

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию **Ефимова Евгения Александровича**

«Моделирование волновых движений в структурно-неоднородных средах блочного строения в пространственной постановке»,

представленную на соискание

ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела»

Диссертационная работа Ефимова Е.А. посвящена решению актуальной и важной задачи распространения волн в структурно-неоднородных средах блочного типа. Блочные среды, к которым относятся горные породы, льды, гранулированные материалы, являются примерами нелинейных систем, деформированное состояние которых не описывается в рамках классических моделей механики сплошной среды. Необходима разработка и развитие более совершенных математических моделей, учитывающих сложную реологию и иерархическое строение рассматриваемых неоднородных сред.

В настоящее время, с одной стороны, возникают все новые практические задачи, связанные с динамическим поведением блочных сред. Например, добыча трудноизвлекаемых запасов нефти и газа, освоение геотермальных ресурсов, адаптация к таянию вечной мерзлоты, поддержание работоспособности и безопасности изношенной инфраструктуры (здания, сооружения, плотины и т.д.), создание новых материалов с заданными свойствами и т.п. С другой стороны, в связи с ростом производительности современных вычислительных систем, появлением графических процессоров, а также с развитием численных алгоритмов появляются все новые инструменты, позволяющие эффективно решать такие сложные задачи. Таким образом, тема работы (разработка и совершенствование моделей блочных сред при исследовании происходящих в них динамических процессов) является чрезвычайно актуальной.

Диссертация обладает научной новизной, которая заключается в развитии известного подхода моделирования блочных сред с тонкими прослойками. Разработанные численные алгоритмы и программное обеспечение позволяют рассматривать задачи в пространственной постановке с учётом различной реологии блоков и прослоек, а также с учётом иерархичности блочной среды. Кроме того, автором оценены границы применимости используемых моделей.

Достоверность и обоснованность результатов исследования обусловлена использованием математических моделей, для которых выполняются фундаментальные законы механики деформируемого тела. Также используются вычислительные методы, которые хорошо апробированы для рассматриваемого автором типа задач. Сравнение численных результатов с рядом тестовых решений дополнительно подтверждает работоспособность предложенных алгоритмов. Достоверность также подтверждается сравнением результатов численного эксперимента с данными лабораторных измерений, которые были проведены другими авторами.

Теоретическая значимость диссертации состоит в разработке трёхмерной модели блочной среды с тонкими прослойками. На основе разработанной модели возможна проверка гипотез, связанных с построением эффективных моделей, которые могут заменить модель блочной среды с явным заданием прослоек. Модель прослоек в виде внутренних граничных условий позволяет в более простой форме формулировать определяющие соотношения на границах взаимодействующих блоков, тем самым существует возможность учёта более специфических реологических свойств прослоек без значительного усложнения реализованных алгоритмов.

Практическая значимость заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы при решении задач распространения волн в геологических и искусственных средах, когда существенную роль играет их блочная структура, а также когда важно учитывать специфику процессов, происходящих в межблочных прослойках.

Анализ содержания диссертации.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, трёх глав, заключения, одного приложения и списка литературы, содержащего 188 источников. Диссертация изложена на 136 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков и 10 таблиц.

Литературный обзор посвящён анализу современного состояния исследуемой темы. Сначала рассматриваются основные работы М. А. Садовского и его учеников, посвящённые разработке концепции блочного иерархического строения горных пород и изучению возникающих в них динамических эффектов. Затем анализируются работы, посвящённые математическому моделированию блочных сред. После чего проводится обзор источников, в которых изучаются механизмы затухания сейсмических волн, характерные для материалов горных пород. Заключительная часть литературного обзора посвящена рассмотрению конечно-разностных методов решения задач динамики деформируемых сред. Кроме того, отдельное внимание в этой части уделяется работам по построению неотражающих и слабоотражающих граничных условий для моделирования процессов в неограниченных средах.

В первой главе рассматривается математическая модель блочно-слоистой среды с однородными изотропными блоками, которые описываются уравнениями теории упругости. При этом для представления уравнений упругих прослоек используются внутренние граничные условия для блоков.

