

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, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

Научный руководитель

Вознесенский Александр Сергеевич,

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля

Официальные оппоненты:

Трофимов Виталий Александрович,

доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук», ведущий научный сотрудник отдела № 5 «Проблем геомеханики и разрушения горных пород»

Борисенко Дмитрий Иванович,

кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского», доцент кафедры холода кондиционирования и вентиляции

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева» (КузГТУ)

Защита диссертации состоится «___» _____ 2015 г. в ___ ч. ___ мин.

на заседании диссертационного совета Д 212.132.16 при НИТУ «МИСиС» по адресу: 119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС» и на сайте НИТУ «МИСиС» www.misis.ru.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук

А.С. Вознесенский

Общая характеристика работы

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 диссертационной 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 нарушения 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:

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.

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 иностранных 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.

Основное содержание работы

Анализ публикаций в области прогнозирования прочности горных пород по их взаимосвязям с другими физическими свойствами и обоснование направления исследований

В рамках работы приведён аналитический обзор современного состояния проблемы неразрушающих методов оценки прочности горных пород. Особое место в ней проблеме занимает определение остаточной прочности. Согласно ГОСТ Р 50544-93 под остаточной прочностью понимается уровень сохранившейся прочности разрушенной породы, равный соответствующим максимальным напряжениям при данном значении предельной деформации. В нашем случае мы будем понимать остаточную прочность как уровень сохранившейся прочности породы после воздействия таких факторов ее снижения, как температура, механические напряжения, влажность и других.

Большой вклад в развитие данной проблемы внесли работы, выполненные в ОАО ННЦГП ИГД им. А.А. Скочинского, ФГБУН ИПКОН РАН, ГИ КНЦ РАН, ИГД СО РАН, ФГБУН ИГД УрО РАН, ФТИ имени А.Ф. Иоффе, ФГБУН ГИ УрО РАН, ФГБУН ИДГ РАН и других.

Теоретическим и экспериментальным исследованиям прочности горных пород, в том числе геофизическими методами, посвятили свои работы Баклашов И.В., Барях А.А., Влох Н.П., Вознесенский А.С., Дамаскинская Е.Е., Ершов Л.В., Захаров В.Н., Иофис М.А., Картозия Б.А., Козырев А.А., Куксенко В.С., Курленя М.В., Макаров А.Б., Новиков Е.А., Одинцев В.Н., Опарин В.Н., Протоdjяконов М.М., Протосеня А.Г., Регель В.Р., Ржевский В.В., Рубан А.Д., Руппенейт К.В., Слуцкер А.И., Ставрогин А.Н., Томашевский Э.Е., Томилин Н.Г., Фисенко Г.Л., Черепанов Г.В., Чирков С.Е., Шемякин Е.И., Шкуратник В.Л., Ямщиков В.С. и другие ученые.

Как правило, определение прочности производится прямыми методами, т.е. путем механического разрушения. 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 регрес-

сионных зависимостях между остаточной прочностью и значениями измеряемых величин в выбуриваемых образцах.

Из всего многообразия геофизических методов исследования горных пород особо выделяются акустические методы, благодаря ряду их преимуществ и 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 связи акустической добротности с остаточной прочностью горных пород уделялось недостаточно внимания, либо такая связь не исследована вообще.

Эти обстоятельства с учетом цели работы позволяют сформулировать следующие основные задачи:

1. Анализ публикаций в области прогнозирования прочности горных пород по их взаимосвязям с другими физическими свойствами для конкретизации направления исследований.

2. Разработка методик исследования зависимости между остаточной прочностью и акустической добротностью горных пород.

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

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

5. Обоснование и разработка подхода к оценке остаточной прочности горных пород в массиве на основе ее взаимосвязи с акустической добротностью.

Установление закономерности между акустической добротностью и остаточной прочностью нарушенных горных пород на основании лабораторных экспериментов

В рамках диссертационной работы представлены результаты экспериментального исследования взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью $\sigma^o(Q)$ магматических, метаморфических и осадочных горных пород

Для исследования указанной зависимости были использованы оборудование и методика, описываемые ниже. Исследования предполагали механические и акустические испытания образцов пород.

Прочностные и усталостные испытания проводились на испытательных машинах Instron 5569 и Instron 300 DX, представленных на рис 1. Для управления этими машинами используется программное обеспечение Bluehill. Наибольшая предельная нагрузка у машин равна 50 и 300 кН соответственно.

