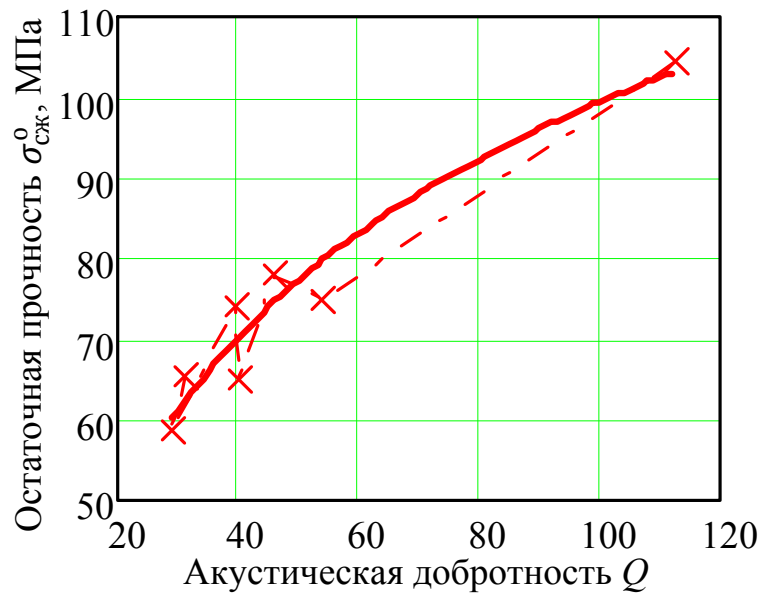


Рис. 2.15 Взаимосвязь между акустической добротностью Q и остаточной прочностью $\sigma^0_{сж}$ габбро Головинского месторождения

Здесь, как и для известняков и травертина, проявляется такая же закономерность – акустическая добротность отражает начальные стадии разрушения с большей чувствительностью, чем остаточная прочность.

Ход кривой $\sigma^0_{сж}(Q)$ для мрамора при уровне нагрузки $0,4\sigma_{max}$, изображенной на рис. 2.16, сложнее. На участке A уменьшение акустической добротности сопровождается уменьшением остаточной прочности, на участке B при уменьшении акустической добротности остаточная прочность меняется незначительно, на участке C уменьшение акустической добротности сопровождается увеличением остаточной прочности, а на участке D наблюдается увеличение, как акустической добротности, так и остаточной прочности

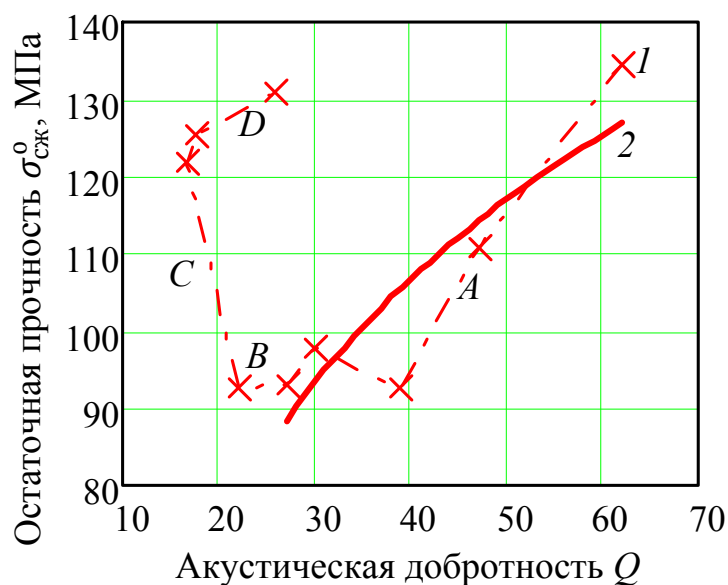


Рис. 2.16 Взаимосвязь между акустической добротностью Q и остаточной прочностью $\sigma^0_{сж}$ мрамора месторождений острова Thassos (1) и аппроксимирующая кривая ее первого участка (2)

Аппроксимация первого участка A дает следующую зависимость

$$\sigma^0_{сж} = 46,49 \times \ln(Q) + 64,87 \text{ МПа}$$

при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,79$, который демонстрирует меньшее значение, чем у пород, описанных выше. Это обусловлено различием форм кривых взаимосвязей акустической добротности и остаточной прочности.

Таким образом, породы различных типов демонстрируют различные типы зависимостей между акустической добротностью Q и остаточной прочностью $\sigma^0_{сж}$. Это обусловлено соотношением процессов разрушения и восстановления геоматериала. В любом случае зависимости первого участка на практике могут быть использованы для прогнозирования остаточной прочности конструктивных элементов различных объектов без их разрушений путем измерения акустической добротности Q . Такими объектами являются, например, целики и кровля подземных горных выработок, разрушение которых может иметь катастрофические последствия.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Разработана методика определения взаимосвязей между акустической добротностью и остаточной прочностью, основанная на измерении этих параметров в образцах горных пород, подвергавшихся разному количеству усталостных циклов нагружения для внесения поврежденности.

2. Рассмотрено влияние преобразователей на акустическую добротность образцов горных пород, а также различных видов колебаний при исследовании методом резонансной акустической спектроскопии, и определены условия, не приводящие к значительному изменению измеряемых значений акустической добротности.

3. Породы различных типов проявляют отчетливую взаимосвязь между акустической добротностью и остаточной прочностью, которая может быть использована для прогнозирования последней без разрушения геоматериала.

4. В зависимости от типа пород кривые $Q(N)$ и $\sigma_{сж}^0(N)$ имеют различный вид: у осадочных и магматических пород (известняк, травертин, габбро) увеличение количества циклов нагружения сопровождается уменьшением акустической добротности и остаточной прочности; у метаморфических пород (мрамор) имеются участки, как синхронного уменьшения, так и увеличения обеих величин, а также участки, где уменьшение акустической добротности сопровождается увеличением остаточной прочности.

3. ВЛИЯНИЕ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И МАСШТАБНОГО ФАКТОРА НА ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ АКУСТИЧЕСКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ И ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ ГОРНЫХ ПОРОД

3.1 Образцы пород для исследования

Для проведения исследований вида напряженного состояния и масштабного фактора на зависимости $\sigma^0(Q)$ были взяты образцы цилиндрической формы гипсосодержащих пород Новомосковского месторождения, разрабатываемого подземным способом с взрывной отбойкой гипсового камня. Этот тип пород был выбран в силу того, что в мировой практике месторождения гипса отрабатываются как открытым, так и подземным способами, что обуславливает разнообразие видов напряженного состояния породных массивов, включающих как сжатие, так и растяжение.

Толща гипса на Новомосковском месторождении сложена переслаиванием нескольких разновидностей, основными из которых являются следующие.

Пятнистый гипс. Гипс светло-серый, часто с желтоватым оттенком, крупнокристаллический, сахаровидный, местами текстура пятнистая за счет неравномерной окраски и включений доломита, с вкраплениями в виде линз тонкослоистого гипса и пересекающихся нитевидных прослоев темно-серых доломитов. Пятнистый гипс имеет преобладающее распространение в разрезе гипсовой толщи.

Селенит имеет окраску от белого до светло-голубого цвета, отличается ярко выраженной волокнистой структурой, иногда сложен вытянутыми кристаллами гипса. Среди разновидностей гипса он имеет наименьшую прочность. Внешний вид разновидностей гипса пятнистого и селенита после испытания образцов представлен на рис. 3.1.

Кроме того, в разрезе гипсовой толщи присутствует *звездчатый гипс*, но он имеет подчиненное распространение, хоть и является наиболее прочной разновидностью.

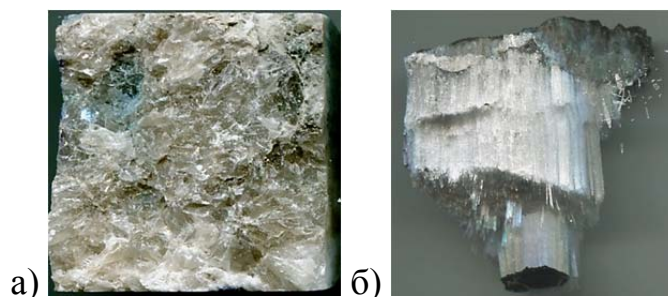


Рис. 3.1. Изображения разновидностей гипса пятнистого (а) и селенита с нитевидной текстурой (б) после разрушения образцов

Образцы были изготовлены из разновидностей пятнистого гипса с включениями селенита. Для испытаний при одноосном сжатии образцы имели размеры $\varnothing 30 \times 60$ мм и $\varnothing 80 \times 160$ мм при отношении высоты к диаметру, равном 2. Для испытаний при одноосном растяжении по «бразильской» схеме использовались образцы с размерами $\varnothing 30 \times 30$ мм и $\varnothing 80 \times 80$ мм при отношении высоты к диаметру 1.

3.2 Влияние напряженного состояния и масштабного фактора для гипсо-содержащих пород на зависимость акустической добротности и остаточной прочности от количества циклов усталостного нагружения

Основная идея экспериментов заключалась в измерении акустической добротности Q и остаточной прочности σ^0 образцов, подвергавшихся различному количеству усталостных циклов нагружения для получения различной поврежденности геоматериала. По этим данным затем строились графики и выводились регрессионные зависимости $\sigma^0(Q)$, которые использовались для оценки остаточной прочности пород без их разрушения.

Для определения влияния вида напряженного состояния сравнивались между собой указанные зависимости при определении пределов прочности при усталостном многоцикловом одноосном *сжатии* и *растяжении*. Для определения влияния масштабного фактора между собой сравнивались зависимости, полученные при испытании образцов двух диаметров 30 и 80 мм.

Особенности взаимосвязей $\sigma^0(Q)$ при одноосном сжатии и растяжении, получаемых в процессе усталостных испытаний

На рис. 3.2 и 3.3 показаны графики зависимостей акустической добротности (1) и остаточной прочности при сжатии (2) горной породы от количества усталостных циклов N .

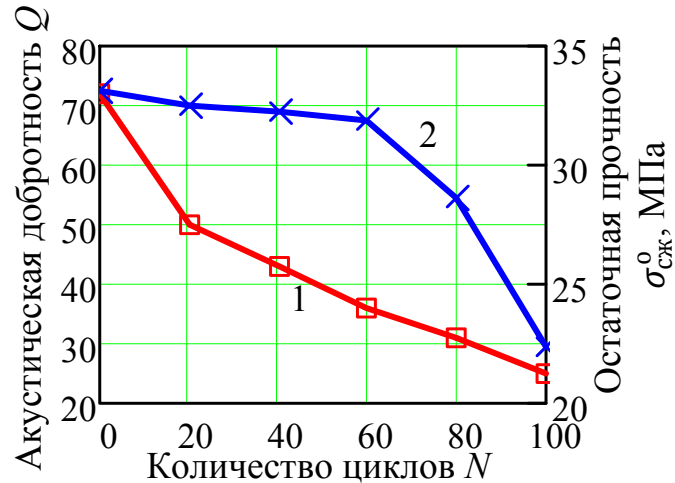


Рис. 3.2. Зависимости акустической добротности Q (1) и остаточной прочности при сжатии $\sigma^0_{сж}$ (2) от количества циклов N усталостного нагружения для образцов с размерами $\phi 30 \times 60$ мм

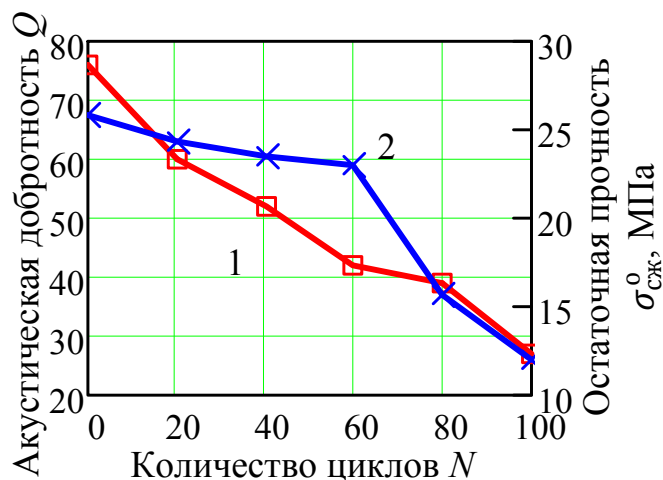


Рис. 3.3. Зависимости акустической добротности Q (1) и остаточной прочности при сжатии $\sigma^0_{сж}$ (2) от количества циклов N усталостного нагружения для образцов с размерами $\phi 80 \times 160$ мм

Как и следовало ожидать, увеличение количества циклов приводит к уменьшению, как акустической добротности, так и остаточной прочности. Обращает на себя внимание то, что кривая акустической добротности 1 выгнута вниз, а кривая остаточной прочности 2 выгнута вверх.

