

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Романова Сергея Юрьевича **Разработка алгоритмов решения прямых и обратных задач томографии в скалярных волновых моделях**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Актуальность темы выполненной работы

Математическое моделирование при решении многих прикладных проблем науки и техники приводит к необходимости численного решения различных обратных задач. Особого внимания заслуживают обратные задачи для уравнений с частными производными. При планировании измерений в рамках диагностического вычислительного эксперимента нужно сформулировать условия, при которых обратная задача является корректной. При теоретическом исследовании таких задач рассматриваются принципиально вопросы единственности, существования решений и вопросы об устойчивости (корректности) решений к малым изменениям входных данных. При построении вычислительных алгоритмов приближенного решения обратных задач основное внимание уделяется разработке устойчивых вычислительных алгоритмов с учётом погрешностей во входных данных.

Среди обратных задач для уравнений с частными производными можно выделить коэффициентные обратные задачи, которые связываются с идентификацией коэффициентов уравнения и/или правой части при задании

некоторой дополнительной информации (наблюдении, переопределении) о решении прямой задачи. При рассмотрении нестационарных задач для уравнений с частными производными выделяют как самостоятельные обратные задачи, задачи идентификации зависимости коэффициентов, входящих в рассматриваемое уравнение, от времени и/или от пространственных переменных.

Принципиальной проблемой исследования обратных задач для уравнений с частными производными является проблема разработки эффективных вычислительных алгоритмов их приближенного решения. Прикладные проблемы идентификации являются сложными в силу нелинейности коэффициентных обратных задач, их трехмерности. Вычислительные алгоритмы должны быть ориентированы на современные вычислительные системы параллельной архитектуры. В силу выше отмеченного тема диссертационной работы Романова С. Ю., в которой рассмотрены комплексные проблемы численного решения задач идентификации коэффициентов волнового уравнения, зависящих от пространственных переменных, прикладных проблем разработки ультразвуковых томограф, является, безусловно, актуальной.

Общая методология и методика исследования

Работа выполнена на единой методологической основе с использованием современных средств математического моделирования. Вычислительные алгоритмы решения двумерных и трехмерных задач идентификации базируются на итерационных алгоритмах минимизации невязки. Такая методология является стандартной при приближенном решении обратных задач. Разработанное программное обеспечение ориентировано на компьютеры параллельной архитектуры с использованием стандартных технологий распараллеливания.

Степень обоснованности и достоверности

Основные результаты диссертационной работы формулируются на основе анализа содержательных проблемно-ориентированных расчетов. Положения, выносимые на защиту, прошли апробацию на различных внутрироссийских и международных научных конференциях, опубликованы в 32 печатных работах, из них 17 это статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

Научная новизна полученных результатов

В диссертационной работе получены следующие основные результаты, обладающие научной новизной:

- Обратная задача волновой томографии формулируется как нелинейное интегральное уравнение с использованием функции Грина для нестационарного гиперболического уравнения. Предложены и исследованы эффективные вычислительные алгоритмы решения задач идентификации при использовании линеаризованных моделей;
- Разработаны вычислительные алгоритмы приближенного решения задач идентификации коэффициента при второй производной по времени гиперболического уравнения, который зависит от пространственных переменных, при наблюдении за решением от различных источников. Используется стандартный подход с минимизацией функционала невязки градиентными методами. Основные усилия связаны с явным представлением производной Фреше. Для приближенного решения основной и сопряженной задач на регулярной сетке по пространству используются простейшие явные схемы. Выполнены представительные модельные расчеты в двумерной (послойной) и общей трехмерной постановке при точных входных

данных, которые демонстрируют эффективность используемых вычислительных алгоритмов;

- Рассмотрены обратные задачи волновой томографии с учетом поглощения в двух приближениях. Необходимо определить пару неизвестных коэффициентов при второй и первой производной по времени. Разработаны и исследованы на модельных двумерных и трехмерных задачах вычислительные алгоритмы идентификации коэффициентов, описывающих скорость и поглощение в среде, на основе градиентных итерационных методов минимизации функционала невязки;
- Разработано прикладное программное обеспечение для численного решения обратных задач волновой томографии в двумерном (послойном) и трехмерном приближениях, которое ориентировано на современные вычислительные системы кластерного типа. Комплекс программ написан на алгоритмическом языке C++ для CPU компьютеров общего назначения и GPU кластеров. Расчетные данные демонстрируют хорошую масштабируемость при различном объеме расчетных данных;
- Проведено комплексное предпроектное математическое моделирование по определению оптимальных томографических схем функционирования медицинских ультразвуковых томографов, по выбору оптимальных геометрических и физических параметров установки. Проведена оценка различных томографических схем зондирования: на отражение, на прохождение, с полными и неполными данными. Показана необходимость решения обратных задач волновой томографии в рамках полного трехмерного описания.