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.

Акустическая добротность определялась методом резонансной акустической спектроскопии при возбуждении образца гармоническим сигналом и регистрации его колебаний с помощью пьезопластин. Акустическая добротность определялась по формуле

$$Q = \frac{f_1}{f_{\max} - f_{\min}}, \quad (1)$$

где f_1 – резонансная частота, определяемая по максимуму амплитуды первой моды гармонического сигнала; f_{\max}, f_{\min} – верхняя и нижняя частоты, соответствующие амплитуде сигнала на уровне $1/\sqrt{2}$ от ее максимального значения при резонансе.

Ориентировочное значение резонансной частоты на первой гармонике 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 акустической 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.

Исследование образцов производилось с помощью цифровых генератора SFG-2110 и осциллографа GDS-71022. Схема измерений и установка для их реализации представлены на рис. 1.

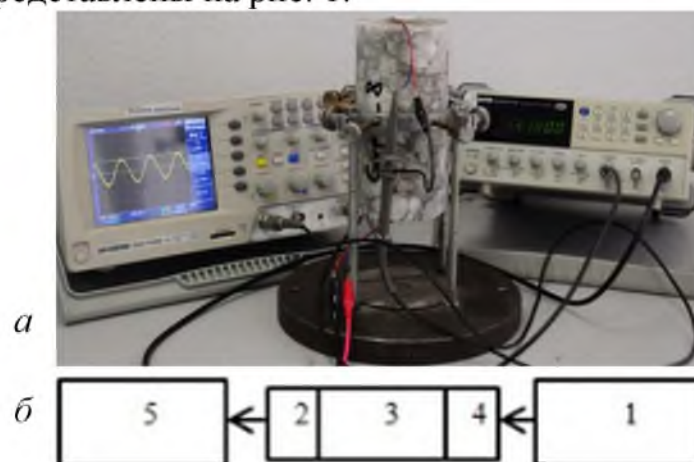


Рис. 1. Установка (а) и схема измерения (б) акустической добротности: 1 – генератор GW INSTEK SFG-2110, 2, 4 – пьезопластины, 3 – образец, 5 – осциллограф цифровой GW INSTEK GDS-71022

В работе произведен анализ влияния пьезопластин на измеряемые величины. Показано, что установка пьезопластин на образец оказывает влияние на добротность, не превышающее 3%.

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

1. Для получения одной кривой взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью $\sigma^o(Q)$ 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 акустической добротности Q и определение остаточной прочности σ^o каждого образца путем его однократного нагружения до разрушения.

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

Применение усталостного нагружения позволяет заменить длительный процесс накопления повреждений в геоматериале за счет естественных факторов искусственным относительно кратковременным воздействием, т.е. реализовать экспресс-метод испытаний.

В лабораторных экспериментах исследовались образцы известняка Тигинского месторождения, травертин месторождений области Денизли (Турция), габбро Головинского месторождения (Украина), мрамор одного из месторождений острова Тассос (Thassos, Греция), гипсодержащая порода Новомосковского месторождения. В результате исследований было установлено следующее:

- породы различных типов проявляют отчетливую взаимосвязь между акустической добротностью и остаточной прочностью, что может быть использовано для прогнозирования последней без разрушения геоматериала;

- в зависимости от типа пород кривые $Q(N)$ и $\sigma_{сж}^o(N)$ 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. При данном уровне усталостных нагружений мрамор проявляет пластическое упрочнение в отличие от пород других типов. Иллюстрация установленных закономерностей приведена на рис. 2.

Взаимосвязь между Q и $\sigma_{сж}^0$ для различных типов пород иллюстрируются графиками, представленными на рис. 3 и 4. Эта взаимосвязь может быть аппроксимирована логарифмической зависимостью, которая для уровня максимального нагружения до $0,3\sigma_{max}$ имеет вид

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

для уровня нагружения $0,5\sigma_{max}$ 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.

