

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Калачиковой Уйгулааны Семеновны

**«Многомасштабные вычислительные технологии для моделирования волновых процессов в неоднородных средах»**,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность работы. Как известно, численное моделирование волновых процессов в неоднородных и многомасштабных средах является основным инструментом получения новых знаний о структуре волновых полей и особенностях распространения акустических и сейсмических волн. Более того, алгоритмы решения прямой задачи для волнового уравнения являются неотъемлемой и наиболее трудоемкой частью процедур обработки сейсмических данных, таких как миграция в обратном времени и полное обращение сейсмических полей. При этом учет разномасштабности строения геологической среды (наличие скоплений трещин, каверн, тонких прослоев) является, пожалуй, наиболее сложной задачей сейсмического моделирования. Очевидно, что использование сеток, способных с достаточной точностью описать структурное строение таких сред, приводит к абсолютно неприемлемым размерностям задач и требует гигантских объемов оперативной памяти и числа операций для проведения моделирования. В настоящее время есть ряд подходов к решению такого рода задач: локальное измельчение сеток, аналитические и численные подходы к «осреднению» параметров модели и др. В представленной работе предлагается развитие наиболее перспективного, по моему мнению, метода – многомасштабного метода конечных элементов, в котором базисные функции на грубой сетке выбираются с учетом мелкомасштабного строения среды. В результате соискателю удастся проводить расчет волновых полей в средах с неоднородностями много меньшими, чем длина волны, используя при этом сетки сопоставимые с длиной волны - 5-10 ячеек сетки на длину волны. Несомненно, работа представляет научную и практическую ценность, а разрабатываемые и реализуемые соискателем алгоритмы следует применять для развития процедур обработки сейсмических данных.

Анализ структуры диссертации. Работа состоит из введения, трех глав и заключения.

Во введении автор приводит скрупулезный анализ современных подходов к моделированию волновых полей в неоднородных средах. Особенно хочется отметить, что

Калачикова У.С. не ограничивается только анализом теоретических основ алгоритмов, но обсуждает и доступные программные реализации, что говорит о ее способности объективно оценивать эффективность разрабатываемых ей алгоритмов и их программных реализаций.

Первая, наиболее содержательная, глава посвящена разработке и реализации в двумерной постановке обобщенного многомасштабного метода конечных элементов для расчета волновых полей в неоднородных многомасштабных средах. При этом отдельно рассматриваются модели трещиноватых сред и модели, содержащие резкоконтрастные рассеивающие объекты. Важно отметить, что метод реализован как для решения задач во временной области, так и в области временных частот. Обе постановки чрезвычайно важны при обработке сейсмических данных, что дополнительно повышает практическую ценность работы. Еще один положительный результат работы – результаты приводятся как для скалярного волнового уравнения и уравнения Гельмгольца, так и для системы уравнений динамической теории упругости. На мой взгляд, даже результатов, представленных в первой главе достаточно для присуждения Калачиковой У.С. ученой степени кандидата физико-математических наук.

Во второй главе Калачикова У.С. развивает методологию на случай моделей с перфорацией. С математической точки зрения такое обобщение нетривиально и, несомненно, заслуживает высокой оценки. Однако практическая значимость этих результатов неочевидна. При этом постановка задачи чрезвычайно актуальна для задач массопереноса, что и было отмечено в работе. Более того Калачиковой У.С. продемонстрирована применимость и эффективность многомасштабного метода конечных элементов к решению уравнения адвекции-диффузии в перфорированных моделях.

Третья глава описывает особенности программной реализации приведенных алгоритмов, и демонстрирует высокий профессионализм соискателя в области программирования. Глава состоит из двух разделов. В первом разделе описывается вычислительная библиотека для моделирования волновых процессов с использованием

обобщенного многомасштабного разрывного метода Галеркина. Второй раздел посвящен реализации вычислительной библиотеки для моделирования уравнения Гельмгольца в комплексных переменных с использованием обобщенного граничного многомасштабного метода конечных элементов.

В заключении, в соответствии с требованиями пункта 10 Положения о присуждении ученых степеней, дается оценка разработанных алгоритмов и их программных реализаций.

Автореферат диссертации в полной мере отражает ее выверенную структуру, содержит аккуратное описание постановок и решений задач, рассматриваемых в диссертации.

Достоверности результатов подтверждается результатами репрезентативных серий численных экспериментов.

Замечания.

1. В работе указано, что решены пять задач, три из которых - разработка нового метода. Несомненно, соискателем проделана большая работа, но называть каждый из разработанных алгоритмов методом, пожалуй, является преувеличением. Более того, едва ли следует говорить о разработке методов, скорее речь идет о применении многомасштабного и обобщенного многомасштабного метода конечных элементов к уравнению Гельмгольца и уравнению конвекции-диффузии. Кстати, что означает «задача Гельмгольца»? Есть уравнение Гельмгольца, а для задачи нужно конкретизировать граничные условия, но, в любом случае, устойчивого термина «задача Гельмгольца» нет.
2. На странице 24 в первой формуле потерь штрафной параметр, который вновь появляется во второй формуле.
3. В формулах 1.8 и 1.9 не определен параметр  $p$ . Почему использовались АВС первого порядка, которые показывают низкую точность при больших углах падения волны, и могут быть неустойчивы в случае неоднородных сред? Есть гораздо более

эффективные методы ограничения расчетной области, такие как идеально-согласованные слои или PML.

4. Что означает выражение на странице 29? «Величина шага по времени сильно влияет на решение, поэтому расчет производится с минимальным шагом по времени.» Сильно насколько? Минимальный шаг по времени из какого набора?
5. Формула 1.19 что означают верхние индексы, они ещё не раз встречаются в тексте без объяснения.
6. Доказательство теоремы 1. Что означает выражение «заразность влечет разрешимость»? Я не смог подобрать даже англоязычных аналогов, в попытках понять откуда могло появиться подобное выражение.
7. Приведены эксперименты, иллюстрирующие работоспособность многомасштабного метода, однако нет детального анализа сходимости метода в зависимости от числа функций в ячейке. Численные эксперименты, приведены в таблице, а вот теоретических оценок нет, хотя я предполагаю, что порядок сходимости не выше первого. Более того, при решении уравнения Гельмгольца на фиксированной частоте, возможно, не нужно учитывать малые собственные значения, а ограничить рассмотрение частотами, близкими к частоте сигнала?

Приведенные выше замечания носят скорее формальный характер и являются призывом автора к большей аккуратности, они нисколько не принижают значимость полученных У.С. Калачиковой результатов.

Диссертация У.С. Калачиковой соответствует требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, это научно-квалификационная работа, в которой на основе многомасштабного метода конечных элементов разработаны алгоритмы моделирования волновых полей в средах, содержащих мелкомасштабные неоднородности, в областях со сложной геометрией, в частности – в перфорированных областях, что является

существенным вкладом в развитие аппарата математического моделирования волновых полей.

Считаю, что диссертация У.С. Калачиковой «Многомасштабные вычислительные технологии для моделирования волновых процессов в неоднородных средах» соответствует специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

доктор физико-математических наук

Вадим Викторович Лисица

26.07.22

Заведующий лабораторией «Вычислительная физика горных пород», Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения Российской академии наук Адрес: Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга д. 3, телефон: +7 383 3301337, эл.почта: lisitsavv@ipgg.sbras.ru.

Даю своё согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку и передачу в соответствии с требованиями Минобрнауки России

Подпись зав. л  
Викторовича Лисицы



альной физики горных пород ИНГГ СО РАН Вадима

ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ  
Зав. канцелярии

26.07.2022