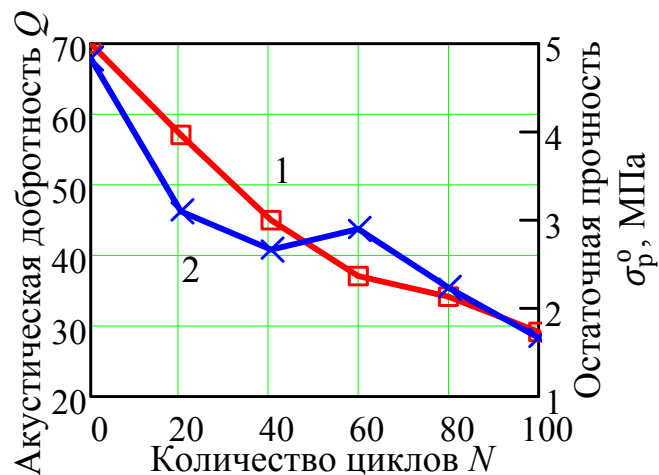


Рис. 3.4. Зависимости акустической добротности Q (1) и остаточной прочности при растяжении σ_p^0 (2) от количества циклов N усталостного нагружения для образцов с размерами $\emptyset 30 \times 30$ мм

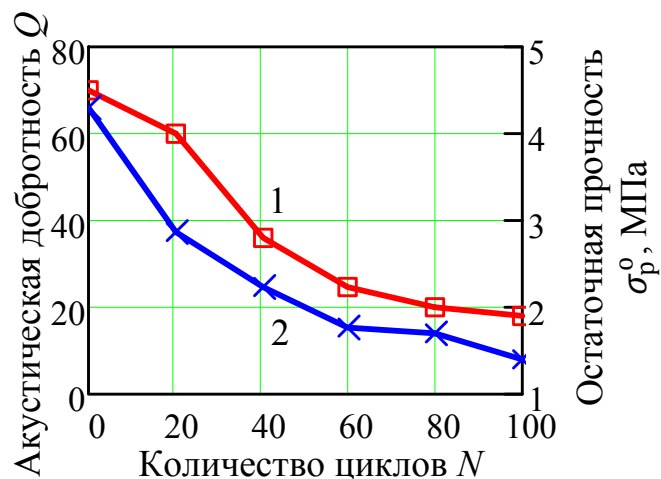


Рис. 3.5. Зависимости добротности Q (1) и остаточной прочности при растяжении σ_p^0 (2) от количества циклов N усталостного нагружения для образцов с размерами $\emptyset 80 \times 80$ мм

На рис. 3.4 и 3.5 представлены графики зависимости акустической добротности (1) и остаточной прочности при растяжении (2) от количества усталостных циклов. В данном случае обе кривые выгнуты вниз, что отличает их от кривых на рис. 3.2 и 3.3.

3.2 Особенности взаимосвязей между акустической добротностью и остаточной прочностью пород при одноосном сжатии и растяжении

На рис. 3.4 и 3.5 представлены взаимосвязи $\sigma_{сж}^0(Q)$ и $\sigma_p^0(Q)$ при сжатии и растяжении соответственно для образцов различного размера.

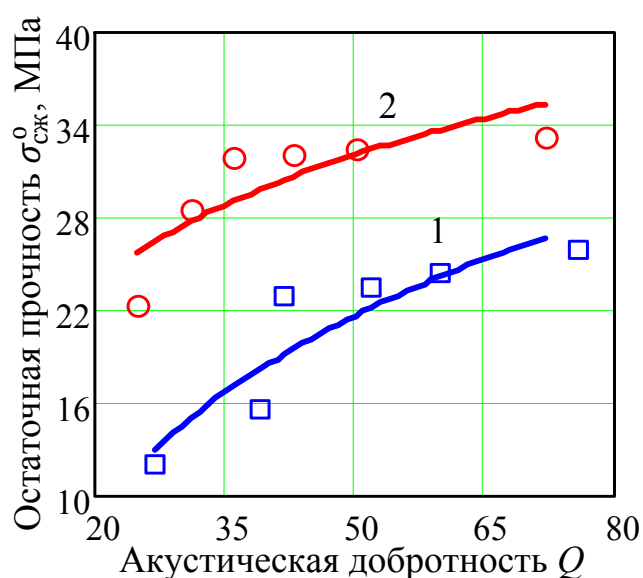


Рис. 3.6. Взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью при одноосном сжатии $\sigma_{сж}^0(Q)$ образцов с размерами $\varnothing 80 \times 160$ мм (1), $\varnothing 30 \times 60$ мм (2)

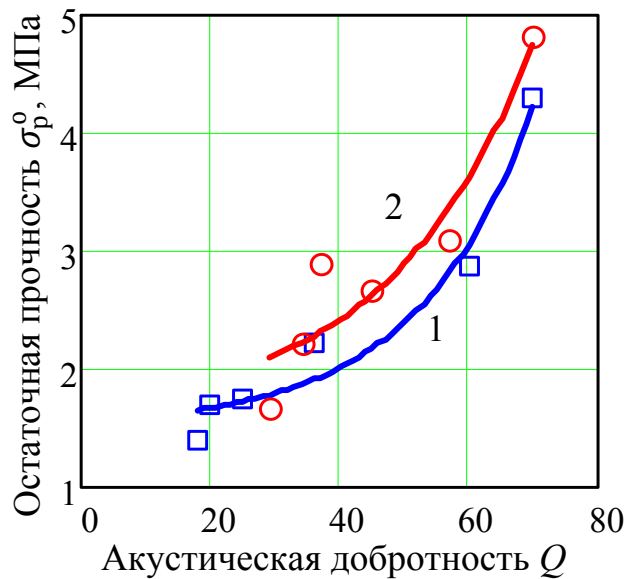


Рис. 3.7. Взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью при одноосном растяжении $\sigma_p^0(Q)$ образцов с размерами $\varnothing 80 \times 80$ мм (1), $\varnothing 30 \times 30$ мм (2)

В табл. 3.1 приведены формулы регрессионных зависимостей, описывающие эти кривые, а также соответствующие коэффициенты детерминации, характеризующие степень нелинейной связи этих величин, и среднеквадратические отклонения, характеризующие разброс точек вокруг аппроксимирующих кривых.

Табл. 3.1. Регрессионные зависимости $\sigma_{сж}^0(Q)$ и $\sigma_p^0(Q)$ при различных видах напряженного состояния и размерах образцов

Напряженное состояние, прочность	Размеры образцов, $\varnothing \times h$, мм	Вид зависимости $\sigma^0(Q)$, МПа, номер формулы	К-т детерминации R^2	С.к.о., МПа
Сжатие, $\sigma_{сж}^0$	80 x 160	$13,979 \cdot \ln(Q) - 33,005$ (3.1)	0,83	4,187
Сжатие, $\sigma_{сж}^0$	30 x 60	$9,047 \cdot \ln(Q) + 3,324$	0,678	5,024
Растяжение, σ_p^0	80 x 80	$0,052 \cdot e^{0,056Q} + 1,514$ (3.2)	0,966	1,383
Растяжение, σ_p^0	30 x 30	$0,151 \cdot e^{0,044Q} + 1,556$	0,899	1,309

При оценке влияния на эти зависимости вида напряженного состояния можно в целом отметить, что при сжатии такие зависимости аппроксимиру-

ются логарифмической зависимостью, а при растяжении – экспоненциальной.

С точки зрения прогнозирования остаточной прочности пород это означает, что при сжатии на начальных стадиях накопления повреждений (в правой части графиков) зависимость $\sigma_{сж}^0(Q)$ имеет меньший наклон, чем на более поздних. При этом акустическая добротность обладает высокой чувствительностью по отношению к прочности на начальных стадиях, где большим изменениям акустической добротности соответствуют меньшие изменения прочности.

При растяжении наблюдается обратное соотношение. Здесь зависимость $\sigma_p^0(Q)$ чувствительна на более поздних стадиях накопления повреждений (в левых частях графиков при меньших значениях акустических добротностей), что следует учитывать при интерпретации результатов и прогнозировании остаточной прочности.

3.3 Влияние масштабного фактора на взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью пород

Как следует из графиков зависимости $\sigma_{сж}^0(Q)$, полученных при испытании образцов пород при сжатии и приведенных на рис. 3.6, масштабный фактор (размер образцов), оказывает влияние на эти зависимости, т.к. кривые 1 и 2 на рис. 3.6 расположены достаточно далеко друг от друга. Можно также отметить, что остаточная прочность при одноосном сжатии образцов больших размеров ниже, чем у образцов меньших размеров при одном и том же значении акустической добротности.

Анализ внешнего вида и расположения друг относительно друга кривых 1 и 2 на рис. 3.7, полученных для зависимости $\sigma_p^0(Q)$ при одноосном растяжении, показывает, что влияние масштабного фактора на зависимость $\sigma_p^0(Q)$ при растяжении существенно меньше, чем при сжатии. Это проявляет себя в том, что кривые 1 и 2 на рис. 3.6 находятся дальше друг от друга, чем кривые 1 и 2 на рис. 3.7.

Проведенный статистический анализ позволил количественно оценить степень влияния масштабного фактора и вида напряженного состояния на зависимости $\sigma_{сж}^o(Q)$ и $\sigma_p^o(Q)$. Для этого была рассмотрена разность двух зависимостей и проведена ее оценка на основе проверки гипотез о равенстве средних с помощью t -критерия Стьюдента [137]

$$t = \frac{|\overline{\sigma_{30}} - \overline{\sigma_{80}}|}{\sqrt{(n_{30}-1)S_{30}^2 + (n_{80}-1)S_{80}^2}} \sqrt{\frac{n_{30}n_{80}(n_{30}+n_{80}-2)}{n_{30}+n_{80}}},$$

где $\overline{\sigma_{30}}$, $\overline{\sigma_{80}}$ - средние значения остаточной прочности; S_{30} , S_{80} - ее средние квадратические отклонения; n_{30} , n_{80} - объемы выборок для образцов диаметром $\varnothing 30$ и $\varnothing 80$ мм соответственно.

Гипотеза о равенстве средних и принадлежность обеих кривых к одной выборке принимается при $t < t_c$, где t_c – критическое значение, и отвергается в противном случае. В нашем случае количество степеней свободы $k=10$ и при доверительной вероятности $\nu=0,99$ критическое значение $t_c = 3,169$.

В случае, когда определяется остаточная прочность при сжатии, $t_{сж}^o=3,508$. Это значение больше t_c , что говорит о существенном различии кривых $\sigma_{сж}^o(Q)$ и о значительном влиянии размеров образцов.

Когда же определяется остаточная прочность при растяжении $\sigma_p^o(Q)$, $t_p^o=2,79$, что меньше t_c , различие статистически несущественно, и влиянием масштабного фактора на кривые $\sigma_p^o(Q)$ можно пренебречь.

Таким образом, можно сделать вывод, что для указанных пород влияние масштабного фактора не сказывается на взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью при усталостных испытаниях в условиях одноосного растяжения. Взаимосвязь между добротностью и остаточной прочностью при одноосном сжатии подвержена влиянию масштабного фактора, причем образцы большего размера с одинаковым значением акустической добротности обладают меньшими значениями остаточной прочности.

3.4 Оценка влияния масштабного фактора на взаимосвязи между остаточной прочностью и акустической добротностью на образцах известняков различной длины

Для практического использования приведенных выше закономерностей необходимо установить влияние масштабного фактора. Если это влияние невелико, то зависимости, полученные на образцах, можно перенести на натурные объекты, введя при необходимости поправочные коэффициенты. Указанная задача решалась экспериментальным путем.

Эксперименты проводились на образцах известняков Касимовского месторождения. Образцы имели одинаковое основание размером 20х20 мм и различную высоту от 40 до 120 мм. Методика испытаний образцов описана выше. Были произведены одна серия экспериментов с исходными образцами без их усталостного нагружения и три серии при количестве циклов усталостного нагружения 30, 40 и 50.