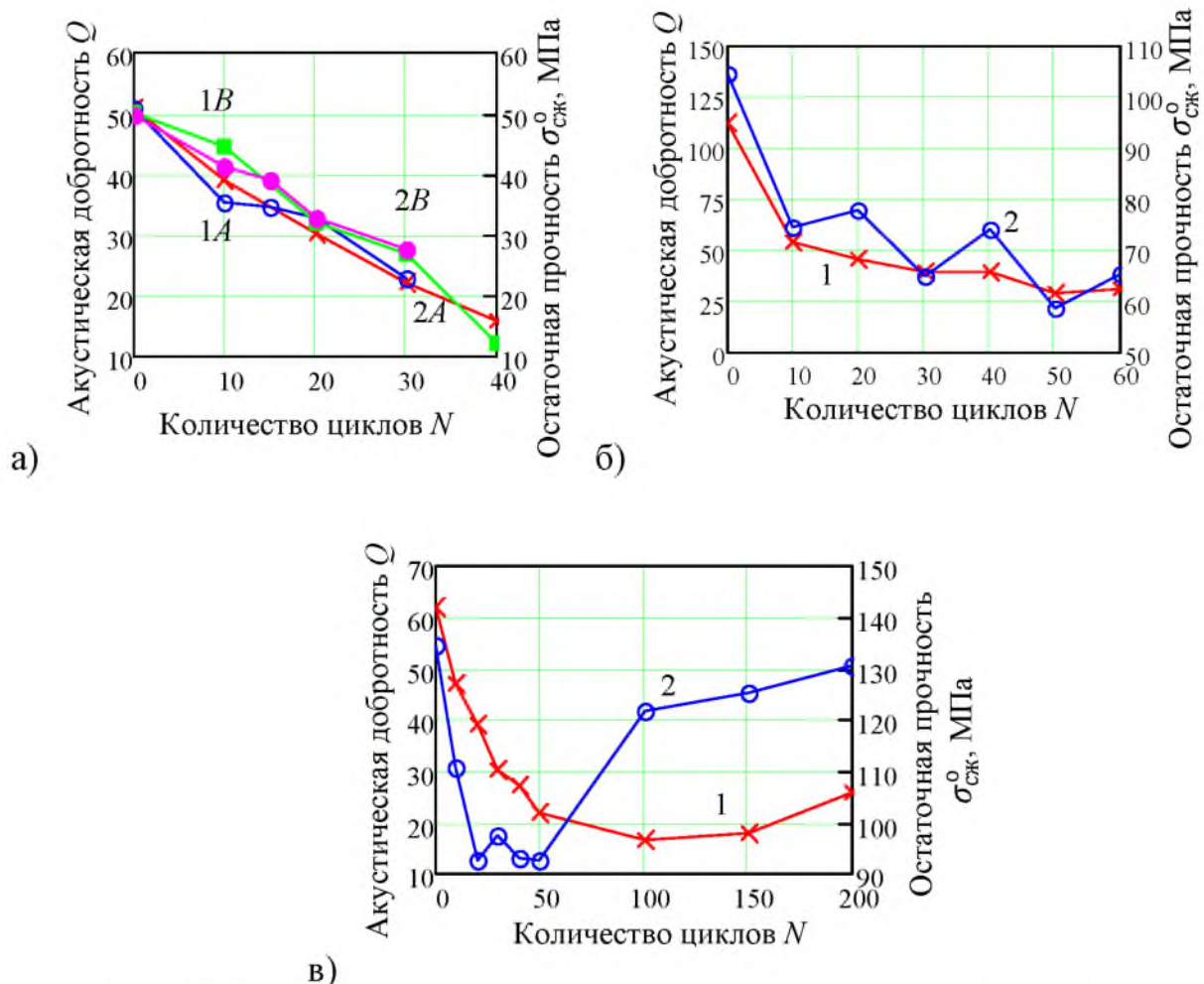


Рис. 2. Зависимости акустической добротности Q (1) и остаточной прочности при сжатии $\sigma_{сж}^0$ (2) от количества циклов N усталостного нагружения для известняка (а), габбро (б) и мрамора (в)

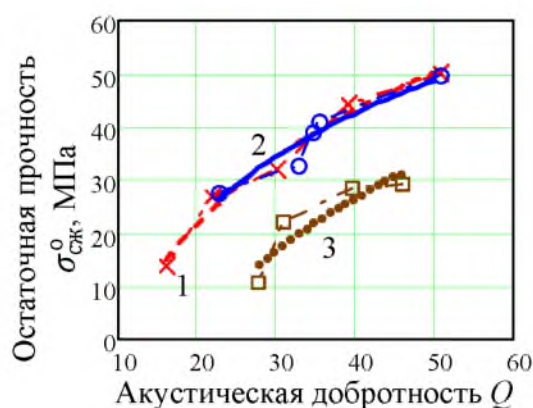


Рис. 3 Взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью при сжатии для осадочных пород: известняка при максимальной нагрузке $0,3\sigma_{max}$ (1), $0,5\sigma_{max}$ (2), и слоистого травертина при нагрузке $0,1\sigma_{max}$ (3)