Значимость результатов для науки и практики

Результаты, изложенные в диссертации, имеют важное теоретическое и практическое значение. Полученные в диссертации теоретические результаты являются основой для разработки вычислительных алгоритмов и программного обеспечения для приближенного решения прикладных проблем волновой томографии, расчетно-теоретического оснащения современных диагностических систем.

В целом, результаты полученные Романовым С. Ю. по разработке вычислительных алгоритмов и программного обеспечения волновой томографии можно оценить как научное достижение в области теории и практики обратных задач для многомерных нестационарных уравнений с частными производными.

Внутреннее единство структуры работы

Работа хорошо написана и структурирована: основные направления исследований выделены в отдельные главы, логично объединенные для достижения поставленной цели диссертационной работы.

Соответствие содержания диссертации специальности

Представленное в диссертации Романова С. Ю. исследование выполнено полностью в рамках паспорта специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Содержание и оригинальные результаты работы соответствуют паспорту специальности по:

- разработке новых математических методов моделирования объектов и явлений волновой томографии,
- разработке, обоснованию и тестированию эффективных вычислительных методов вычислительной томографии,

ориентированных на применение современных компьютеров параллельной архитектуры,

- реализации эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов пробелено-ориентированных программ для CPU компьютеров общего назначения и GPU кластеров.
- комплексному исследованию научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента для определения оптимальных томографических схем функционирования медицинских ультразвуковых томографов, по выбору оптимальных геометрических и физических параметров установки.

Замечания по диссертационной работе

1. Список цитированных работ не является полным. В частности, автор использует градиентные итерационные методы решения обратных задач для уравнений с частными производными, но не цитирует работы О.М. Алифанова и его соавторов. В работе используются конечно-разностные алгоритмы численного решения начально-краевых задач для гиперболических уравнений, но нет вообще никаких ссылок на работы по разностным методам, в частности, монографии и учебники А.А. Самарского.
2. В работе дается аналитическое представление для градиента невязки в некоторых классах гладкости функций непрерывного аргумента. При переходе дискретным аналогам используются некоторые аппроксимации. Вопрос согласованности аппроксимаций функционала невязки, начально-краевых основных и сопряженных задач не обсуждается. Другими словами, действительно ли мы вычисляем градиент дискретного функционала невязки, а не его какую-то аппроксимацию?

3. Нет содержательного обсуждения используемых аппроксимаций для волновой задачи с поглощением в варианте с оператором Лапласа. Используется четырехслойная схема с достаточно странной аппроксимацией слагаемого с поглощением. Погрешность аппроксимации, условия устойчивости не исследуется.
4. Методические расчеты по вычислительным алгоритмам в главах 3,4 выполнены в рамках квазиреального вычислительного эксперимента при точных расчетных данных, которые получены из решения прямой задачи. Для полноты картины было бы уместно дополнить их исследованием влияния погрешности во входных данных.

Заключение

В целом диссертация Романова С. Ю. **Разработка алгоритмов решения прямых и обратных задач томографии в скалярных волновых моделях** является законченным научным исследованием. Научная новизна основных результатов диссертации высокая.

Диссертация Романова С. Ю. посвящена актуальным вопросам разработки и применения вычислительных алгоритмов волновой томографии, выполнена на хорошем научном уровне. Автореферат в целом правильно отражает содержание диссертации.

Работа **Разработка алгоритмов решения прямых и обратных задач томографии в скалярных волновых моделях** удовлетворяет всем требованиям ВАК согласно п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы

программ, а ее автор, Романов Сергей Юрьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Доктор физико-математических наук,
профессор,
заведующий лабораторией

09.06.16



П.Н. Вабищевич

Петр Николаевич Вабищевич, заведующий лабораторией №73
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
раб. тел. +7(495) 955-23-96
e-mail: vabishchevich@gmail.com

Подпись П.Н. Вабищевича удостоверяю

Ученый секретарь ИБРАЭ РАН
кандидат технических наук



В.Е. Калантаров