На рис. 3.8 представлены зависимости остаточной прочности $\sigma_{сж}^0$ и акустической добротности Q от длины образцов l , не подвергавшихся нагружению. Увеличение длины приводит, в целом, к незначительному уменьшению, как остаточной прочности, так и акустической добротности. Это может объясняться тем, что при большей длине образца количество нарушений различного вида (трещины, полости и др.) возрастает, что влияет на обе величины.

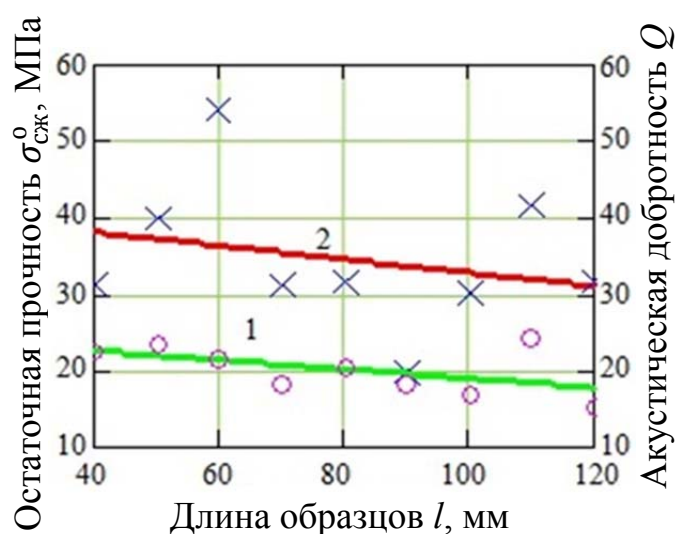


Рис. 3.8 Зависимости акустической добротности (1, кружки) и остаточной прочности (2, крестики) от длины образцов без их нагружения.

Графики взаимосвязей между акустической добротностью и остаточной прочностью для образцов длиной 40 мм и 120 мм, а также графики, построенные по объединенной выборке при числе усталостных циклов 0, 20, 30, 50 представлены на рис. 3.9.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы. Значения остаточной прочности и акустической добротности для образцов длиной 120 мм меньше, чем для образцов длиной 40 мм. В то же время аппроксимирующие прямые для образцов 40 мм и 120 мм близки друг к другу, вторая с определенной степенью приближения может служить продолжением первой. Они близки также и к прямой, построенной по объединенной выборке. Последняя может быть взята в качестве регрессионной линии, по которой можно пересчитать значения акустической добротности в величину остаточной прочности. Это говорит о слабом влиянии масштабного фактора.

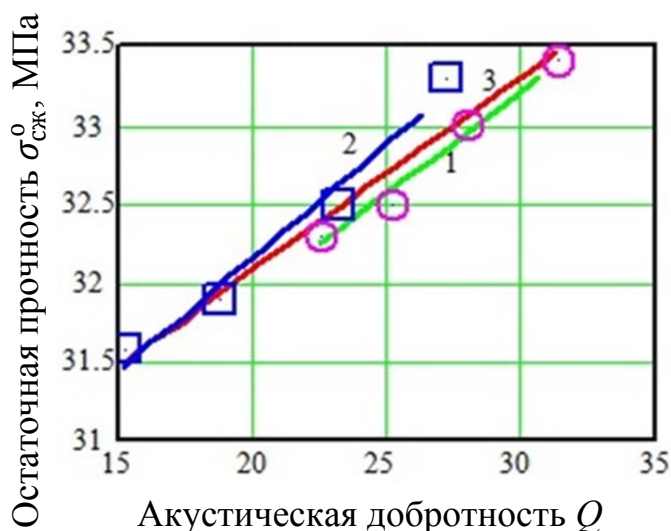


Рис. 3.9 Взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью для образцов длиной 40 мм (1, кружки), 120 мм (2, квадраты) и построенные по обобщенной выборке (3) при числе усталостных циклов 0, 20, 30, 50.

Как и ранее, при увеличении количества усталостных циклов обращает на себя внимание значительное уменьшение добротности: в 1,4 раза для об-

разцов высотой 40 мм и в 1,8 раза – 120 мм, а по объединенной выборке в 2,1 раза. При этом остаточная прочность по объединенной выборке уменьшилась лишь в 1,06 раза. Т. е. проявляется высокая чувствительность добротности по отношению к остаточной прочности и внутренней поврежденности на ранних стадиях усталостного разрушения геоматериала.

Можно сделать вывод о том, что масштабный фактор при изменении длины образцов в 3 раза не сказывается в значительной степени на взаимосвязях добротности и остаточной прочности пород.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. При механическом усталостном механическом нагружении взаимосвязь между акустической добротностью и остаточной прочностью горных пород при одноосном сжатии аппроксимируется логарифмической зависимостью, а между акустической добротностью и остаточной прочностью при одноосном растяжении – экспоненциальной.

2. Для образцов гипсосодержащих пород Новомосковского месторождения масштабный фактор влияет на их взаимосвязь между акустической добротностью и остаточной прочностью при одноосном сжатии, что обуславливает необходимость проведения испытаний на образцах стандартных размеров; при испытаниях на одноосное растяжение масштабный фактор не оказывает влияние на взаимосвязь между акустической добротностью и остаточной прочностью.

3. Для гипсосодержащих пород при одном и том же значении акустической добротности $Q=50$ остаточная прочность пород при сжатии составляет $\sigma_{сж}^0 = 22$ МПа для образцов с размерами $\varnothing 80 \times 160$ мм и $\sigma_{сж}^0 = 32$ МПа для образцов с размерами $\varnothing 30 \times 60$ мм; для того же значения акустической добротности остаточная прочность пород при растяжении составляет $\sigma_p^0 = 2,8$ МПа для образцов с размерами $\varnothing 80 \times 80$ мм и $\sigma_p^0 = 2,3$ МПа для образцов с размерами $\varnothing 30 \times 30$ мм.

4. Получены эмпирические формулы для определения остаточной прочности при сжатии

$$\sigma_{сж}^0(Q) = 13,979 \cdot \ln(Q) - 33,005 = 23,8 \text{ МПа}, R^2=0,83,$$

и растяжении

$$\sigma_p^0(Q) = 0,052 \cdot e^{0,056Q} + 1,514 = 2,8 \text{ МПа}, R^2=0,966.$$

Указанные формулы могут быть использованы для оценки остаточной прочности по результатам измерения акустической добротности.

4. ОБОСНОВАНИЕ ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД В МАССИВЕ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ИХ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ И АКУСТИЧЕСКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ

4.1 Описание мест проведения натурных экспериментов

Методика определения акустической добротности в натурных условиях отрабатывалась в условиях шахты ООО «Кнауф Гипс Новомосковск» Новомосковского месторождения гипса.

Месторождение сложено породами девонского, каменноугольного, мезозойского и четвертичного возраста. Гипсовая залежь, являющаяся частью гипсоносной толщи верхнедевонского возраста, залегает практически горизонтально (угол падения от 0° до 3°) на глубине от 113 до 133 м. Средняя мощность - 16 м., минимальная - 9,8 м., максимальная - 23,8 м.

Залежь имеет слоистое строение и состоит из 7 - 17 пластов гипса мощностью от 0,5 до 1,9 м, разделенных тонкими прослойками известняка и доломита. Пласты гипса хорошо прослеживаются по всему полю месторождения с небольшими колебаниями. Количество пластов в данной каждой точке и общая мощность залежи зависят от глубины размыва верхней части залежи.

Гипсовую залежь разделяют на две части: 1 - нижняя, разрабатываемая камерами (мощность от 9,6 до 14,1 м), включает восемь пластов гипса, обозначаются с I по VIII сверху вниз; 2 - верхняя, оставляемая в кровле камер, является гипсовой потолочиной, предохраняет от прорыва воды из покрывающих пород (мощность изменяется от 4,7 до 10,2 м, что зависит от степени размыва верхней части залежи), включает до девяти пластов гипса мощностью от 0,6 до 1,5 м, которые обозначаются от «а» до «и» снизу вверх.

Гипсовые пласты, составляющие залежь в целом, сложены четырьмя основными разновидностями гипса: пластинчатой, звездчатой, волокнистой и пятнистой. На рис. 4.1 представлен сводный геологический разрез залежи Новомосковского месторождения.

Породы показатели и	Наименование пластов и толщ и	Разрез	Наименование пород	Характеристика монолитности и связи гипсовых пластов и пропластков
Потолочина камер	0-10 18-35 0-13-32 0-15	0-100 10-300 10-300 0-80	глина карбонатная доломит глина карбонатная доломит	пласт монолитный пласт монолитный пласт монолитный пласт монолитный
	И 100	100	гипс пятнистый	пласт монолитный
	3 100	100	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	ЖС 60	60	гипс пятнистый	пласт монолитный
	ЖС 60	60	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс слоистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс звездчатый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
Разрабатываемая камера часть гипсовой залежи	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам
	В 80	80	гипс пятнистый	пласт монолитный
	В 80	80	доломит	пропласток со слабой связью по контактам

Рис. 4.1. Геологический разрез в месте ведения горных работ

Породы, вмещающие гипсовую залежь, среди которых преобладают карбонатные смеси и пески, содержат несколько водоносных горизонтов. Выше гипсовой толщи установлено наличие шести водоносных горизонтов.

Гипсоносная толща на большей части площади безводна, но в западной части бассейна встречаются карсты в виде воронок и провалов. В восточной части бассейна в гипсовой толще встречена только одна карстовая полость, но в нижней части толщи оказались обводненными некоторые сильно трещиноватые прослои доломита. В слоях гипса и доломита воды не обнаружено.

4.2 Свойства пород

Породы, слагающие гипсовую толщу, резко отличаются по своей прочности (гипсовые слои перемежаются с тонкими прослойками, бесформенными гнездами и линзами доломита, глинистого известняка, кремния - эти породы резко отличаются по прочности от гипса).

Физические свойства гипса и пород надгипсовой толщи изучались как в лаборатории гипсового комбината, так и в петрографической лаборатории ВНИМИ. Эти данные приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Физические свойства гипса и пород надгипсовой толщи

Наименование породы	Объемный вес, г/см ³	Пористость, %	Влажность, %	Максимальная водонасыщенность, %
Известняки	2,50	-	0,08-15,00	-
Доломиты	2,35-2,58	9,71-12,53	6,34-9,36	-
Глина из верхнего пласта	2,43	24,00	10,40-11,88	ср. 13,86
Глина из нижнего пласта	2,13	19,17	ср. 11,00	ср. 11,47
Селенит	2,30	ср. -0,39	ср. 0,12	ср. 0,17
Слоистый гипс	2,32	ср. -1,23	ср. 0,30	ср. 0,54
Пятнистый гипс	2,30	ср. -0,24	ср. 0,30	-

При определении радиуса безопасной зоны наибольшее значение имеет такой параметр, как предел прочности при растяжении. В таблице 4.2 приведены значения предела прочности на растяжение, определенные ВНИМИ [138, 139].

Таблица 4.2 - Значения предела прочности на растяжение для пород Новомосковского месторождения (по данным ВНИМИ)

	Наименование скважин и разновидностей пород	Предел прочности на растяжение $\sigma_{рас}$, МПа		
		Средние значения и количество образцов	Пределы изменения	С. к. о. из условия 2σ
Гипсовая потолочина	Скважина №1 (северн. уч-к)	3,8 (32)*	3,4-4,9	0,38
	Скважина №4 (вост. уч-к)	3,0 (22)	3,3-5,7	0,6
	Скважина №10 (зап. уч-к)	3,5 (16)	3,1-4,8	0,43
	Вентиляционный шурф	2,9 (28)	2,6-3,5	0,23
Междукамерные целики	Скважина №11 (зап. уч-к)	5,2 (18)	4,3-6,7	0,6
	Скважина №17 (вост. уч-к)	5,5 (28)	5,3-6,6	0,33
	Скважина №19 (сев. уч-к)	4,7 (14)	4,1-5,7	0,4
	Скважина №4 (северн уч-к)	5,3 (13)	4,7-5,7	0,25
	Скважина №17 (вост уч-к)	6,0 (12)	4,6-7,5	0,73
	Известняки	3,4 (6)	2,4-3,8	0,35
	Доломиты над верхним пластом глин	7,8 (4)	4,4-10,1	1,43
	Доломиты между верхним и нижним пластом глин	6,3 (4)	3,5-11,4	1,98
	Селенит	1,8 (8)	1,3-2,0	0,18
	Пятнистый гипс	4,0 (112)	3,1-5,7	0,65
	Слоистый гипс	4,5 (20)	3,2-6,1	0,73
	Звездчатый гипс	5,1 (18)	3,9-6,7	0,7
	Доломит слоистый	7,5 (4)	-	-
	Доломит монолитный	8,1 (5)	-	-

В таблице указаны средние значения предела прочности на растяжение, пределы изменения этой величины, а также количество образцов, по которому производилось определение. В этой таблице представлены также величины среднеквадратического отклонения.