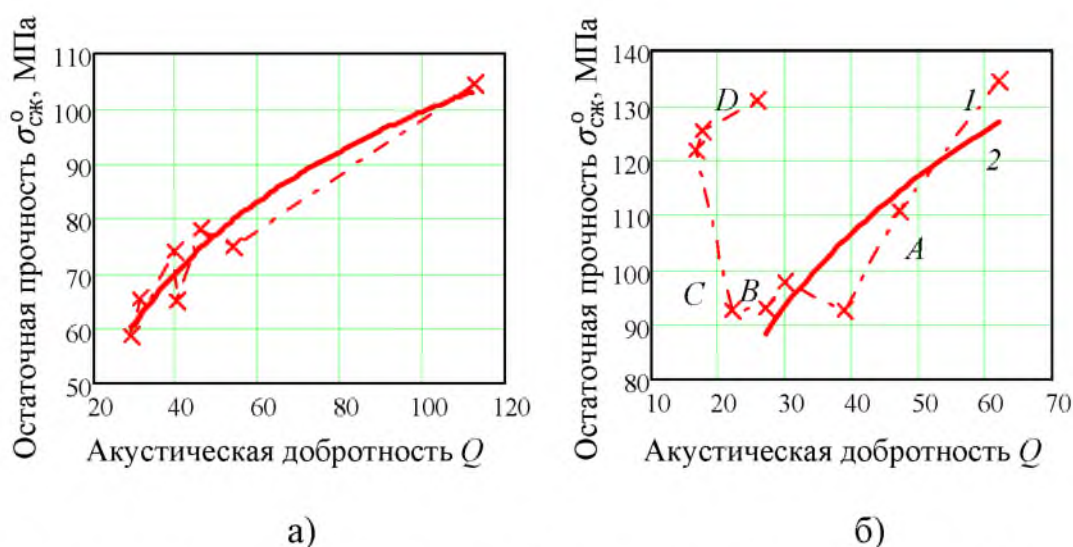


Рис. 4 Взаимосвязь между акустической добротностью и остаточной прочностью для магматических (габбро, а) и метаморфических (мрамор, б) пород

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. Схожая зависимость наблюдается и для габбро при максимальной циклической нагрузке $0,4\sigma_{max}$. Для этой породы аппроксимация экспериментальных данных логарифмической функцией дает следующую зависимость

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

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

Здесь, как и для известняков и травертина, проявляется такая же закономерность – при больших своих значениях акустическая добротность меняется сильнее, чем остаточная прочность. Т. е. акустическая добротность от-

ражает начальные стадии разрушения с большей чувствительностью, чем остаточная прочность.

Ход кривой $\sigma_{сж}^0(Q)$ для мрамора при уровне нагрузки $0,4\sigma_{max}$ сложнее. На участке *A* (рис. 4, б) 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. Аппроксимация участка *A* дает следующую зависимость

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

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

Сравнение взаимосвязи $\sigma^0(Q)$, получаемых в процессе усталостных испытаний при одноосном сжатии и растяжении образцов различных размеров

Для определения влияния вида напряженного состояния между собой сравнивались зависимости акустической добротности Q и остаточной прочности σ^0 образцов при усталостном многоцикловом одноосном сжатии и растяжении. Испытания образцов при растяжении производилось по «бразильской» схеме. Кроме того, для определения влияния масштабного фактора между собой сравнивались зависимости, полученные при испытании образцов двух диаметров 30 и 80 мм и высотами, в два раза превышающими диаметры при сжатии и равными им при растяжении.

На рис. 5 показаны графики зависимостей акустической добротности и остаточной прочности при сжатии $\sigma_{сж}^0$ гипсосодержащей горной породы Новомосковского месторождения от количества усталостных циклов.

