

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Вадима Викторовича Лисицы “Численные методы и алгоритмы расчета волновых сейсмических полей в средах с локальными осложняющими факторами”, представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

В диссертационной работе В.В. Лисицы ставится весьма важная для геофизических исследований задача разработки вычислительной методики расчета волновых сейсмических полей, достоверно описывающей влияние мелкомасштабных неоднородностей среды, характерный размер которых лежит в пределах от 0.01 до 0.1 длины волны. Простейшие оценки с помощью одномерных точных решений показывают, что вариации коэффициентов прохождения и отражения волн на таких неоднородностях имеют примерно такой же порядок. Следовательно, эта методика должна основываться на высокоточных численных методах, и для ее обоснования необходимо выполнить тонкий анализ количественных и качественных характеристик используемых схем.

Актуальность темы диссертации определяется важностью выбранного направления исследований для развития современных методов анализа волновых сейсмических полей с учетом возрастающих требований к детализации. Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в том, что в ней впервые развиты эффективные методы математического моделирования волновых полей в упругих средах с осложняющими факторами, которые обладают требуемой точностью, и являются экономичными по необходимым для их реализации вычислительным ресурсам. Практическая значимость диссертации определяется широкой областью применения разработанной методики в практике разведочных геофизических работ.

Анализ содержания диссертационной работы.

В первой главе разработаны математическая модель и вычислительный алгоритм для расчета волновых полей при наличии мелкомасштабной структуры в упругой среде на основе локального пространственно-временного измельчения сеток. Мелкомасштабные неоднородности – это включения, характерный размер которых составляет от 1 до 10% длины волны. В этом случае возникает один из самых сложных для численного моделирования класс задач. С одной стороны, переход к эффективным моделям (осреднениям) по пространству приводит к потере информативности, а с другой стороны, прямой учет неоднородностей требует сеток с шагом более ста ячеек на длину волны, что нереализуемо на современных высокопроизводительных вычислительных системах из-за

ограничений по памяти и времени счета. Для решения таких задач предлагается использовать локальную дискретизацию расчетной области. Мелкая сетка применяется в подобластях, содержащих скопления неоднородностей, в то время как всюду вне этих подобластей используется сетка с грубым шагом.

Известно, что использование несогласованных сеток при решении гиперболических уравнений может приводить к развитию неустойчивости, которую сложно предсказать теоретически. Поэтому оригинальные решения по анализу дисперсионных характеристик схем, предложенные в диссертации, имеют высокую научную ценность.

Вторая глава посвящена разработке численного метода моделирования волновых процессов в средах с анизотропными включениями. Предложенный метод основан на комбинации стандартной схемы на сдвинутых сетках, применяемой в области, где среда изотропна, со схемой Лебедева, которая используется для расчета волновых полей в анизотропной части среды. Обзор численных методов, применяемых к анализу решений системы уравнений динамической теории упругости в анизотропной среде, приведенный в диссертации, включает в себя широкий набор – метод конечных разностей, конечных элементов, спектральных элементов, а также специфические бессеточные методы. Проведенный анализ схемы Лебедева, в том числе, оценка численной дисперсии, построение дифференциального приближения показал ее эффективность для решения указанного класса задач. Отдельного внимания заслуживает раздел, посвященный численному исследованию скорости сходимости численного решения в случае разрывных коэффициентов уравнения. В нем показано, что из-за разрывности компонент поля напряжений на границах раздела сред применение классической модификации коэффициентов уравнений методом баланса, описанным А.А. Самарским, не позволяет обеспечить второго порядка точности, при этом если модификацию коэффициентов проводить по формулам осреднения тонкослоистых пачек, то удастся добиться второго порядка. Еще одним важным результатом второй главы является построение многоосного идеально согласованного слоя (MPML), позволяющего ограничить расчетную область. Особую значимость результаты приобретают для анизотропной модели среды, когда применение классических методов приводит к некорректной постановке начально-краевых задач. В диссертации предложен оригинальный способ оценки стабилизирующего параметра многоосного идеально согласованного слоя в зависимости от соотношений групповых и фазовых скоростей волн в анизотропной среде. Применимость полученного критерия проиллюстрирована рядом численных экспериментов.

В третьей главе разработан алгоритм для расчета волновых полей в средах с вязкоупругими включениями, ориентированный на использование вычислительных систем с распределенной памятью. В этой главе основное внимание уделяется организации вычислений с распараллеливанием на основе декомпозиции расчетной области. Предполагается, что в заданной

подобласти среда вязкоупругая, описывается обобщенной стандартной моделью твердого тела, что требует введения дополнительных переменных памяти по сравнению с упругой моделью. В методе декомпозиции расчетной области с локальным использованием обобщенной стандартной модели вводится и минимизируется функционал общего времени счета (числа операций на узел сетки) в зависимости от объема каждой подобласти, используемой при декомпозиции. На этой основе удалось определить оптимальное отношение объемов подобластей, которое обеспечивает многократное сокращение времени счета по сравнению с алгоритмом, использующим обобщенную стандартную линейную модель во всей расчетной области.

