

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор общества с
ограниченной ответственностью
«Институт горной геомеханики и
геофизики – Межотраслевой
научный центр ГЕОМЕХ»,
д-р техн. наук, профессор



Яковлев Д.В..

«01» февраля 2022 года

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Общества с ограниченной ответственностью «Институт горной геомеханики и геофизики – Межотраслевой научный центр ГЕОМЕХ» на диссертационную работу Шибаетова Ивана Александровича на тему: «Разработка и обоснование метода определения динамических модулей упругости образцов горных пород с применением лазерной ультразвуковой диагностики», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.16 – «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»

Актуальность работы. На современном этапе развития технологий осуществляется переход к разработке месторождений на больших глубинах, где изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) массива при инженерном воздействии носит нелинейный характер. Становится актуальной задача более точного определения физико-механических свойств образцов, извлеченных с глубин, для последующего их использования при численном моделировании НДС. При извлечении из массива таких образцов происходит нарушение их сплошности, и механические испытания часто приходится проводить на образцах малых размеров, что приводит к погрешности при измерениях. Перспективным способом определения модулей упругости являются динамические методы с последующим использованием корреляционных связей между статическими и динамическими модулями упругости.

Динамические характеристики образцов горных пород определяются, как правило, по измеренным значениям скоростей ультразвуковых волн различных типов. Разработке комплексного метода прецизионного расчета скоростей

упругих волн с помощью лазерной ультразвуковой диагностики (ЛУД) и определения на их основе динамических модулей упругости посвящена данная диссертационная работа.

Структура и основное содержание диссертационной работы

Работа состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка использованной литературы, содержащего 139 источников, и 6 приложений. **Первая** глава содержит обзор современного состояния исследований статических и динамических упругих параметров образцов геоматериалов разными методами, для которых приведены сравнительные характеристики. Во **второй** главе приведено обоснование генерации упругой сдвиговой акустической волны на границах раздела «изотропное твердое тело-образец» и «образец-воздух» при падении широкополосных ультразвуковых пучков с гауссовым распределением амплитуды давления в поперечном сечении. Получены аналитические выражения для коэффициентов трансформации мод для каждой гармоники и всех значений лучевых параметров. Приведена разработанная аналитическая модель для расчёта временных форм акустических импульсов различных типов упругих волн, возникающих при падении на границу раздела двух изотропных твердых тел широкополосных ультразвуковых пучков, а также при отражении данных сигналов от границы раздела «образец-воздух». Здесь же проведена верификация полученных временных форм на основе компьютерного моделирования в среде Comsol Multiphysics. Таким образом был разработан оптимизационный алгоритм расчёта значений скоростей упругих волн на основе модельной временной формы сигнала. В **третьей** главе проведена апробация разработанного оптимизационного алгоритма определения скоростей упругих волн на модельных образцах. Модернизирована и автоматизирована экспериментальная установка теневого иммерсионного режима работ ЛУД Геоскан-02МУ (получен патент). Проведено сравнение данных, полученных разными методами ЛУД. Сравнение эхо-метода и оптимизационного метода показало, что существенный вклад в погрешность определения скоростей волн вносит сила прижима пьезоэлектрического

преобразователя и наличие или отсутствие контактной жидкости на поверхности исследуемого образца. Разница определения скоростей продольных волн оптимизационным методом и эхо-методом составила до 1,9%, сдвиговых волн до 4,8 %. Разработаны общие методические подходы к определению динамических модулей упругости образцов. В **четвертой** главе приведены результаты прецизионных измерений скоростей упругих волн образцов горных пород разного генотипа для определения динамических упругих модулей с помощью разработанной аналитической модели. Определены частотные диапазоны, в которых для образцов стандартных размеров дисперсия фазовой скорости незначительна, и последняя совпадает с групповой скоростью. На основе прецизионно измеренных скоростей рассчитаны модули упругости образцов различных генотипов. Разработана методика определения динамических модулей упругости в рамках ограниченного количества геологической информации.

Новизна исследований и научная значимость полученных результатов, выводов и рекомендаций.

Новизна проведенного автором исследования заключается:

- в обосновании генерации упругой сдвиговой акустической волны на границах раздела «изотропное твердое тело-образец» и «образец-воздух» при падении на первую границу широкополосных ультразвуковых импульсов с гауссовым распределением амплитуды давления по поперечному сечению;
- в расчете для эхо-режима коэффициентов конверсии всех типов волн на основе теории количественной сейсмологии;
- в разработке аналитической модели для расчёта полных акустических треков, включающих временные формы акустических импульсов различных типов упругих волн, возникающих при падении на границу раздела двух изотропных твердых тел широкополосных ультразвуковых пучков, а также при отражении данных сигналов от границы раздела «образец-воздух»;
- в обосновании возможности прецизионного измерения скоростей продольных и сдвиговых волн и определении по ним динамических модулей

упругости в рамках ограниченного количества геологической информации (на образцах малого размера);

- в обосновании выбора частотного диапазона, в котором для стандартных образцов горных пород дисперсия не существенна и совпадают фазовая и групповая скорости.

Научная значимость полученных в работе результатов заключается в теоретическом обосновании генерации сдвиговой волны, возникающей при падении ограниченных в поперечном сечении широкополосных ультразвуковых импульсов продольных волн на границы раздела сред, определении коэффициентов трансформации и временных форм всех типов волн, распространяющихся в образцах геоматериалов.