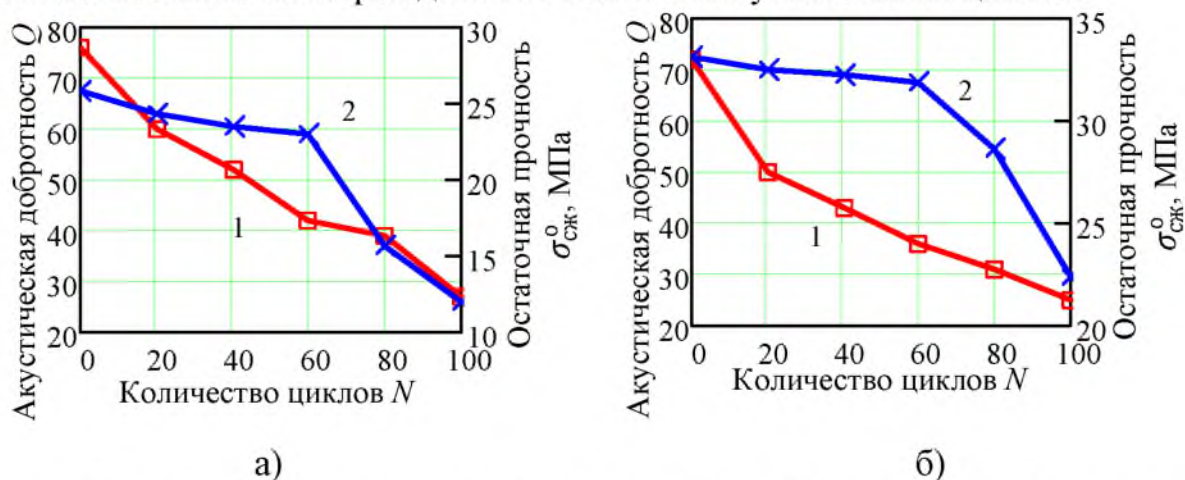


Рис. 5. Зависимости акустической добротности Q (1) и остаточной прочности при сжатии $\sigma_{сж}^0$ (2) от количества циклов N усталостного нагружения для образцов с размерами $\varnothing 80 \times 160$ мм (а) и $\varnothing 30 \times 60$ мм (б)

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.

На рис. 6 представлены графики зависимостей акустической добротности и остаточной прочности при *растяжении* σ_p^0 от количества усталостных циклов. В данном случае обе кривые выгнуты вниз, что отличает их от кривых на рис. 5.

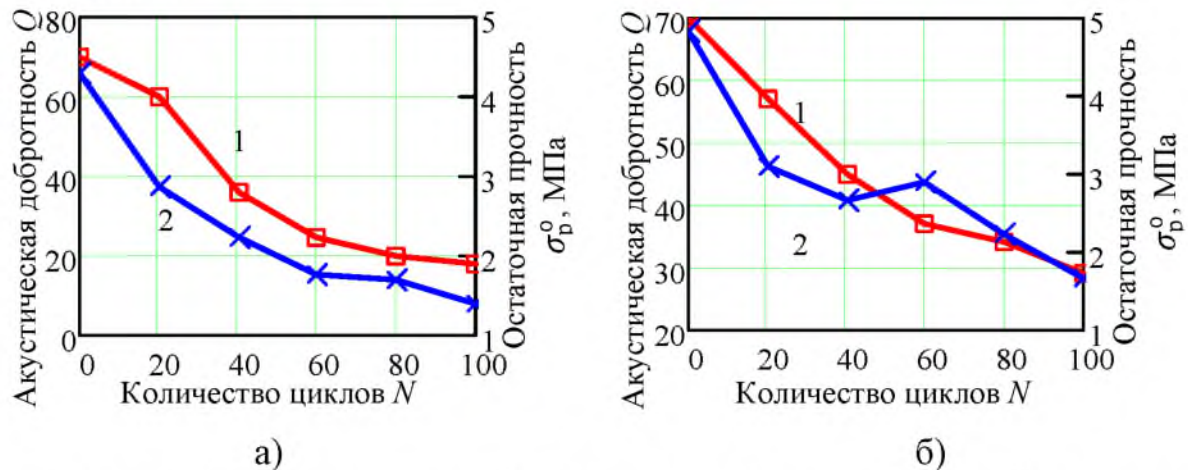


Рис. 6. Зависимости акустической добротности Q (1) и остаточной прочности при растяжении σ_p^0 (2) от количества циклов N усталостного нагружения для образцов с размерами $\varnothing 80 \times 80$ мм (а) и $\varnothing 30 \times 30$ мм (б)