Как видно из приведенных данных, наиболее слабой породой является селенит, по отношению к ней и должны производиться расчеты.

Месторождение отрабатывается ООО «Кнауф Гипс Новомосковск» подземным способом. Промышленные запасы руды в шахтном поле составляют 150552 тыс. т., глубина залегания месторождения $H=135$ м, длина шахтного поля 3000 м, ширина шахтного поля 3000 м, высота отрабатываемого слоя 11 м, годовая производственная мощность рудника 3,0 млн. т.

На месторождении горизонт - 135 м является основным. Месторождение отрабатывается камерно-столбовой системой разработки с механизированной выемкой полезного ископаемого (рис. 4.2). Отработка шахтного поля осуществляется по панельной схеме - от главных транспортных выработок перпендикулярно к ним проходят панельные транспортные, вентиляционные, а если понадобится, то и вспомогательные с выработки с интервалами, зависящими от ширины панелей. Панели отрабатываются в прямом направлении. Для сохранения устойчивости кровли в камере необходимо, чтобы рабочее сопротивление формируемых целиков составляло при вынимаемой мощности 12 м не менее 20 т/м^2 поддерживаемой площади призабойного пространства. При камерно - столбовой системе для подготовки и очистной выемки используется шпуровая отбойка. Сечение выработок имеет прямоугольную форму, размеры транспортной выработки: ширина 8,5 м, высота 4,5 м. Основные параметры камеры: длина камеры 200 м, ширина камеры 10-11 м, выемочная мощность - до 12 м (табл. 4.3).

Табл. 4.3. Параметры камерно-столбовой системы разработки

Параметр	Величина
Ширина камеры, м	10-12
Высота камеры, м	10-12
Ширина целика, м	9-10
Высота целика, м	10-12
Длина камеры и целика, м	150-700
Глубина от дневной поверхности, м	110-130

Новомосковское месторождение гипса разрабатывается камерно-столбовой системой (рис. 4.2) с оставлением междукammerных целиков и защитной пачки в кровле (потолочины). Разрез по А-А панели № 15 представлен на рис. 4.3.

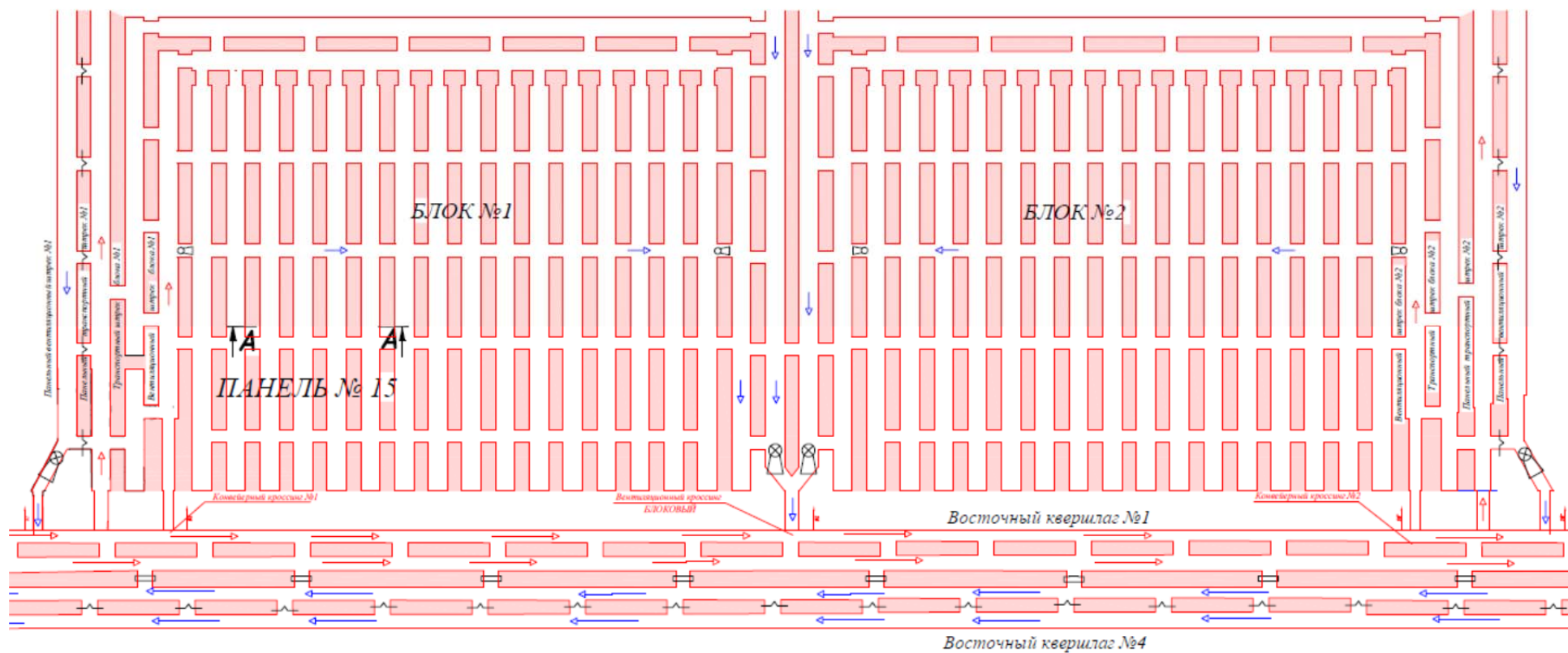


Рис. 4.2. Система разработки и схема проветривания; стрелки показывают движение струй воздуха при проветривании:
вверх и вправо - свежая, вниз и влево - исходящая струи воздуха



Рис. 4.3. Разрез по А-А

4.3 Общие предпосылки методики оценки остаточной прочности на натуральных объектах

Для измерения акустической добротности горных пород в условиях действующих предприятий может быть использовано несколько способов, к которым относится анализ сейсмического сигнала при взрывах в забое и вибрационной отклик на удар при тестировании кровли и анкерного крепления.

Оценка акустической добротности горных пород в массиве может быть получена по коде колебаний в месте регистрации сигнала упругих волн по методике, используемой в сейсмологии [140, 141, 142]. После регистрации сейсмосигнала на записи выделяется участок, соответствующий хвостовой части, т.е. коде. Из этого сигнала, отфильтрованного для определенной частоты f_m , выделяются модули амплитуд $A(t_i)$, которые умножаются на время t_i , прошедшее с момента начала коды. Строится график величины $\ln(t_i A(t_i))$ в зависимости от времени и определяется его наклон. Данная величина будет являться добротностью.

На записях сейсмограмм важно выделить именно участок, соответствующий кода-волнам. В случае землетрясения или единичного взрыва он легко определяется. Обычно он берется с момента времени равного удвоенному времени пробега S-волны [143]. В условиях взрывной отбойки пород на шахтах, рудниках и карьерах применяется короткозамедленное взрывание. Так, например, при подземной добыче гипса взрывание групп шпуров электрическим способом осуществляется с задержками 20, 60, 100 мс и далее через 50 мс до 600 мс. Длительность сейсмосигнала в реальных условиях доходит до 10 и более секунд. На рис. 4.4 в качестве примера представлен внешний вид сейсмосигнала при короткозамедленном электрическом взрывании, данные взяты из исследований [144, 145]. Обращает на себя внимание сложная структура волновой картины, обусловленная многократным наложением волн от отдельных взрывов в серии. Длительность каждого

сигнала превышает интервал замедления, и волны накладываются друг на друга.

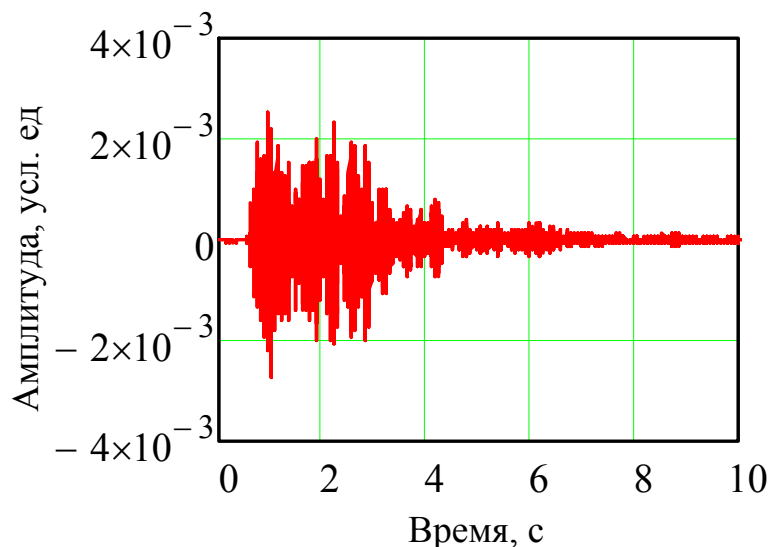


Рис. 4.4. Пример сейсмосигнала, вызванного взрывом с короткозамедленным взрыванием и зарегистрированного на кровле подземной выработки

Поэтому в случае короткозамедленных взрывов на малом расстоянии наблюдается наложение волн, и выделение кода-волн проблематично. В настоящее время применяется неэлектрический способ инициирования взрывания с интервалом замедления от 42 мс до 9 с, причем последние заряды взрываются с интервалом 1 с. В этом случае возможно выделить коду последнего сигнала, но это потребует отдельных исследований, не входящих в задачи данной работы.

Определение акустической добротности по вибрационному отклику при тестировании кровли и анкерного крепления.

В настоящее время осуществляется разработка прибора «Анкер-Тест» для контроля кровли и анкерного крепления [146, 147, 148]. Действие прибора основано на регистрации вибрационного отклика на удар по анкеру, установленного в кровле выработки. Акустическая добротность системы «анкер-породы кровли» определяется в значительной степени добротностью пород, в которых установлен анкер, так как добротность стального анкера значительно выше, чем окружающего массива пород. При увеличении тре-

щиватости пород снижается их акустическая добротность, а также и остаточная прочность, что соответствующим образом отразится на регистрируемом сигнале. По измерению добротности можно оценивать остаточную прочность пород.

На рис. 4.5 приведен график одного из сигналов, зарегистрированных при тестировании анкеров длиной 2 м, установленных в кровле камер на шахте Новомосковского месторождения гипса. Отклик на удар представляет собой гармонический сигнал, затухающий во времени. Для определения добротности системы был рассчитан спектр этого сигнала, представленный на рис. 4.6. Расчет добротности производился по формуле (2.3), но с некоторыми оговорками.