В четвертой главе предложен численный метод для анализа волновых полей в средах с резкоконтрастными границами, представляющий собой комбинацию разрывного метода Галеркина и метода конечных разностей. Исследуется численная дисперсия разрывного метода Галеркина при решении системы уравнений динамической теории упругости. Основная идея подхода заключается во введении переходного слоя с регулярной прямоугольной сеткой, в которой применяется метод конечных объемов. В результате удается свести задачу к двум независимым и хорошо изученным задачам. Первая из них – p -адаптация метода Галеркина – использование разных наборов базисных функций в соседних ячейках. Вторая – комбинирование метода конечных объемов со стандартной схемой на сдвинутых сетках, которая приводит к задаче второй главы. Для иллюстрации эффективности разработанного метода приводится эксперимент по оценке влияния возмущений свободной поверхности на повторяемость сейсмических данных. Из результатов расчетов, даже сравнивая непосредственно сейсмограммы, не прибегая к статистическому анализу данных, можно увидеть, что влияние профиля свободной поверхности на результаты сейсмических наблюдений чрезвычайно велико, и что проведение сейсмического мониторинга без детального учета эволюции свободной поверхности может приводить к потере точности моделирования.

В заключении подробно описаны основные результаты диссертации и изложены планы дальнейших исследований по сопряженным научным направлениям.

Общая оценка работы.

По материалам диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. К обсуждению приоритетов на стр. 111. Схема на разнесенных сетках (схема «крест») впервые использовалась при численном решении уравнений газовой динамики Нейманом и Рихтмайером в 1949 году. Об этом имеется ссылка на стр. 450 монографии Б.Л. Рождественского и Н.Н. Яненко «Системы квазилинейных уравнений...». К уравнениям Максвелла эта схема была применена только через 17 лет.

2. Результат о неустойчивости разностной схемы, полученной совместным измельчением сетки по пространству и по времени, обоснован в работе лишь для схемы на разнесенных сетках, и не является всеобщим. Это следовало уточнить. Он не распространяется, например, на сеточно-характеристические методы.
3. Утверждение на стр. 25 о том, что уравнения теории упругости не допускают разрывов, абсолютно неверно. Уравнения описывают ударные волны (разрывы скоростей и напряжений), контактные разрывы на резкоконтрастных границах и другие особенности решений, связанные с локализованными и импульсными воздействиями.
4. Чем аргументировать, что развитые в диссертации комбинированные схемы с измельчением сеток при расчете сейсмических полей с мелкомасштабными неоднородностями улавливают не искусственно введенные границы перехода между сетками, а особенности точных решений?
5. В тексте диссертации используются термины, смысл которых не вполне ясен, например, «условия предельного поглощения» в случае бесконечной области. Как они формулируются? Имеются опечатки, в частности, в уравнениях (1.1), (2.2), (3.8) и (4.1). Название главы 2 на стр. 109 отличается от ее названия в оглавлении.

Перечисленные замечания не снижают общей ценности результатов работы. Необходимо отметить, что диссертация В.В. Лисицы представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему, в которой решена новая научная проблема – разработаны эффективные методы расчета волновых сейсмических полей в средах с мелкомасштабными неоднородностями, что является существенным вкладом в развитие аппарата математического моделирования в геофизике (сейсмике).

Основные результаты работы достоверны. Они подробно изложены в тексте диссертации и опубликованы в 19 журнальных статьях из списка ВАК. Общее число научных трудов соискателя по теме диссертации превосходит 70. В системе цитирования Scopus значится 69 работ. Индекс Хирша соискателя равен 9, что свидетельствует об актуальности и значимости проводимых исследований. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа «Численные методы и алгоритмы расчета волновых сейсмических полей в средах с локальными осложняющими факторами» соответствует требованиям пп. 9 и 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, касающейся ученой степени доктора наук, а ее автор, В.В. Лисица, достоин присуждения ученой

степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку и передачу в соответствии с требованиями Минобрнауки России.

Директор ИВМ СО РАН,
заведующий отделом вычислительной
механики деформируемых сред
д.ф.-м.н., профессор


В.М. Садовский

15.02.2018

Подпись Владимира Михайловича Садовского удостоверяю:

Ученый секретарь ФИЦ КНЦ СО РАН
к.ф.-м.н.


П.Г. Шкур'ев

Телефон: +7 (391) 243-96-33

Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМ СО РАН) – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН)

Телефон:

+7 (391) 243-27-56

Почтовый адрес:

660036 Красноярск, Академгородок,
50/44, ИВМ СО РАН

E-mail:

sadov@icm.krasn.ru