Рис. 7 и 8 отражают взаимосвязи $\sigma_{сж}^0(Q)$ и $\sigma_p^0(Q)$ при сжатии и растяжении соответственно для образцов различного размера. В табл. 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. 1. Регрессионные зависимости $\sigma_{сж}^0(Q)$ и $\sigma_p^0(Q)$ при различных видах напряженного состояния и размерах образцов

Напряженное состояние, остаточная прочность	Размеры образцов, $\varnothing \times h$, мм	Вид зависимости $\sigma^0(Q)$, номер формулы	К-т детерминации R^2	С.к.о., МПа
Сжатие, $\sigma_{сж}^0$	80 x 160	$13,979 \cdot \ln(Q) - 33,005$ (2)	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)	0,966	1,383
Растяжение, σ_p^0	30 x 30	$0,151 \cdot e^{0,044Q} + 1,556$	0,899	1,309

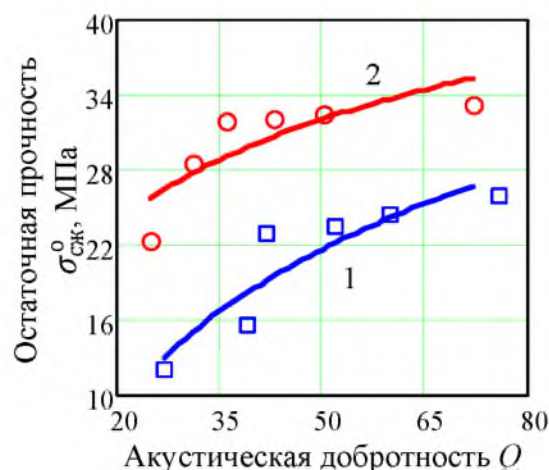


Рис. 7. Взаимосвязи между акустической добротностью Q и остаточной прочностью $\sigma^0_{сж}$ при одноосном сжатии $\sigma^0_{сж}(Q)$ образцов с размерами $\varnothing 80 \times 160$ мм (1), $\varnothing 30 \times 60$ мм (2)

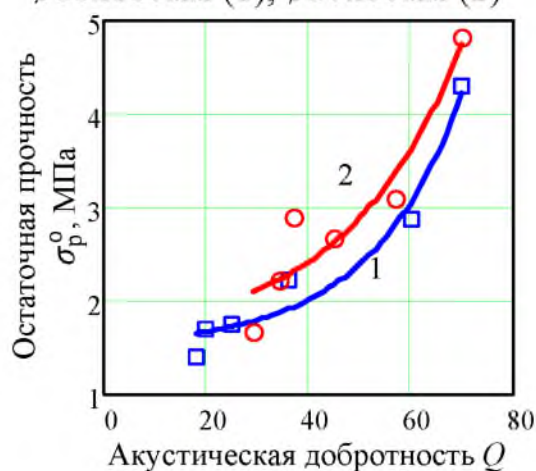


Рис. 8. Взаимосвязи между акустической добротностью Q и остаточной прочностью σ^0_p при одноосном растяжении $\sigma^0_p(Q)$ образцов с размерами $\varnothing 80 \times 80$ мм (1), $\varnothing 30 \times 30$ мм (2)

При оценке влияния на эту зависимость вида напряженного состояния можно в целом отметить, что при сжатии такая взаимосвязь аппроксимируется логарифмической зависимостью, а при растяжении – экспоненциальной.

Как следует из графиков зависимости $\sigma^0_{сж}(Q)$, полученных при испытании образцов пород при сжатии и приведенных на рис. 7, масштабный фактор (размер образцов), оказывает влияние на эти зависимости, т.к. кривые 1 и 2 на рис. 7 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. 8, полученных для зависимости $\sigma^0_p(Q)$ при одноосном рас-

тяжении, показывает, что влияние масштабного фактора на зависимость $\sigma_p^o(Q)$ при растяжении существенно меньше, чем при сжатии. Это проявляется в том, что кривые 1 и 2 на рис. 7 находятся дальше друг от друга, чем кривые 1 и 2 на рис. 8.

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

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

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.

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

Для измерения акустической добротности горных пород в условиях действующих предприятий может быть использовано несколько способов, к

которым, в частности, относятся анализ сейсмического сигнала при взрывах в забое и вибрационный отклик на удар при тестировании кровли и анкерного крепления. В нашем случае был использован второй способ.