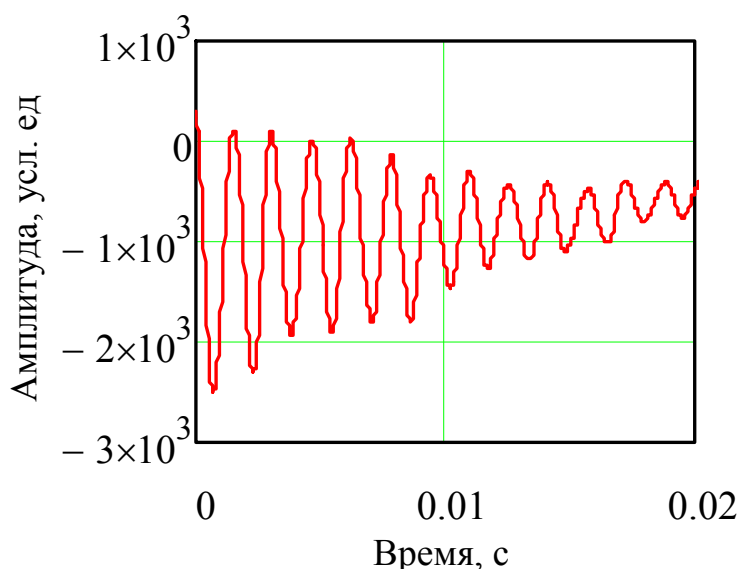


Рис. 4.5. Вид затухающего сигнала при измерении прибором «Анкер-Тест»

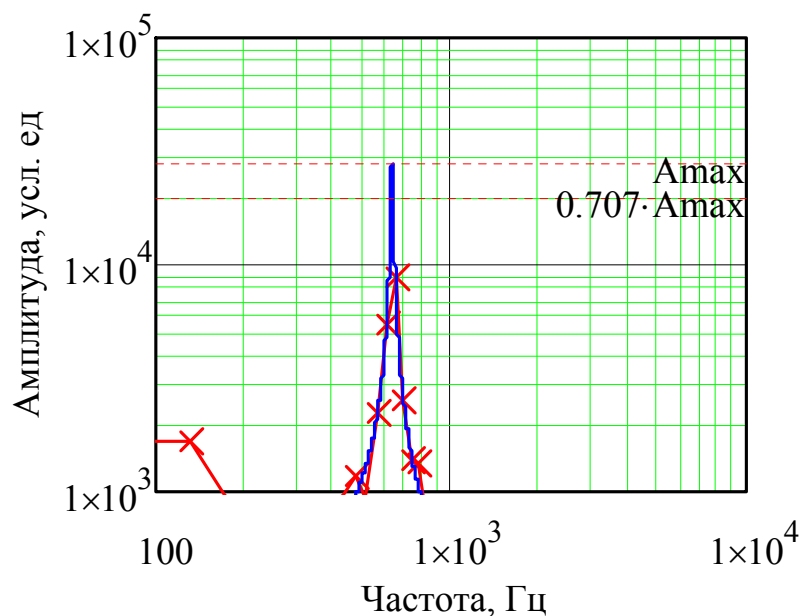


Рис. 4.6. Спектр затухающего сигнала при измерении прибором «Анкер-тест»

Цифровая обработка не дает точного значения частоты f_m максимума спектра из-за его дискретного характера. Значения f_m могут попасть в промежуток между отсчетами, что приведет к неточному значению как частоты, так и амплитуды A_m . Это, в свою очередь, приведет к погрешности определения акустической добротности Q .

Для получения более точных значений f_m , A_m , Q была произведена интерполяция кривой спектра в области спектрального максимума. Для этого в массиве чисел, описывающих спектр, выделялась точка максимума, а также две соседние точки - одна ниже, а другая выше по частоте. Спектр в этой области аппроксимировался кривой, описывающей амплитудно-частотную характеристику колебательного контура. В этом случае форма кривой задается выражением

$$A(f, Q, A_m, f_m) = \frac{A_m}{\sqrt{1 + \left(Q \frac{f - f_m}{f_m}\right)^2}},$$

где f_m , A_m – частота и амплитуда спектрального максимума, Q – акустическая добротность. Для их нахождения использованы следующие известные

величины амплитуд и соответствующих частот спектра: амплитуда A_1 при частоте f_1 , A_2 при f_2 , A_3 при f_3 .

Это позволило составить систему трех уравнений с тремя неизвестными

$$\begin{cases} A_1 = \frac{A_m}{\sqrt{1 + \left(Q \frac{f_1 - f_m}{f_m}\right)^2}} \\ A_2 = \frac{A_0}{\sqrt{1 + \left(Q \frac{f_2 - f_m}{f_m}\right)^2}} \\ A_3 = \frac{A_0}{\sqrt{1 + \left(Q \frac{f_3 - f_m}{f_m}\right)^2}} \end{cases} \quad (4.1)$$

Решение системы дает следующие выражения для искомых величин:

$$f_m = \frac{A_1^2 A_2^2 f_1^2 - A_1^2 A_2^2 f_2^2 - A_1^2 A_3^2 f_1^2 + A_1^2 A_3^2 f_3^2 + A_2^2 A_3^2 f_2^2 - A_2^2 A_3^2 f_3^2}{2A_1^2 A_2^2 f_1 - 2A_1^2 A_2^2 f_2 - 2A_1^2 A_3^2 f_1 + 2A_1^2 A_3^2 f_3 + 2A_1^2 A_3^2 f_2 - 2A_2^2 A_3^2 f_3}, \quad (4.2)$$

$$Q = \frac{f_0}{2} \sqrt{-\frac{A_1^2 - A_2^2}{A_1^2 f_0^2 - 2A_1^2 f_0 f_1 + A_1^2 f_1^2 - A_2^2 f_0^2 + 2A_2^2 f_0 f_2 - A_1^2 f_2^2}}, \quad (4.3)$$

$$A_m = A_1 \sqrt{1 + \left(Q \frac{f_1 - f_0}{f_0}\right)^2}. \quad (4.4)$$

Такой алгоритм хорошо аппроксимирует верхнюю часть графика, дает близкие значения полосы частот и добротности.

Из данных, по которым была построена кривая 1 на рис. 4.5, определены следующие частоты и соответствующие амплитуды в области максимума:

$$f_1 = 604 \text{ Гц}, A_1 = 5502 \text{ усл. ед.};$$

$$f_2 = 647 \text{ Гц}, A_2 = 8793 \text{ усл. ед.};$$

$$f_3 = 690 \text{ Гц}, A_3 = 2528 \text{ усл. ед.}$$

Расчет по формулам (4.2)-(4.4) дает следующие значения искомых величин: частота спектрального максимума $f_m = 631$ Гц, акустическая добротность $Q = 58$, амплитуда $A_m = 28080$ усл. ед.

По формулам таблицы 3.1 или соответствующим графикам на рис. 3.4 и 3.5 можно произвести оценку остаточной прочности пород на сжатие и растяжение.

Расчет по формуле (3.1) дает значение остаточной прочности при одноосном сжатии, равное

$$\sigma_{сж}^0(Q) = 13,979 \cdot \ln(Q) - 33,005 = 23,8 \text{ МПа.}$$

Для остаточной прочности породы при растяжении по формуле (3.2) получено значение

$$\sigma_p^0(Q) = 0,052 \cdot e^{0,056Q} + 1,514 = 2,8 \text{ МПа.}$$

Производя измерения акустической добротности с интервалом от нескольких месяцев до 1-2 лет, можно оценивать уменьшение остаточной прочности во времени и определять ресурс кровли и целиков подземных выработок. Решение данного вопроса требует самостоятельных исследований и не входят в задачи настоящей работы.

Для сравнения полученных значений остаточной прочности с напряжениями в кровле выработки и оценки коэффициента запаса прочности было произведено моделирование действующих напряжений с использованием программной среды COMSOL Multiphysics.

Моделирование проводилось применительно к шахте Новомосковского месторождения гипса. Модель представляет собой часть массива пород шириной 400 м и высотой 200 м. Кровля выработки высотой 11 м и шириной 10 м находилась на глубине 124 м. Размеры модели выбирались из условия превышения в 5 и более раз размеров выработки. На таких расстояниях возмущения напряжений, вызванных выработкой, сглаживались до напряжений нетронутого массива. Углы выработки имели закругления радиусом 0,2 м. Плотность пород 2200 кг/м^3 , модуль упругости $E = 30 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона 0,08. Вес пород задавался в виде произведения плотности пород на ускорение свободного падения с направлением вниз.

На боковых границах задавались ограничения в перемещениях по горизонтальному направлению, на нижней границе – ограничения в перемещении по вертикальному направлению. Верхняя граница оставалась свободной.

Расчет производился по методу конечных элементов. Форма элементов – треугольная, максимальный размер стороны треугольника 2 м, а вблизи выработки он менялся от 0,04 м в области сопряжений стенок выработки с ее кровлей до 0,8 м в центральной части стенок и кровли. Чертеж верхней части массива пород вокруг выработки с разбивкой по сетке представлен на рис. 4.7. Распределение вертикальных и горизонтальных напряжений вокруг выработки показано на рис. 4.8.

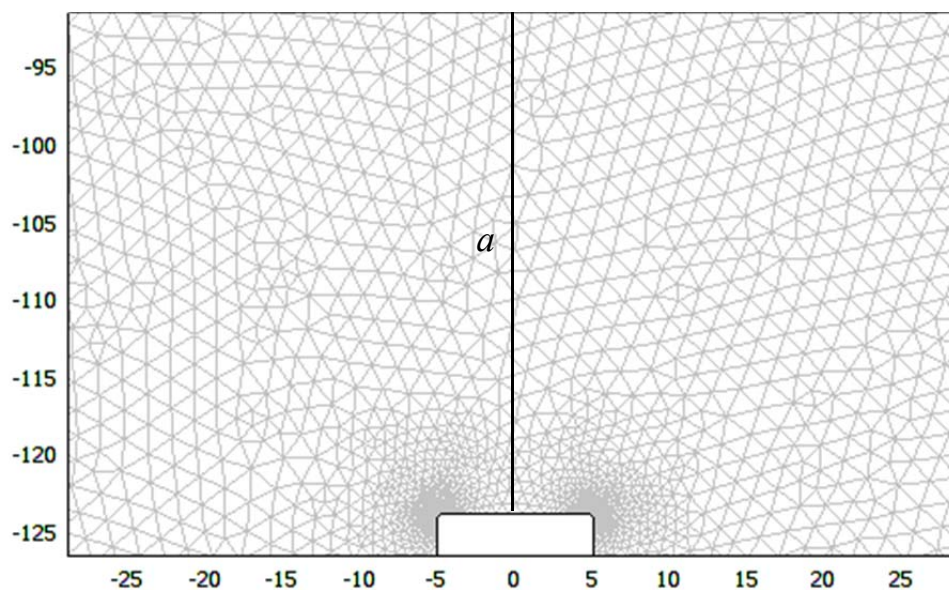


Рис. 4.7. Чертеж верхней части модели массива пород вокруг выработки с разбивкой по сетке, a – линия, вдоль которой рассчитаны вертикальные и горизонтальные напряжения

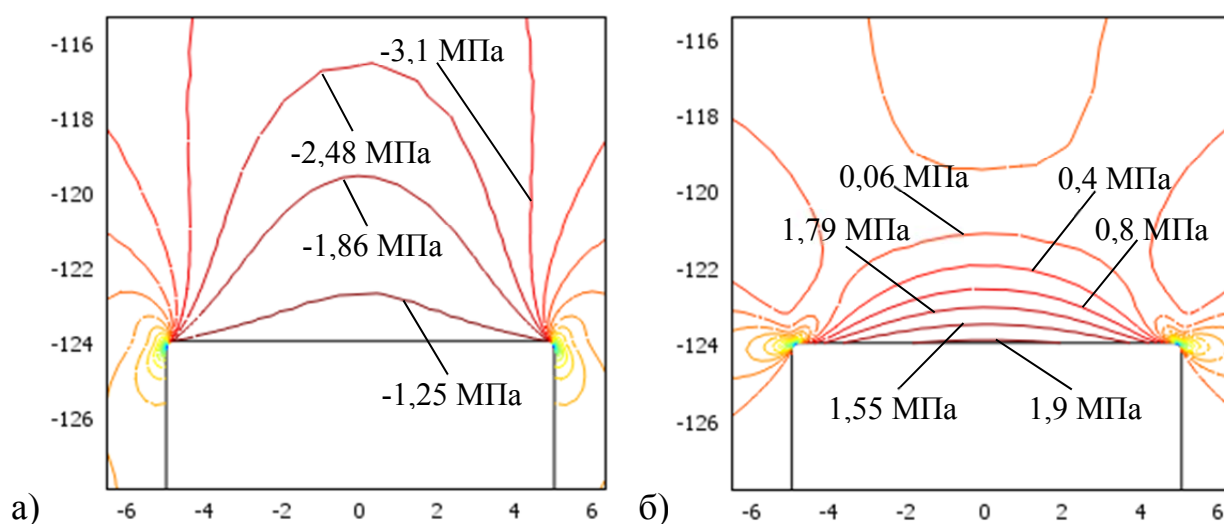


Рис. 4.8. Распределение вертикальных (а) и горизонтальных (б) напряжений вокруг выработки

Буквой *a* на рисунке 4.7 показана линия, вдоль которой рассчитаны вертикальные и горизонтальные напряжения и построены их графики в зависимости от глубины по отношению к поверхности кровли. Эти графики представлены на рис. 4.9.