Это послужило основой для прецизионного измерения скоростей упругих волн двух типов, необходимых для расчёта динамических модулей упругости, что обеспечит повышение достоверности получаемой информации о физико-механических свойствах горных пород различных генотипов.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке методики определения динамических модулей упругости на основе прецизионного измерения скоростей упругих волн различных типов, а также в модернизации аппаратного и программного обеспечения для ее реализации. Внедрение данной методики позволит значительно оптимизировать и ускорить испытания для определения упругих свойств образцов горных пород различных генотипов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Все теоретические оценки, полученные аналитические выражения для временных форм ультразвуковых импульсов различных типов волн, разработанные алгоритмы и проведенное численное моделирование базируются на использовании при проведении исследований апробированных, хорошо зарекомендовавших себя методов и компьютерных пакетов

моделирования и обработки экспериментальных данных, а также средств измерений с высокими метрологическими характеристиками; и обеспечивают удовлетворительную воспроизводимость результатов.

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития геофизики и изучения физических свойств горных пород.

При увеличении глубин проведения горных работ возникает проблема сохранности прямого источника физико-механических свойств – керна горных пород. Также часто в процессе бурения и добычи керна происходит его механическое разрушение. Разработанный автором метод позволяет определять динамические упругие модули даже на образцах малых размеров, что позволит собирать статистически достоверные значения упругих свойств образцов горных пород при ограниченном объеме первичной геологической информации.

Разработанный автором метод и утвержденная методика могут быть рекомендованы для использования при решении задач геологических изысканий для проведения горных пород различным организациям – Федеральному государственному бюджетному учреждению науки «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова» РАН (г. Москва), Федеральному исследовательскому центру «Кольский научный центр» РАН (г. Апатиты), Федеральному государственному бюджетному учреждению науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта» РАН (г. Москва), Научно-исследовательскому институту горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевому научному центру «ВНИМИ» (г. Санкт-Петербург), Институту горной геомеханики и геофизики – Межотраслевому научному центру GEOMEX (г. Санкт-Петербург) и другим.

Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертациям.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что по актуальности, научной новизне и практической ценности диссертационная работа

заслуживает высокой оценки, соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.), также отвечает требованиям положения «О порядке присуждении ученых степеней в НИТУ «МИСиС».

Публикации и апробация результатов работы.

Все основные положения, результаты и выводы диссертации были представлены на многих всероссийских и международных конференциях («Неделя Горняка» 2018, 2020, «Актуальные проблемы недропользования» 2019, 2020, 2021», Всемирный конкурс докладов молодых ученых YPLC в 2021 г. и прочих). Результаты исследования опубликованы в 9 печатных работах, из которых 8 – в научно-технических журналах, входящих в базы данных Scopus и Web of Science, 5 – из перечня ВАК. Также автором были получены патент на изобретение и свидетельство о регистрации программы ЭВМ.

По работе имеются несколько замечаний, в целом, рекомендательного характера, которые заключаются в следующем:

1. Автор исследовал направления развития проблемы изучения ФМС горных пород на образцах. Как известно, важнейшей практической проблемой изучения ФМС является отнесение результатов этих измерений к горному массиву. В связи с этим представляет интерес сравнение этих методов и возможностей каротажных исследований ФМС в комплексе с керновым сканером (типа CoreScan,), которые позволяют учитывать структурные особенности горных пород и массива в целом.

2. На наш взгляд в работе недостаточно внимания уделено оценке корреляции с результатами измерения эталонными методами определения ФМС (ГОСТ 28985-91, ГОСТ 21153.7-75 и др.).

3. Стилистической ошибкой следует считать первый пункт параграфа 1.5 главы 1 (Выводы, постановка цели и задач исследования): «Провести анализ методов определения модулей упругости образцов горных пород», поскольку именно этому вопросу посвящена вся глава 1.

4.В тексте диссертации иногда присутствуют редакционные промахи (например, на стр.89 ссылку следовало делать на табл. 4.2, а не 4.3; количество «красных строк», в русском языке разделяющих мысли, можно сократить).

Заключение:

Представленная работа по своей актуальности, научной и практической значимости, обоснованности и достоверности основных результатов полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. В ней на основе проведённых автором исследований решена научная задача определения динамических модулей упругости, необходимых как для корреляции со статическими, так и для использования их значений в моделировании различных физических состояний массива горных пород, что имеет важное значение для обеспечения эффективности и безопасности ведения горных работ.

Соискатель Шибаетов Иван Александрович заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.16 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»

Отзыв подготовил Зам. Генерального директора Общества с ограниченной ответственностью «Институт горной геомеханики и геофизики – Межотраслевой научный центр ГЕОМЕХ», кандидат технических наук **Кругликов Вячеслав Павлович**. Отзыв ведущей организации по диссертационной работе Шибаетова Ивана Александровича заслушан и обсужден на заседании Ученого совета ООО «МНЦ ГЕОМЕХ», протокол № 2 от «28» января 2022 года.

Зам. Генерального директора общества
с ограниченной ответственностью
«Институт горной геомеханики и
геофизики – Межотраслевой научный
центр ГЕОМЕХ», кандидат технических
наук



Кругликов В.П.