В работе рассмотрено 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. Действие прибора основано на регистрации вибрационного отклика на удар по анкеру, установленного в кровле выработки. При увеличении трещиноватости пород снижаются их акустическая добротность, а также и остаточная прочность, что соответствующим образом отразится на регистрируемом сигнале. По измерению акустической добротности можно оценивать остаточную прочность пород.

На рис. 9 для примера 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 акустической добротности системы был рассчитан спектр этого сигнала, представленный на рис. 10.

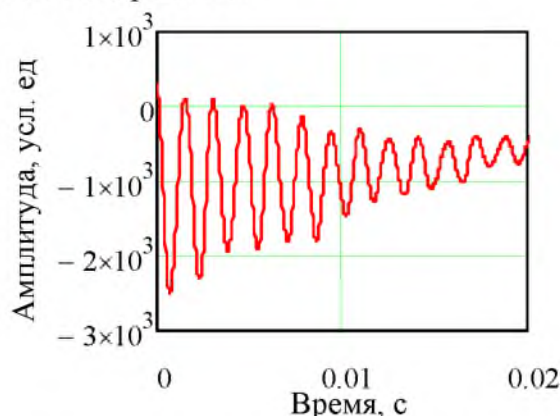


Рис. 9. Вид затухающего сигнала вибраций анкера при измерении прибором «Анкер-Тест»

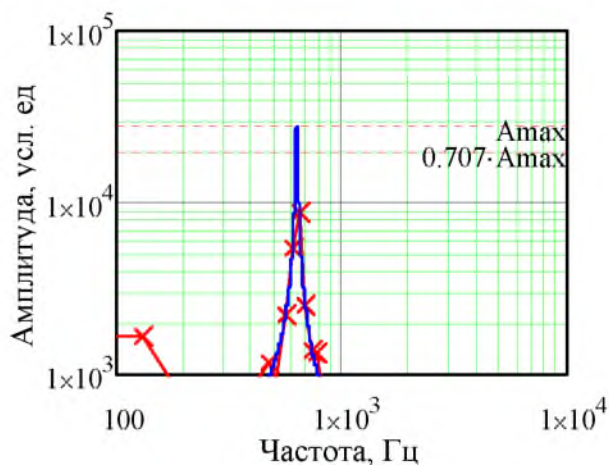


Рис. 10. Спектр сигнала, показанного на рис. 9

Цифровая обработка не дает точного значения частоты f_m максимума спектра из-за дискретности последнего. Значения f_m могут попасть в промежуток между отсчетами, что приведет к неточному значению 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. 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 . Для рассматриваемого примера расчет дал следующие значения искомых величин: частота спектрального максимума $f_m = 631$ Гц, акустическая добротность $Q = 58$, амплитуда $A_m = 28080$ усл. ед.

Расчет по формуле (2) 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) получено значение

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

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 представляла собой часть массива пород шириной 400 м и высотой 200 м. Кровля камеры высотой 11 м и шириной 10 м находилась на глубине 124 м. Размеры модели выбирались из условия превышения в 5 и более раз размеров камеры. 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 $0,04 \text{ м}$ в области сопряжений стенок выработки с ее кровлей до $0,8 \text{ м}$ в центральной части стенок и кровли. Чертеж верхней части массива пород вокруг выработки с разбивкой по сетке представлен на рис. 11. На рис. 12 приведены графики напряжений σ_y и σ_x в зависимости от глубины по отношению к поверхности кровли.