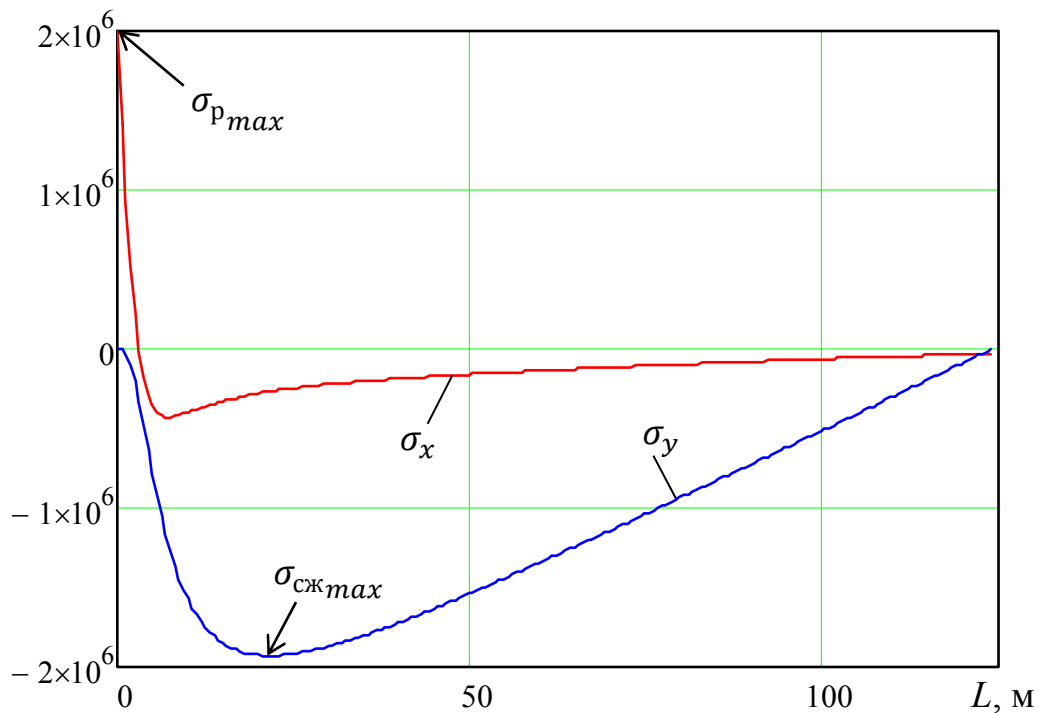


Рис. 4.9. Графики зависимостей вертикальных σ_y и горизонтальных σ_x напряжений в кровле от глубины L

На этих графиках отрицательные значения соответствуют сжимающим напряжениям, а положительный — растягивающим. Максимальное значение сжимающих напряжений (у компоненты σ_y) равно 1,9 МПа, а растягивающих (у компоненты σ_x) 2,0 МПа.

Запас прочности по сжимающим напряжениям (в данном случае вертикальным) равен отношению остаточной прочности к действующим напряжениям [41]

$$\xi_{сж} = \frac{\sigma_{сж}^0(Q)}{\sigma_{сж\max}} = \frac{23,8}{1,9} = 12,5.$$

Запас прочности по растягивающим напряжениям

$$\xi_p = \frac{\sigma_p^0(Q)}{\sigma_{p\max}} = \frac{2,8}{2} = 1,4,$$

где $\xi_{сж}$, ξ_p – коэффициенты запаса прочности по напряжениям сжатия и растяжения; $\sigma_{сж}^0(Q)$, $\sigma_p^0(Q)$ – остаточные прочности при одноосном сжатии и растяжении; $\sigma_{сж\max}$, $\sigma_{p\max}$ – действующие максимальные напряжения сжатия и растяжения в кровле соответственно.

Даже для минимально возможной остаточной прочности пород в массиве запас прочности имеет приемлемое значение.

Более глубокие и детальные исследования вопросов использования данного метода на натурных объектах представляют собой самостоятельную задачу, выходящую за рамки данной работы. Решение этой задачи потребует дополнительных исследований.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. На примере Новомосковского месторождения гипса проанализированы различные возможные методы определения акустической добротности горных пород в условиях современного горного предприятия с подземным способом добычи полезного ископаемого, к которым относятся ультразвуковое межшпуровое прозвучивание, анализ коды колебаний массива при взрывной отбойке, анализ отклика анкерной крепи и массива пород на ударное воздействие.

2. Показана принципиальная возможность определения остаточной прочности горных пород в натурных условиях по ее взаимосвязям с акустической добротностью, при этом акустическая добротность определяется путем анализа отклика установленной в кровле анкерной крепи на ударное воздействие.

3. По результатам натурных измерений акустической добротности в качестве одного из примеров получено значение $Q=58$. Оценка остаточной прочности дает значение $\sigma_{сж}^0(Q) = 13,979 \cdot \ln(Q) - 33,005 = 23,8$ МПа при сжатии и $\sigma_p^0(Q) = 0,052 \cdot e^{0,056Q} + 1,514 = 2,8$ МПа при растяжении.

4. На основе компьютерного моделирования напряжений в кровле методом конечных элементов, показано, что даже при минимально возможной остаточной прочности пород в массиве запас прочности конструктивных элементов системы разработки имеет приемлемое значение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований решена задача обоснования и разработки метода неразрушающего контроля остаточной прочности горных пород на основе ее взаимосвязи с акустической добротностью, позволяющего прогнозировать остаточную прочность пород без механических испытаний, что имеет значение для повышения качественного информационного обеспечения эффективного и безопасного ведения горных работ.

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

1. Предложена и обоснована методика определения взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью горных пород, предусматривающая подготовку группы образцов, первичное измерение акустической добротности, испытание на прочность трех из них, усталостные механические нагружения в заранее заданном количестве, определяемом типом пород, повторное измерение акустической добротности, определение остаточной прочности, построение графиков и определение регрессионной зависимости между акустической добротностью и остаточной прочностью, которая используется при прогнозе последней без механических испытаний путем измерения акустической добротности пород исследуемого объекта.

2. Для исследованных типов горных пород существует зависимость между акустической добротностью и остаточной прочностью, при этом остаточная прочность образцов осадочных, изверженных и метаморфических горных пород может быть определена по их акустической добротности на основании указанной зависимости, получаемой в процессе усталостного циклического нагружения породы; при увеличении числа циклов остаточная прочность и акустическая добротность известняков и габбро уменьшаются,

а для мрамора они уменьшаются при количестве циклов менее 50 и увеличиваются при количестве циклов более 50.

3. При механическом усталостном механическом нагружении взаимосвязь между акустической добротностью и остаточной прочностью горных пород при одноосном сжатии аппроксимируется логарифмической зависимостью, а между акустической добротностью и остаточной прочностью при одноосном растяжении – экспоненциальной.

4. Для образцов гипсосодержащих пород Новомосковского месторождения масштабный фактор влияет на их взаимосвязь между акустической добротностью и остаточной прочностью при одноосном сжатии, что обуславливает необходимость проведения испытаний на образцах стандартных размеров; при испытаниях на одноосное растяжение масштабный фактор не оказывает влияние на взаимосвязь между акустической добротностью и остаточной прочностью.

5. Обоснован подход к оценке остаточной прочности горных пород в массиве на основе зависимости между $\sigma^0(Q)$, при этом для определения акустической добротности используется спектральный анализ отклика на ударное воздействие по анкеру, установленному в массиве горных пород.

6. Разработаны методические рекомендации «Методические рекомендации по определению взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью горных пород», которые переданы в научно-исследовательские организации для практического использования, которые переданы в ООО «Газпром геотехнологии» и ФГБУН ИПКОН РАН, где приняты к использованию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Баклашов И.В., Картозия Б.А., Шашенко А.Н., Борисов В.Н. Геомеханика: Учебник для вузов. В 2 т. – М.: Издательство МГГУ, 2004. – Т. 2. Геомеханические процессы. – 249 с.: ил.
- 2 Геологическая энциклопедия Геологический словарь: в 2-х томах. — М.: Недра. Под редакцией К. Н. Паффенгольца и др. 1978.
- 3 Горная энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия. Под редакцией Е. А. Козловского. 1984—1991
- 4 Джегер Ч. Механика горных пород и инженерные сооружения. М.: Мир, 1975. - 256 с.
- 5 Бейдин А. В. Влияние трещиноватости горных пород на устойчивость приконтурного породного массива // 11 Международная научно-практическая конференция «Кулагинские чтения», Чита, 28 нояб.- 2 дек., 2011. Ч. 3. Чита.- 2011.- С. 42-45.
- 6 Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 200.- 334 с.
- 7 Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах.- М.: Недра, 1985. — 271 с.
- 8 Захаров В.Н., Малинникова О.Н., Трофимов В.А., Филиппов Ю.А. Оценка устойчивости оползневого склона и развития его деформаций во времени // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.- 2014.- № 6.- С. 11-22.
- 9 Ольховатенко В. Е., Трофимова Г. И. Характеристика физико-механических свойств горных пород Ерунаковского Южного месторождения // Горно информационно-аналитический бюллетень.- 2013, № 12.- С. 95-105.
- 10 Рыбин П. С. Обоснование параметров уступа слоистых пород, заоткошенных по наслоению, при комбинированном способе разработки рудных месторождений // 7 Международная научно-практическая конферен-

- ция «Наука и новейшие технологии при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых», Москва, 30 марта-5 апр., 2012: Материалы конференции. М., 2012, с. 71-72.
- 11 Барышев В. М., Сайтбурханов В. Ю. Анализ геомеханического состояния массива горных пород Тагильского железорудного района // Изв. вузов. Горный журнал.- 2006, № 3.- С. 23-25.
- 12 Черданцев Н. В. Устойчивость целиков в окрестности системы выработок прямоугольного сечения, сооружаемых в анизотропном по прочности массиве горных пород // Вестн. науч. центра по безопас. работ в угол. пром-сти ВостНИИ.- 2012, № 2.- С. 110-114.
- 13 Дрибан В. А. Устойчивость горных выработок в структурно-неоднородных массивах // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2008, № 9.- С. 305-312.
- 14 Гаркушин П. К., Болотников А. В., Мурзабеков Ф. Т. Устойчивость геомеханических систем из разновысоких камер и целиков // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2008, № 8.- С. 325-328.
- 15 Синкевич Н. И. Исследование изменения устойчивости обнажений массива горных пород Казского месторождения с глубиной // Перспективные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: Труды 8 Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 13-14 июня, 2001. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ. 2001, с. 180-181.
- 16 Назаров Л.А., Назарова Л.А. О связи деформационных свойств нарушений сплошности в породном массиве и их фрактальной размерности // Физическо-технические проблемы разработки полезных ископаемых.— 2008, № 5.- С. 3-13.
- 17 Chen Hong-kai, Tang Hong-mei. Способ расчета времени устойчивости трещин для управления удароопасным горным массивом. Method to calculate fatigue fracture life of control fissure in perilous rock // Appl. Math. and Mech. Engl. Ed.- 2007. 28, N 5.- С. 643-649.

- 18 Гореликов В. Г., Горшков Л. К., Кононова Н. С. Оценка устойчивости упруго-пластичного массива вблизи подготовительных горных выработок // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений: Труды Международной конференции, Екатеринбург, 18-20 мая, 2004. Екатеринбург: Изд-во УГГГА. - 2004.- С. 244-248.
- 19 Кошелев А. Е. Экспериментальное определение модуля деформации каменной соли в сложном напряженном состоянии // Горный журнал. – 2012.- № 9.- С. 56-57.
- 20 Виттке В. Механика скальных пород. Пер. с нем. М.: Недра, 1990. - 439 с.
- 21 Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. Л.: Недра, 1989.- 488 с.
- 22 Чирков С.Е. Зависимость прочности горных пород при сдвиге от вида напряженного состояния // Физическая мезомеханика.- 2007.- Т. 10.-№4.- С. 39-40
- 23 Синкевич Н. И. Закономерности изменения предела прочности пород от глубины в зонах влияния горных выработок при отработке рудных месторождений полезных ископаемых на участках неактивных и динамически активных магматических массивов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2009, N 11.- С. 39-42, 1 ил., 1 табл.
- 24 Полухин В. А., Белодедов А. А., Сащенко В. В. Влияние длины лавы и глубины ее расположения на устойчивость пород горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2007.- № 12. - С. 255-259.
- 25 Никифоров С. Э. Учет структурно-тектонических особенностей породного массива при определении устойчивости откосов карьеров // Материалы Семинара ИПКОН РАН и Ростехнадзора «О повышении полноты и комплексности использования запасов полезных ископаемых при их добыче и переработке», Анапа, 4-8 окт., 2004. М.: Киммерийский центр.- 2005. С. 64-71, 5 ил., табл. 1.