В первом разделе решается задача о взаимодействии плоской продольной монохроматической волны с прослойкой. С помощью анализа этого решения показано, что модель прослойки, полученная путём осреднения уравнений движения и определяющих соотношений теории упругости по толщине прослойки, может быть использована для моделирования волновых процессов в средах с достаточно тонкими и податливыми прослойками, а также

длинноволновых процессов. Таким образом, получена оценка границ применимости используемой модели прослоек.

В следующем разделе представлена система уравнений для трёхмерной блочной среды с однородными изотропными упругими блоками в форме параллелепипедов и тонкими упругими прослойками. При этом толщина прослоек много меньше размера блоков. Указано, что представленная математическая модель является термодинамически согласованной и удовлетворяет интегральному закону сохранения энергии.

Далее описывается численный алгоритм решения трёхмерных задач, основанный на методе двуциклического расщепления по пространственным переменным. Для решения одномерных расщеплённых задач предлагается два алгоритма. В одном для решения уравнений в блоках используется метод распада разрыва С.К. Годунова, а для прослоек уравнения решаются с использованием бездиссипативного варианта схемы Г.В. Иванова. Второй алгоритм основан на использовании схемы Г.В. Иванова с контролируемой диссипацией как для блоков, так и для прослоек. Для разработанных алгоритмов представлено описание их параллельной реализации для высокопроизводительных вычислительных систем кластерной архитектуры с распределённой памятью, включающей трёхмерную декомпозицию расчётной области, а также приведены результаты их тестирования.

В заключительной части главы рассматривается численное решение трёхмерной задачи Лэмба в блочном полупространстве. Сначала сравниваются решения, полученные с использованием двух разработанных алгоритмов, а затем выполняется сравнение с решением, полученным в рамках дискретно-периодической модели с жёсткими блоками. Из последнего сравнения следует, что решения становятся качественно схожими при условии достаточной податливости прослоек. Также сделан вывод, что в блочных средах возникают возмущения, вызванные деформацией прослоек. Причем амплитуда и период этих возмущений увеличиваются с ростом как толщины, так и податливости прослоек.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию процессов затухания волн в блочных средах с неупругими реологическими свойствами. Сначала рассматривается модель стандартного линейного тела, которая используется для учёта вязкоупругих свойств. При этом блоки предлагается описывать в рамках обобщённой модели стандартного линейного тела, которая позволяет обеспечить постоянную добротность в заданном частотном диапазоне. Далее приводится численный метод решения динамической задачи для рассматриваемой модели. Поскольку учёт вязкоупругих свойств при численной реализации происходит на отдельном этапе расщепления, то численный алгоритм несущественно отличается от алгоритма для решения задач в упругой блочной среде.

Важное значение имеет следующий раздел главы, в котором проводится сравнение результатов численного моделирования с лабораторным экспериментом, выполненным другими авторами. Эксперимент заключался в измерении осциллограммы ускорения при ударном воздействии на

закреплённую сборку из блоков. Показано, что результаты, полученные для модели с упругими блоками и вязкоупругими прослойками в плоской и пространственной постановке, хорошо согласуются с экспериментом. Хотя отмечается, что при задании параметров вязкоупругой модели присутствует некоторая произвольность, связанная с недостатком данных о материале прослоек.

Далее рассматриваются другие реологические модели прослоек. Сначала прослойки, описывающие пористый и разномодульный материалы в рамках одной модели с реологическим элементом «контакт». Такая модель позволяет учитывать эффект уплотнения межблочного материала, а также его разносопротивляемость растяжению и сжатию. После чего рассматриваются прослойки, учитывающие проскальзывание, описываемые в рамках упругопластической модели с пределом текучести, зависящим только от касательных напряжений на площадках взаимодействующих блоков.

В последнем разделе главы рассматривается модельная задача о развитии пластической деформации во включении, заглубленном в блочном полупространстве, при воздействии ударной нагрузки на свободной поверхности. Численно исследовано влияние типа сборки (слои, кубические блоки, кирпичная кладка), а также параметров блочной среды на объём пластически деформированного материала включения.

