

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Лисицы Вадима Викторовича

«Численные методы и алгоритмы расчета волновых сейсмических полей в средах с локальными осложняющими факторами»

по специальности

05.13.18, «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Численное моделирование волновых сейсмических полей в неоднородных разномасштабных средах со сложным строением и физическими свойствами пород является одной из наиболее востребованных и актуальных задач математического и численного моделирования. Это обусловлено потребностью в новых методах регистрации и обработки сейсмических данных, развитие которых невозможно без разработки принципиально новых методов численного моделирования волновых сейсмических полей в трехмерно-неоднородных средах. Определение внутреннего строения Земли – решение обратной задачи, то есть нелинейной минимизации, которое основано на применении метода Ньютона и его модификаций. Как хорошо известно, основной и наиболее трудоемкой частью метода Ньютона является вычисление градиента функционала невязки, то есть расчет решения прямой задачи – расчет волнового поля для текущей модели сред (текущего приближения). Поэтому без эффективных высокоточных численных методов и алгоритмов моделирования волновых сейсмических процессов невозможно и развитие методов обработки сейсмических данных. При этом все большую практическую значимость и интерес для промысловой геофизики представляют сложные коллекторы углеводородов – неструктурные трещиноватые и кавернозные. Распространение сейсмических волн в таких средах может быть описано либо уравнениями динамической теории упругости с быстроменяющимися коэффициентами, либо, основываясь на современных методах механики сплошной среды, уравнениями более сложного вида, такими, например, как модель вязкоупругой среды. При этом каждое такое осложнение математической модели требует все более ресурсоемких численных алгоритмов для решения начально-краевой задачи. Как отмечено в работе, зачастую подобные локальные осложнения занимают относительно небольшой объем модели, что делает использование вычислительно сложных численных методов во всей расчетной области затратным. Поэтому разработка методов расчета волновых полей на основе комбинирования разных численных методов с локальным применением ресурсоемких методов и алгоритмов, только в тех частях модели, где это действительно необходимо, является чрезвычайно актуальной научной проблемой. Успешное решение этой проблемы в несколько раз сократит время счета, а значит, расширит границы применимости не только численного моделирования сейсмических волновых полей, но и методов обработки сейсмических данных.

Первая глава диссертации В.В. Лисицы посвящена разработке конечно-разностного метода и алгоритмов расчета волновых полей в упругих средах с быстроменяющимися коэффициентами, основанного на локальном пространственно-временном измельчении шагов сетки. Нужно отметить обстоятельный анализ известных алгоритмов с локальным измельчением сеток в применении не только к методу конечных разностей, но и к методу конечных объемов и разрывному методу Галеркина, что отражено в соответствующем разделе. Разработанный соискателем метод основан на использовании вложенных шаблонов для конечно-разностных соотношений при расчете решения на границе сопряжения сеток, что позволяет сохранить порядок аппроксимации конечно-разностной схемы. Диссертантом тщательно проанализированы коэффициенты отражения от границы сопряжения сеток, теоретически и численно исследованы эти коэффициенты для построенной конечно-разностной схемы, по сути В.В. Лисицей доказывается корректность конечно-разностной начально-краевой задачи. Глубокий теоретический анализ разработанного метода дополняется репрезентативной серией численных экспериментов, анализом численных ошибок, коэффициентов отражения, устойчивости. Показано применение разработок для решения прикладных задач: для моделирования взаимодействия волновых полей с газо-водным контактом в трещинах гидроразрыва и распространения волн в средах со скоплениями флюидозаполненных каверн. Отмечу также высокий уровень описания методик построения геофизических моделей, в которых задаются распределения коэффициентов уравнений в пространстве в зависимости от свойств геологических объектов (флюидозаполненные или минерализованные каверны и системы трещин), что указывает на глубину понимания автором решаемых геофизических задач и особенностей моделируемых явлений.