- 26 Мамбетов Ш. А., Баканов Н. Б. Геомеханическая оценка породного массива месторождения «Трудовое» // Вестн. КРСУ.- 2009, 9, № 11.- С. 95-99.
- 27 ГОСТ Р 50544-93. Породы горные. Термины и определения. Госстандарт России. Утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 31.03.93 № 101. Дата введения 01.07.94. - 105 с.
- 28 ГОСТ 30330-95. Породы горные. Термины и определения. – 1995.- 105 с.
- 29 Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика горных пород. М.: «Недра», 1975. – 271 с.
- 30 Баклашов И.В. Геомеханика: Учебник для вузов. В 2 т. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – Т. 1. Основы геомеханики. – 208 с.
- 31 Барях А.А., Маловичко А.А., Шумихина А.Ю. Формирование зон техногенной нарушенности над выработанным пространством калийных рудников // Физическо-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996, №2. – С. 36-47.
- 32 Влох Н.П. Управление горным давлением на подземных рудниках: Производственно-практическое издание. – М.: Недра, 1994. - 208 с.
- 33 Griffith, A. A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921.- 221.- P. 582–593.
- 34 Кадомцев А.Г., Дамаскинская Е.Е., Куксенко В.С. Особенности разрушения гранита при различных условиях деформирования // ФТТ, 2011.- т.53, 9.- С. 1777-1782.
- 35 Черепанов Г.П., Ершов Л.В. Механика разрушения. Монография / М.: Машиностроение, 1977. – 224 с.
- 36 Певзнер М.Е., Иофис М.А., Попов В.Н. Геомеханика: Учебник для вузов. – М.: Горная книга, 2008.- 437 с.

- 37 Каспарьян Э. В., Козырев А. А., Иофис М. А., Макаров А. Б. Геомеханика. – М.: Высшая школа, 2006. – 504 с.
- 38 Lockner, D.A., J.D. Byerlee, V. Kuksenko, A. Ponomarev and A. Sidorin A. Observations of Quasistatic Fault Growth from Acoustic Emissions, in Fault // Mechanics and Transport Properties of Rocks.- Ed. B. Evans and T.-F. Wong. London: Academic Press, 1992.- P. 3-31.
- 39 Курленя М. В., Опарин В. Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. I // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 1999. - № 3. – С. 12-26.
- 40 Курленя М. В., Опарин В. Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. II // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2000. - № 4. - С. 3-26.
- 41 Макаров А.Б. Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров. – М.: Издательство «Горная книга», 2006. – 391 с.
- 42 Милетенко И.В., Милетенко Н.А., Одинцев В.Н. Новый геомеханический подход к прогнозу опасных гидрогеологических процессов при подземной разработке твердых полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2011.- № 7. - С. 103-108.
- 43 Одинцев В.Н. Отрывное разрушение массива скальных горных пород. Монография. М.: ИПКОН РАН, 2006. — 168 с.
- 44 Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. Изд. 3-е. перераб. и доп.- М.: Недра, 1978. - 390 с.
- 45 Баклашов, И. В. Прочность незакрепленных горных выработок / И. В. Баклашов, К. В. Руппенейт. Москва: Недра.- 1965.-102 с.
- 46 Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок М.: Недра, 1976. — 272 с.
- 47 Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Издательство «Наука», 1974. – 640 с.

- 48 Рахматуллин Х.А., Шемякин Е.И., Демьянов Ю.А., Звягин А.В. Прочность и разрушение при кратковременных нагрузках. М.: Логос, 2008.- 616 с.
- 49 Шемякин Е. И., Курленя М. В., Кулаков Г. И. К вопросу о классификации горных ударов // Физическо-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1986, № 5.
- 50 Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. - М.: Наука, 1974, 560 с.
- 51 Kuksenko V., N. Tomilin, E. Damaskinskaya, and D. Lockner, A two-stage model of fracture of rocks // Pure Appl. Geophys. 1996. V.146. N2. P.253-263.
- 52 Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. М.: Недра, 1979. - 269 с.
- 53 Протоdjяконов М.М., Чирков С.Е. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве. – М.: Наука, 1964. - 69 с.
- 54 Коршунов В. А., Карташов Ю. М., Козлов В. А. Определение показателей паспорта прочности горных пород методом разрушения образцов сферическими инденторами // Зап. Горн. ин-та. -2010., 185.- С. 41-45.
- 55 Шпаков П. С., Поклад Г. Г., Ожигин С. Г., Долгоносов В. Н. Выбор прочностных показателей пород для расчета параметров устойчивых откосов // Маркшейдерия и недропольз.- 2003, N 2. С. 37-41, Табл. 7 ил.. Библ. 4.
- 56 Li H. B., Zhao J., Li T. J. (School of Civil and Structural Engineering, Nanyang Technological University, Block N1, No. 1A-37, Nanyang Avenue, 639798, Singapore). Микромеханическое моделирование механических свойств гранита при действии динамических одноосных сжимающих нагрузок. Micromechanical modelling of the mechanical properties of a granite under dynamic uniaxial compressive loads // Int. J. Rock Mech. and Mining Sci.- 2000. 37, N 6.- С. 923-935, Рис. 8., табл. 2.

- 57 Erarslan N., Williams D. J. The damage mechanism of rock fatigue and its relationship to the fracture toughness of rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science.- 2012. 56.- Pp. 15-26.
- 58 Черданцев Н. В., Преслер В. Т., Изаксон В. Ю. К оценке устойчивости анизотропного по прочности массива горных пород с системой протяженных цилиндрических выработок // Изв. вузов. Горн. ж..- 2008, N 8. С. 66-70.
- 59 Su Yong-hua, Li Xiang, Zhao Ming-hua, Xie Zhi-yong. Вероятностный расчет устойчивости горных пород в окрестности тоннеля, предполагающий случайное распределение их параметров // Jisuan lixue хиебао=Chin. J. Comput. Mech.- 2010. 27, N 1.- С. 120-126.
- 60 Падуков В. А. Деформационно-энтропийный критерий прочности горных пород, устойчивости горных выработок // Зап. горн. ин-та.- 2009. 180. С. 176-178.
- 61 Левин Б.В., Шейнин В.И., Блохин Д.И., Фаворов А.В. Инфракрасная диагностика отклика геоматериалов на импульсные и ударные нагрузки // ДАН.- 2004, Т. 395.- № 6.- С. 822-824.
- 62 Блохин Д. И., Вознесенский А. С., Кудинов И. И., Набатов В. В., Шейнин В. И. Опыт использования геофизических методов для оценки фактических конструктивных параметров железобетонных фундаментных плит // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2011, № 2. - С. 283-289.
- 63 Вознесенский А.С. Системы контроля геомеханических процессов: 2-е изд. - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2002.- 152 с.
- 64 Voznesenskiy A.S., Viljamov S.V. Features of acoustic emission at various influences on rock samples // Proc. Of «Acoustics'08», Paris, June 29-July 4, 2008. Paris, 2008.- Pp. 2585-2590.

- 65 Загорский Л.С., Шкуратник В.Л. Метод определения вертикального сейсмического разреза массива горных пород с использованием волн типа Рэлея // Акустический журнал.- 2013, 59.- № 2.- С. 222-231.
- 66 Захаров В.Н. Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений. – М.: ФГУП ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, 2002. - 172 с.
- 67 Исаев Ю.С. Опыт применения акустической интроскопии геологических нарушений выемочных столбов на шахтах комбината «Тулауголь» и «Новомосковскуголь» // Осушение шахтных и карьерных полей и шахтная геофизика: Сб. тр. ПНИУИ. М., 1973.
- 68 Лавров, А. В. Пространственная локализация разрушения как причина вариаций амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии // Акустический журнал. – 2005, Том 51, №3. - С. 383-390.
- 69 А.В. Лебедев, Л.А. Островский, А.М. Сутин, И.А. Соустова, П.А. Джонсон. Резонансная акустическая спектроскопия при низких добротностях // Акустический журнал.- 2003, том 49, № 1.- С. 92-99.
- 70 Леонтьев А. В., Попов С. Н. Использование измерительного гидроразрыва в практике геомеханических исследований // Геомеханика в горном деле: Сб. докл. междунар. конф. (19-21 нояб. 2002 г.). - Екатеринбург: Изд-во ИГД УрО РАН, 2003. - С. 3-11.
- 71 Вознесенский А. С., Тамарин Д. В., Тавостин М. Н., Набатов В. В., Коновалов Е. Н. Электромагнитное излучение и акустическая эмиссия в гипсе при его деформировании // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2005, № 5.- 83-86.
- 72 Вознесенский А.С., Нарышкин Д.А., Тавостин М.Н. Пространственно-временная корреляция параметров акустической эмиссии на различных стадиях деформирования горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2010, № 7.- 189-200.

- 73 Шкуратник В.Л., Николенко П.В. Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород. М.: МГГУ, 2012. – 111 с.
- 74 Шкуратник В.Л., Новиков Е.А. О взаимосвязи термостимулированной акустической эмиссии скальных горных пород с их пределом прочности при сжатии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2012, №4. – С. 44-51.
- 75 Курленя М. В., Опарин В. Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. Новосибирск: Наука, 1999.- 335 с.
- 76 Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003.- 270 с.
- 77 Рубан А. Д., Варганов А. З., Ковпак И. В. Методология формирования и применения геолого-геофизических моделей в целях геоконтроля при освоении подземного пространства мегаполисов // Горный журнал.- 2010, № 4.- С. 22-28.
- 78 Соболев Г.А. Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987.- 126 с.
- 79 Лавров А.В., Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. М.: Горная книга, 2004.- 456 с.
- 80 Яковлев Д.В. Геофизические исследования геомеханических процессов // Эффективная и безопасная подземная добыча угля на базе современных достижений геомеханики: Сб. тр. ВНИМИ. СПб.: ВНИМИ. - 1996.- 156 с.
- 81 Ямщиков В. С. Контроль процессов горного производства: Учебник для вузов.- М.: Недра, 1989, 446 с.
- 82 Ямщиков В. С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов. Учебник для вузов. М.: Недра, 1982.- 296 с.
- 83 Паничкин С. А. Методика оценки геомеханического состояния массива пород методом сейсмической томографии // Техногенная сейсмичность

- при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика: Сборник докладов Международного совещания, Кировск, 14-16 апр., 2004. Ч. 2. Апатиты: Изд-во КНЦ РН. 2004, с. 111-123.
- 84 Файзуллин И. С., Файзуллин Т. И. О преобладающем механизме затухания сейсмических волн в твердых горных породах // Геофизика, 2008, № 6.- С. 18-21.
- 85 Шейнин В. И., Блохин Д. И., Дружинская Д. С. Влияние скорости нагружения образцов геоматериалов на кинетику измеряемых термомеханических параметров // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Материалы Юбилейной 20 Международной научной школы им. академика С. А. Христиановича, Алушта, 20-26 сент., 2010. Симферополь: Таврич. нац. ун-т. 2010, с. 377-381.
- 86 Хмелевской В.К., Бондаренко В.М и др. Электроразведка: Справочник геофизика. В двух книгах/Под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. Книга первая.-2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1989 - 438 с.
- 87 Новиков Е. А. О влиянии трещиновидных дефектов структуры скальных геоматериалов на их термоакустическую эмиссию // Сборник трудов Научной конференции «Сессия Научного совета РАН по акустике и 25 Сессия Российского акустического общества», Таганрог, 17-20 сент., 2012. Т. 1. Физическая акустика. Нелинейная акустика. Распространение и дифракция волн. Акустоэлектроника. Геоакустика. М.. 2012, с. 345-348.
- 88 Шкуратник В.Л., Новиков Е.А. Физическое моделирование влияния размеров минерального зерна на акустическую эмиссию геоматериалов при их нагревании // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2012, №1. – С. 12-19.
- 89 Черепецкая Е. Б., Шкуратник В. Л., Месяц С. П. Оценка нарушенности и анизотропии геоматериалов методом лазерной ультразвуковой спектроскопии // Глубокие карьеры: Сборник докладов Всероссийской научно-