В третьей главе численно исследуются волновые поля, возбуждаемые импульсным сейсмоисточником в однородных, плоскостойких и блочных средах. В первом разделе для однородных и плоскостойких сред приводятся результаты, полученные в рамках осесимметричной постановки задачи теории упругости. Изучается влияние на амплитуду отражённого сигнала и энергоэффективность работы сейсмоисточника таких параметров, как длительность импульса и площадь платформы излучателя при фиксированной энергии 1кДж. Показано, что с ростом указанных параметров наблюдается увеличение как амплитуды сигнала, так и сейсмического КПД, причем влияние длительности импульса более заметное.

Во втором разделе при фиксированных характеристиках импульсного сейсмоисточника исследуется влияние параметров блочных сред на характер распространения волн. Показано, что изменение податливости прослоек, размера блоков и толщины прослоек слабо влияет на сейсмический КПД, в то время как амплитудно-частотные характеристики источника более чувствительны к изменению параметров прослоек. При этом качество отраженного от податливого включения сигнала существенно зависит от параметров блочной среды.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе, а также указаны перспективы развития предложенных подходов.

В приложении представлена копия свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Вопросы и замечания, возникшие при анализе диссертационной работы.

1. Насколько алгоритмы, разработанные автором, адаптируемы под архитектуру графических процессоров, и планируется ли в дальнейшем реализация с их использованием?
2. Замечание, даже не замечание, а рекомендация: рассмотреть в будущем формулировку для изучения волновых процессов в вязкоупругой среде в области временных частот. На мой взгляд, такой подход существенно расширяет набор механизмов затухания и позволяет не ограничиваться процессами с постоянной добротностью. Действительно, в природе существуют разнообразные процессы с более сложными механизмами поглощения упругой энергии, которые было бы очень интересно рассмотреть. В частности, к таким процессам относится растепление многолетнемёрзлых пород, особенно перекрывающих отложения газогидратов. Это очень важная и интересная задача в условиях изменчивости климата.

Приведенные замечания никоим образом не снижают общей положительной оценки работы.

Заключение.

Диссертация Е.А. Ефимова представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную в рамках актуального научного направления – динамики блочных сред. Работа выполнена на высоком научном уровне, содержит новые результаты в области численного моделирования волновых процессов в трёхмерно-неоднородных упругих средах со сложной реологией. Диссертация содержит ссылки на авторов и источники заимствования материала.

По основным результатам диссертационного исследования опубликовано 8 работ, 6 из них изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 6 индексируются в базах данных Web of Science или Scopus, 6 – в базах Scopus. Также зарегистрирована 1 программа для ЭВМ.

Научные результаты Ефимова Е.А. обсуждались на международных, всероссийских и региональных конференциях, что также свидетельствует о высоком уровне достоверности результатов диссертации и квалификации автора.

Результаты диссертации имеют высокую степень обоснованности и достоверности, обладают научной новизной и практической значимостью. Текст автореферата в полной мере отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа соответствует научной специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела» по четырём пунктам паспорта специальности, а именно:

2. Теория определяющих соотношений деформируемых тел с простой и сложной структурой.

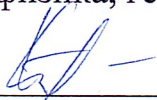
3. Задачи теории упругости, теории пластичности, теории вязкоупругости.
8. Динамика деформируемого твёрдого тела. Теория волновых процессов в средах различной структуры.
12. Вычислительная механика деформируемого твёрдого тела.

Диссертационная работа «Моделирование волновых движений в структурно-неоднородных средах блочного строения в пространственной постановке» соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Ефимов Евгений Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

Я, Хачкова Татьяна Станиславовна, согласна на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку и передачу в соответствии с требованиями Минобрнауки.

Официальный оппонент:

Старший научный сотрудник лаборатории численного моделирования многофизических процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, кандидат физико-математических наук (25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»)



Хачкова Татьяна Станиславовна

11 февраля 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук 630090, Новосибирская область, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, д.4

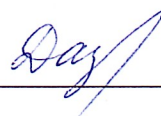
<https://math.nsc.ru/>

Телефон: +7 (383) 333-28-92

E-mail: im@math.nsc.ru

Подпись Хачковой Татьяны Станиславовны удостоверяю

Учёный секретарь ИМ СО РАН
к.ф.-м.н.



/ Н.А. Даурцева