Во второй главе представлена разработка конечно-разностного метода и алгоритмов расчета волновых полей в средах с анизотропными включениями, основанные на комбинировании стандартной схемы на сдвинутых сетках и более ресурсоемкой схемы Лебедева, ориентированной именно на учет сейсмической анизотропии. Математическая модель, описывающая распространение сейсмических волн в анизотропной упругой среде, отличается от модели изотропной среды только структурой тензора коэффициентов в законе Гука – уравнении состояния. Однако именно это отличие приводит к существенному усложнению вычислительных алгоритмов, используемых для моделирования, увеличению числа переменных в ячейке сетки. Поэтому первые 15 страниц в этой главе посвящены детальному анализу свойств конечно-разностных схем, используемых для аппроксимации уравнений динамической теории упругости в анизотропной среде. Соискателем убедительно показано, что применение схемы Лебедева предпочтительно для решения этого класса задач, поскольку требует минимального объема оперативной памяти и числа операций с плавающей точкой. При этом автор не ограничивается анализом только лишь стандартных свойств конечно-разностных схем, таких как аппроксимация, устойчивость, численная дисперсия. Для схемы Лебедева приводится построение дифференциального приближения, что дает возможность показать наличие дополнительных характеристик у разностного уравнения, именно это свойство используется диссертантом для комбинирования схемы Лебедева со стандартной схемой на сдвинутых сетках при локальном учете анизотропии. А детальный численный анализ скорости сходимости решения конечно-разностных задач в случае, когда коэффициенты уравнения терпят разрывы, указывает на высокую степень обоснованности использования разработок при

моделировании волновых полей в неоднородных анизотропных средах. При этом анализ проводится не только для случая контакта двух упругих полупространств, но и для контакта упругого полупространства с полупространством, заполненным идеальной несжимаемой жидкостью, распространение волн в котором описывается системой уравнений акустики. Этот случай является чрезвычайно важным для геофизических приложений, поскольку соответствует морским системам наблюдения, скважинным системам и пр. Еще одним важным аспектом моделирования волновых полей, которому соискателем уделяется повышенное внимание, является ограничение расчетной области – постановка неотражающих граничных условий. Для случая изотропных упругих сред известен ряд методов, позволяющих проводить ограничение области, таких как поглощающие граничные условия, идеально согласованный слой, прозрачные граничные условия и пр. Однако для анизотропной среды получаемые при их использовании начально-краевые задачи зачастую некорректны. Поэтому построенный В.В. Лисицей необходимый критерий устойчивости многоосного идеально согласованного слоя, позволяющий оптимизировать выбор стабилизирующего параметра, является чрезвычайно важным результатом. Как и в предыдущей главе, здесь выполняется скрупулезный и детальный анализ используемых численных методов и разрабатываемых соискателем методов их комплексирования, методы и алгоритмы верифицируются на большом наборе моделей, что, несомненно, служит надежным критерием достоверности разработок соискателя.

В третьей главе представлена разработка алгоритма расчета волновых полей в средах с вязкоупругими включениями, основанного на комбинировании обобщенной стандартной линейной модели упругой среды с моделью идеально упругой среды. Как и в предыдущей главе, осложнение физических свойств выражается в увеличении размерности математической модели, где для локализации ядра свертки в обобщенном законе Гука применяется метод рациональных аппроксимаций с введением дополнительных переменных памяти. Соискатель детально описывает алгоритм локализации, при этом построение и анализ обобщенной стандартной модели твердого тела проводится не только для изотропной, но и для важного частного случая анизотропной среды – вертикально трансверсально-изотропной среды. Выполнен тщательный анализ производительности параллельной реализации алгоритма, основанного на расщеплении по пространственным подобластям: автором вводится и минимизируется функционал общего времени счета, который зависит от соотношения объемов подобластей, в которых решаются уравнения динамической теории упругости для идеально упругой и вязкоупругой сред, от порядка конечно-разностной схемы, от числа механизмов затухания (порядка рациональной аппроксимации, используемой при локализации ядра свертки). На основе минимизации указанного функционала получены значения оптимальных соотношений объемов подобластей.