- технической конференции с международным участием, Апатиты, 18-22 июня, 2012. Апатиты; СПб. 2012, с. 456-461.
- 90 Ржевский В.В., Ямщиков В.С. Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. М.: Изд-во «Наука», 1973.- 224 с.
- 91 Ямщиков В.С. Ультразвуковые и звуковые методы исследования горных пород. М.: Московский институт радиоэлектроники и горной электромеханики, 1974. - 72 с.
- 92 Машинский Э. И. Аномалии затухания амплитуды акустических волн малой интенсивности в горных породах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2008, №4. – С. 24-31.
- 93 Ulrich, T. J., McCall, K. R., and Guyer, R. A., 2002. Determination of elastic moduli of rock samples using resonant ultrasound spectroscopy. J. Acoust. Soc. Amer., 111, 4, 1667-1674.
- 94 Tittmann, B.R., Abdel-Gawad, M., and Housley, R.M., 1972. Elastic velocity and Q-factor measurements on Apollo 12, 14, and 15 rocks. Proceedings of the Third Lunar Science Conference (Supplement 3, Geochimica et Cosmochimica Acta), The M.I.T. Press, Vol. 3, pp. 2565-2575.
- 95 Shkuratnik, V. L., and Danilov, G. V., 2005. Investigation into the Influence of Stresses on the Velocities of Elastic Waves in the Vicinity of an Elliptical Mine Working, Journal of Mining Science, 41, 3, 195–201. (Translated from Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh, 2005, 3, pp. 3–10).
- 96 Ayling, M.R., Meredith, P.G. & Murrell, S.A.F., 1995 Microcracking during triaxial deformation of porous rocks monitored by changes in rock physical properties. I. Elastic-wave propagation measurements on dry rocks, Tectonophysics, 245(3–4), 205–221.
- 97 Eslami, J., Grgic, D. & Hoxha, D., 2010. Estimation of the damage of a porous limestone from continuous (P- and S-) wave velocity measurements under uni-

- axial loading and different hydrous conditions, *Geophysical Journal International*, Vol. 183, 1362–1375.
- 98 Eslami, J., Hoxha, D. & Grgic, D., 2012. Estimation of the damage of a porous limestone from continuous wave velocity measurements during uniaxial creep tests under different hydrous conditions, *Mechanics of Materials*, 49, 51–65.
 - 99 Fortin, J., Schubnel, A. & Guéguen, Y., 2005. Elastic wave velocities and permeability evolution during compaction of Bleurswiller sandstone, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 42, 873–889.
 - 100 Sarout, J., Molez, L., Guéguen, Y. & Hoteit, N., 2007. Shale dynamic properties and anisotropy under triaxial loading: Experimental and theoretical investigations, *Phys. Chem. Earth*, 32(8–14), 896–906.
 - 101 Sayers, C.M., Van Munster, J.G. & King, M.S., 1990. Stress induced ultrasonic anisotropy in Berea sandstone, *Int. J. Rock Mech.*, 27, 429–436.
 - 102 Scott, T.E., Ma, Q. & Roegiers, J.C., 1993. Acoustic velocity changes during shear enhanced compaction of sandstone, *Int. J. Rock Mech.*, 30, 763–769.
 - 103 Maury, V., Broseta, D., Nichita, D., Fitzenz, D., Blanco, J., 2014. Changes of pore fluid thermodynamic conditions and compressibility in active fault core: implications for acoustic waves velocities and fault stability, 10th Euroconference on Rock Physics and Rock Mechanics, Aussois, France, 12 - 15 May 2014, 21-22.
 - 104 Fortin, J., Stanchits, S., Dresen, G. and Gue'guen, Y., 2006. Acoustic emission and velocities associated with the formation of compaction bands in sandstone, *Journal of geophysical research*, vol. 111, B10203, doi:10.1029/2005JB003854
 - 105 Wassermann, J., Senfaute, G., Amitrano, D. and Homand, F., 2009. Evidence of dilatant and non-dilatant damage processes in oolitic iron ore: P-wave velocity and acoustic emission analyses, *Geophys. J. Int.*, 177, 1343–1356.

- 106 Hamiel, Y., Lyakhovsky, V., Stanchits, S., Dresen, G. and Ben-Zion, Y., 2009. Brittle deformation and damage-induced seismic wave anisotropy in rocks, *Geophys. J. Int.*, 178, 901-909.
- 107 Борисенко Д.И. Акустический способ диагностики очагов пожаров в угольных пластах // *Уголь*.- 2013.- № 9 (1050).- С. 44-45.
- 108 Pellet, F.L., and Fabre, G. Damage evaluation with P-wave velocity measurements during uniaxial compression tests on argillaceous rocks, *International journal of geomechanics*, 2007, 7, 6, 431-436.
- 109 Шкуратник В. Л., Новиков Е. А., Ошкин Р. О. Экспериментальное исследование термостимулированной акустической эмиссии образцов горных пород различных генотипов при одноосном нагружении // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2014. – №2. – С. 69-76.
- 110 Тарантин М. В. Акустические параметры соляной толщи по данным волнового акустического каротажа // 4 Уральская молодежная научная школа по геофизике, Пермь, 25-28 марта, 2003: Сборник учебно-научных материалов. Пермь: Изд-во Горн. ин-та УрО Р Н. 2003, с. 212-216.
- 111 Keshavarz, M., Pellet, F. L., and Loret, B. (2010), Damage and Changes in Mechanical Properties of a Gabbro Thermally Loaded up to 1,000 °C, *Pure and Applied Geophysics*, 167, 1511-1523.
- 112 Winkler, R.W., and Murphy, W.F., Acoustic Velocity and Attenuation in Porous Rocks, In *Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants Vol. 3*, 1995, pp. 20–34, <http://www.agu.org/books/rf/v003/>
- 113 А.А. Добрынина, В.В. Чечельницкий, В.А. Саньков. Сейсмическая добротность литосферы Юго-западного фланга байкальской рифтовой системы // *Геология и геофизика*, 2011, т. 52, № 5, С. 712—724.
- 114 Orlando L. Semiquantitative evaluation of massive rock quality using ground penetrating radar // *J. Appl. Geophys.* 2003. 52, N 1, pp. 1-9.

- 115 В.В. Жадин, И.П. Шумский. Механическая добротность как мера их трещиноватости // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1976, № 2.- С. 40-43.
- 116 Цай Б. Н. Масштабный фактор при оценке прочности горных пород // Изв. вузов. Горный журнал.- 2009, № 3.- С. 59-64.
- 117 Койфман М.И. Главный масштабный эффект в горных породах и углях // Проблемы механизации горных работ.- М: АН СССР, 1963. – С. 39-56.
- 118 Голямина И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. М.: «Советская энциклопедия», 1979. - 400 с.
- 119 Вознесенский А.С., Куткин Я.О., Красилов М.Н. К вопросу измерения акустической добротности горных пород методом резонансной акустической спектроскопии // Сборник трудов XVI международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», 28-30 сентября Москва, 2 октября Борок 2015, с. 65-69.
- 120 Лебедев А.В., Островский Л.А., Сутин А.М., Соустова И.А., Джонсон П.А. Резонансная акустическая спектроскопия при низких добротностях // Акустический журнал, 2003, 49, выпуск 1.-С. 92-99
- 121 Вознесенский А.С., Куткин Я.О., Красилов М.Н. Взаимосвязь акустической добротности с прочностными свойствами известняков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.- 2015.- №1.- С. 30-39.
- 122 Куткин Я.О., Вознесенский А.С., Красилов М.Н., Тавостин М.Н., Осипов Ю.В. Оценка влияния масштабного фактора на взаимосвязь акустической добротности и прочности горных пород [Электронный ресурс] // Ученые записки физического факультета МГУ.- 6, 146313 (2014) [сайт].- URL: <http://uzmu.phys.msu.ru/file/2014/6/146313.pdf> (дата обращения 10.07.2015).
- 123 COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс] // [Сайт] URL: <http://www.comsol.com/> (дата обращения 11.07.2015).

- 124 Таблицы основных свойств пьезокерамических материалов ПКР, изготавливаемые Отделением сегнетопьезоэлектрических материалов, приборов и устройств НИИ физики ЮФУ [Электронный ресурс] // Отделение сегнетопьезоэлектрических материалов, приборов и устройств НИИ физики ЮФУ [сайт].- URL: <http://www.piezotech.ru/PKR.htm> (дата обращения: 10.07.2015).
- 125 Тригер Е. В., Бородин В. З., Резниченко Л. А., Турик А. В. Стабильность поляризованного состояния пьезокерамики различной степени сегнетожесткости // Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы.- №9, 2006.-С. 1-4.
- 126 Янчич В.В. Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения: Учебное пособие.- Ростов-на Дону: Южный федеральный университет.-2008.-77 с. [Электронный ресурс] URL: http://iitt.fvt.sfedu.ru/files/documents/up/UP_Datchiki_uskoreniya.pdf (дата обращения 10.07.2015).
- 127 Вознесенский А.С., Куткин Я.О., Красилов М.Н. Компьютерное моделирование работы пьезопреобразователей в устройствах контроля строения, свойств и состояния горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013.- № 8.- С. 59-63.
- 128 Голубцов М.Г. Электромеханические фильтры радиочастот.- Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1957.- 48 с.
- 129 Voznesenskii A.S., Shkuratnik V.L. & Kutkin Ya.O. Dynamics of thermal and mechanical loading as a cause of acoustic emission in rock // Proceedings of the first international conference on rock dynamics and applications (Roc-Dyn-1), Lausanne, Switzerland, 6-8 June 2013. pp. 429-435.
- 130 Вознесенский А.С., Вильямов С.В., Куткин Я.О. Компьютерное моделирование термонапряжений в геоматериале, как источников акустической

- эмиссии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011.- № 8.- С. 181-188.
- 131 Voznesenskii A.S., Kutkin Ya.O., Krasilov M.N. Interrelation of the acoustic Q-factor and strength in limestone // Journal of Mining Science.- 2015, January, Volume 51, Issue 1.- Pp 23-30.
- 132 Pelleg J. Mechanical Properties of Materials. In: Solid mechanics and its applications. Volume 190. Series Editors: G.M.L. GLADWELL. Department of Civil Engineering. University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1. Springer Dordrecht Heidelberg New York London.-2013.-644 pp.
- 133 Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975.- 456 с.
- 134 Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2002.- 248 с.
- 135 Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. Циклическая прочность металлических материалов: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001.- 61 с.
- 136 Damaskinskaya E.E., Kuksenko V.S., Tomilin N.G. A two-stage model of rock failure. Izvestia, Physics of the solid Earth. English translation of Fizika Zemli.- 1994.-№ 10.- С. 47-52. (Translation into English).
- 137 Шкуратник В.Л. Измерения в физическом эксперименте. 2-е издание дополненное и исправленное. Москва: Горная книга; 2002.
138. Определение оптимальных параметров камер и целиков при разработке месторождения гипса Сталиногорского гипсового комбината. Отчет по теме №13. Ленинград: ВНИМИ, 1959.-166 с.
- 139 Определение оптимальных параметров камер и целиков при разработке месторождения гипса Сталиногорского гипсового комбината. Отчет по теме №15. Ленинград: ВНИМИ, 1958.-56 с.
- 140 Aki, K. (1969). Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves, J. Geophys. Res. 74,615–631.

- 141 Aki, K. and B. Chouet (1975). Origin of coda waves: source, attenuation and scattering effects, J. Geophys. Res. 80, 3322–3342.
- 142 А.А. Добрынина, В.В. Чечельницкий, В.А. Саньков. Сейсмическая добротность литосферы Юго-западного фланга байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика, 2011, т. 52, № 5, С. 712—724.
- 143 Rautian T.G., Khalturin V.I. The use of coda for determination of the earthquake source spectrum // BSSA, 1978, v. 68, p. 923—948.
- 144 Набатов В.В. Исследование воздействия промышленного взрыва на массив пород вокруг выработок Новомосковского рудника // Горный информационно-аналитический бюллетень.-2001.-№3.- С. 104-106.
- 145 Вознесенский А.С., Набатов В.В. Характеристики сейсмических волн при взрывах в условиях подземного гипсового рудника. Сборник трудов XI сессии Российского акустического общества. Т. 2. Акустические изменения, геоакустика, электроакустика, ультразвук. - М: Геос, 2001, с. 113-117.
- 146 Voznesenskii A.S., Kutkin Ya.O., Krasilov M.N, Rafat G., Peters S. Features of the acoustic quality factor and the strength interdependencies of limestone samples of the different sizes // Reports of the XXIII international scientific symposium «Miner's week – 2015». М.: Издательский дом МИСиС. НИТУ «МИСиС». -2015.- С. 44-50.
- 147 Вознесенский А.С., Куткин Я.О., Красилов М.Н. О возможности оперативной оценки состояния анкерного крепления и кровли подземных горных выработок акустическими методами // Наукові праці УкрНДМІ НАН України, Донецьк: УкрНДМІ НАН України, 2013, Випуск 13 Частина I, с. 183-196.
- 148 Вознесенский А.С., Куткин Я.О., Красилов М.Н. О возможности определения резерва прочности анкерного крепления кровли методами неразрушающего контроля // Труды XX конференции с участием иностранных

ученых «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», Новосибирск, 07-11 октября 2013 г., с. 337-342.