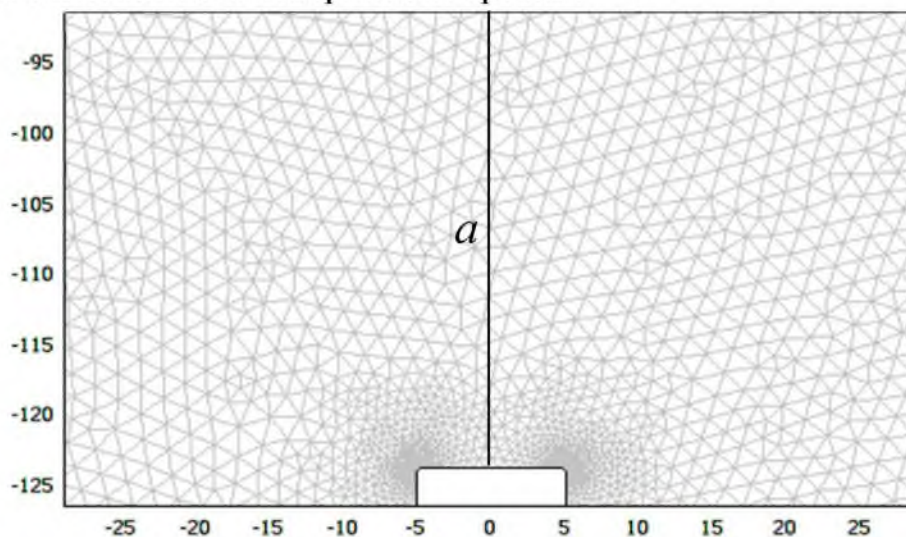


Рис. 11. Чертеж верхней части модели массива пород вокруг выработки с разбивкой по сетке, a – линия, вдоль которой рассчитаны вертикальные и горизонтальные напряжения

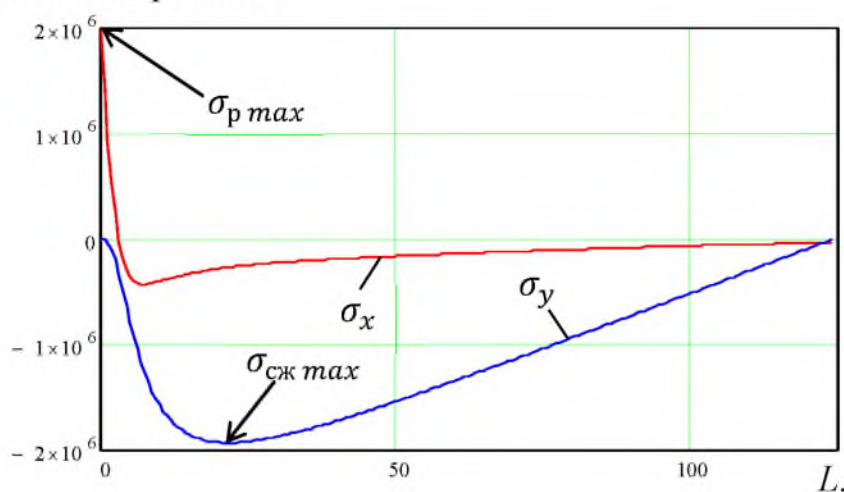


Рис. 12. Графики зависимостей вертикальных σ_y и горизонтальных σ_x напряжений в кровле от глубины L

На этих графиках отрицательные значения соответствует сжимающим напряжениям, а положительные – 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

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

Запас прочности по растягивающим напряжениям

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

где $\xi_{сж}$, ξ_p – коэффициенты запаса прочности по напряжениям сжатия и растяжения; $\sigma_{сж}^o(Q)$, $\sigma_p^o(Q)$ – 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 выводы по вопросу о возможности использования данного метода на натурных объектах потребуют дополнительного исследования. 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.

Выводы и рекомендации, полученные на основе проведенных исследований, позволили разработать «Методические рекомендации по определению взаимосвязи между акустической добротностью и остаточной прочностью горных пород», которые переданы в ООО «Газпром геотехнологии» и ФГБУН ИПКОН РАН, где приняты к использованию.

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 $\sigma^o(Q)$, 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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **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.

2. **Куткин Я.О.** Обоснование методики определения взаимозависимостей акустической добротности и прочности горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2014.- №12.- С. 346-351.

3. **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.

4. **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.

5. **Voznesenskii A. S., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A.** Predicting fatigue strength of rocks by its interrelation with the acoustic quality factor // International Journal of Fatigue.- 2015, Vol. 77, pp. 186-193.

6. **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 (Rock-Dyn-1), Lausanne, Switzerland, 6-8 June 2013.- Pp. 429-435.

7. **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.- 2014.- № 6.- 146313

8. **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», 07-11 октября 2013 г., Новосибирск.- 2013.- С. 337-342.

9. **Voznesenskii A.S., Kutkin Ya.O., Krasilov M.N., Rafat G., Peters S.** Features of the acoustic quality factor and the strength interdependencies of lime-

stone 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.

10. **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, Випуск 13 (частина І).- Донецьк: УкрНДМІ НАН України, 2013.- С. 183-196.

11. **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.