Разработка оригинального комбинирования разрывного метода Галеркина и метода конечных разностей для учета резкоконтрастных границ представлена соискателем в четвертой главе. Как и в предыдущих главах, диссертантом выполнен полный анализ известных разработок, в том числе методов конечных разностей в криволинейных ортогональных и неортогональных координатах, разных методов на неструктурированных сетках (разрывного метода Галеркина; метода конечных элементов, в том числе с диагонализацией матрицы масс, включая метод спектральных элементов; метода конечных

объемов и др.). Большое внимание уделяется исследованию свойств разрывного метода Галеркина в применении к решению системы уравнений динамической теории упругости. В частности, 25 страниц отводится под анализ численной дисперсии и устойчивости метода для различного порядка базисных полиномов, под сравнительный анализ с конечно-разностными схемами. Интересен, по моему мнению, вывод, что при расчете сейсмических волновых полей оптимальным является P2 формулировка разрывного метода Галеркина, поскольку при этом для достижения заданного уровня численной ошибки требуется наименьшее число арифметических операций. Далее автором предлагается оригинальное решение задачи комбинирования разрывного метода Галеркина: вводится переходный слой, в котором применяется разрывный метод Галеркина на регулярной прямоугольной сетке с константами в качестве базисных и пробных функций. Такая формулировка эквивалентна консервативным конечно-разностным схемам. Таким образом соискателю удается свести задачу к двум независимым: комбинированию метода Галеркина разного порядка и комбинированию классической конечно-разностной схемы на несдвинутых сетках со стандартной схемой на сдвинутых сетках. При этом решение второй задачи удается свести к уже решенной во второй главе задаче комбинирования схемы Лебедева со стандартной схемой на сдвинутых сетках. Интересны результаты экспериментов по верификации предложенного метода, где численная ошибка анализируется в зависимости от дискретизации и порядка полиномов метода Галеркина. Применение разработанного метода для анализа влияния изменчивости профиля свободной поверхности на повторяемость данных сейсмического мониторинга наглядно свидетельствует о необходимости учета малых возмущений топографии свободной поверхности при обработке сейсмических данных.

В заключении сформулированы преимущества разработки оригинальных методов и алгоритмов расчета волновых сейсмических полей в средах с локальными осложняющими факторами (скоплениями мелкомасштабных неоднородностей, анизотропными и вязкоупругими формациями, резкоконтрастными границами со сложной геометрией) на основе комплексирования апробированных численных методов. В частности, использование несогласованных сеток для решения волновых задач обеспечивает уровень нефизичных отражений в пределах 0.1% для типичных дискретизаций, что важно с практической точки зрения: позволяет моделировать рассеянную компоненту волнового поля, что ранее было практически недостижимо. Обоснование оптимальности схемы Лебедева, построение модификаций ее коэффициентов в окрестности разрывов, последующее применение схемы Лебедева и ее комбинирование со стандартной схемой на сдвинутых сетках открывают возможность расчета волновых полей для всех известных и актуальных моделей среды с анизотропными включениями. Диссертант считает перспективным для дальнейшего развития и активного применения комбинирование разрывного метода Галеркина и метода конечных разностей, поскольку этот подход решает актуальную для ряда научных областей задачу – учет разрывных коэффициентов в математической модели без существенного увеличения вычислительных затрат по сравнению с классическими конечно-разностными методами.

В ходе анализа работы возникли следующие вопросы и замечания:

1. В первой главе, посвященной локальному измельчению сеток, приводится обоснование только для схем второго порядка аппроксимации по пространству, хотя при расчете сейсмических волновых полей широко распространены схемы четвертого и шестого порядков.
2. В работе приводится измельчение сеток в нечетное число раз, это принципиальная особенность алгоритма. Следует уточнить, насколько такой выбор ограничивает область применимости метода.
3. Во второй главе приводится исчерпывающий и детальный сравнительный анализ схемы Лебедева, схемы на повернутых сетках и стандартной схемы на сдвинутых сетках для аппроксимации системы уравнений динамической теории упругости, записанной в виде системы уравнений первого порядка, в случае анизотропной среды. Убедительно показано преимущество схемы Лебедева, однако автор не рассматривает возможность записи в виде системы уравнений второго порядка и ее аппроксимации. Будет ли выбор схемы Лебедева оптимален в этом случае?
4. В автореферате не упоминается, что предложенный в третьей главе диссертации алгоритм может быть использован не только для изотропных, но и для вертикально трансверсально-изотропных сред, при этом в тексте диссертации этот вопрос обсуждается и обосновывается.
5. В четвертой главе комбинирование разрывного метода Галеркина и метода конечных разностей проводится при условии использования одинаковых шагов по времени для обоих методов, хотя соискатель сам показывает, что условие устойчивости для метода Галеркина существенно жестче, чем для конечно-разностной схемы. В связи с этим возникает вопрос, почему диссертант не воспользовался результатами первой главы и не провел локальное измельчение шага сетки по времени? По самым скромным, оценкам такой прием сократит время счета еще почти на порядок.

Высказанные замечания нисколько не отражаются на в целом высокой оценке диссертационной работы Лисицы В.В.

Анализ публикаций соискателя, которым только по теме диссертации опубликовано 19 статей в журналах из списка ВАК, а общее же число публикации превосходит 70, не оставляет сомнений в оригинальности, новизне и востребованности разработанных соискателем методов и алгоритмов расчета волновых полей в средах с осложняющими факторами.

В целом диссертационная работа В.В. Лисицы является оригинальным завершенным исследованием, оформленным в соответствии с требованиями Минобрнауки РФ, выполненным на высоком научном уровне лично соискателем. Диссертация написана грамотно, на хорошем русском языке корректным научным стилем, аккуратно оформлена и иллюстрирована качественным графическим материалом, сделаны ссылки на авторов и источники заимствования материалов, отдельных результатов, на соавторов. В своей

диссертации В.В. Лисица показал высокий уровень теоретических знаний современных и классических методов исследования в области математического моделирования, численных методов и умение их творчески применять при решении актуальных научных проблем.

Диссертация В.В. Лисицы соответствует требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, это научно-квалификационная работа, в которой на основе комбинирования разных численных методов решена научная проблема – разработаны методы и реализованы алгоритмы расчета волновых сейсмических полей в средах с локальными осложняющими факторами: анизотропия, частотная зависимость скорости распространения волн, кластеры неоднородностей субсейсмического размера, резкоконтрастные границы со сложной топографией, что является существенным вкладом в развитие аппарата математического моделирования волновых полей. Считаю, что диссертационная работа представляет полностью завершенное научное исследование, которое позволяет существенно расширить область применимости методов численного моделирования в задачах геофизики, поскольку на основе комплексирования численных методов диссертанту удалось повысить точность расчета волновых сейсмических полей без увеличения вычислительной сложности алгоритмов.

Считаю, что диссертация В.В. Лисицы «Численные методы и алгоритмы расчета волновых сейсмических полей в средах с локальными осложняющими факторами» соответствует специальности 05.13.18, «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

доктор физико-математических наук
профессор

Георгий Михайлович Кобельков

19.02.18

Заведующий кафедрой Вычислительной математики Механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Россия, 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские Горы, МГУ, Телефон: +7(495)9394587, эл.почта: kobelkov@dodo.inm.ras.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 д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой вычислительной математики мех-мат ф-та МГУ Кобелькова Г.М. заверяю

И.о. декана механико-математического ф-та МГУ

Профессор

В.Н.Чубариков