

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Белова Александра Александровича “Экономичные модели расчета жестких задач в моделях кинетики, теплопроводности, диффузии” представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы, комплексы программ»

Диссертация посвящена разработке и апробации практически эффективных методов компьютерного моделирования процессов с большой разномасштабностью, то есть так называемым сложным задачам. На необходимость разработки специальных методов решения этих задач обращено внимание исследователей еще в середине прошлого века. Сложность априорного теоретического анализа и оценок качества компьютерных реализаций по-прежнему привлекают существенное внимание специалистов и теоретиков и вычислителей - модельеров. В рассматриваемой работе основное внимание уделено моделям, относящимся к кинетике реакций, диагностике сингулярностей обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), эллиптическим уравнениям, численному решению систем, моделирующих термоядерные реакции.

Актуальность.

Рассматриваемый класс задач относится к той области, где априорные теоретические результаты, классические и современные методы исследования качественных свойств, как правило, нелинейных систем дифференциальных уравнений не учитывают особенностей реализации их на современных вычислительных машинах, другими словами, когнитивные процессы в исследованиях теоретиков и экспериментаторов еще недостаточны. Состояние научных исследований в данной области является ярким примером актуализации проблемы создания новых моделей в области с большим объемом накопленных данных (Big Data).

В представленной работе отмечается, что важной является проблема поиска новых источников энергии и повышения эффективности имеющихся, в частности, оптимизация процессов горения и осуществление управляемого термоядерного синтеза (УТС), расчет электродинамических конструкций, в которых поле лишь незначительно проникает внутрь проводника и других задач.

Содержание работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации 159 страниц текста, список литературы содержит 57 наименований.

Введение (глава 1) содержит обзор исследуемых в диссертации жестких задач. Дана общая характеристика работы, включая обоснование актуальности, цели и задачи, степень разработанности темы, научную

новизну и практическую значимость, обоснование достоверности результатов. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

Во *второй главе* предложена специальная явная схема для задачи кинетики реакций. Проведены расчеты тестового примера, имитирующего уравнение кинетики трехчастичной реакции.

С использованием разработанной техники произведен расчет термоядерного горения и оценка сходимости по методу Ричардсона.

Предложен метод численной диагностики разрушений для систем ОДУ, позволяющий определить момент сингулярности и ее порядок с гарантированной точностью.

В *третьей главе* оптимизирован сверхбыстрый итерационный метод для счета на установление параболического уравнения по разработанной автором эволюционно-факторизованной схеме. Предложена практически неулучшаемая производящая функция этого набора и апостериорные асимптотически точные оценки итерационного процесса. Метод позволяет экономично решать эллиптические уравнения на многократно сгущающихся сетках по пространству и получать высокую точность.

В *четвертой главе* для сингулярно возмущенных эллиптических уравнений в прямоугольных областях предложена адаптивная квазиравномерная сетка, детально передающая все характерные участки решения и позволяющая решать сингулярно возмущенные эллиптические уравнения с очень узкими пограничными слоями и ограничиваться сетками с небольшим числом узлов.

В *пятой главе* разработан новый метод обработки экспериментальных данных, измеренных со значительной погрешностью. Он заключается в построении аппроксимации по методу двойного периода со специальным регуляризатором. Получены аппроксимации и оценки доверительных интервалов для сечений 4 термоядерных реакций, наиболее актуальных для УТС, вычислены скорости этих реакций.

В *шестой главе* приведено описание 3 прикладных пакетов программ на языке MatLab, разработанных на основе предложенных методов. Во всех пакетах решение вычисляется одновременно с апостериорным асимптотически точным значением погрешности. Для всех программ приводятся исходные коды, подробные описания и контрольные тесты.

В кратком *заклучении* сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Наиболее существенные результаты диссертации:

1. Разработаны новые математические методы моделирования основных ядерных реакций синтеза изотопов водорода, получены наиболее точные на настоящий момент аппроксимации сечений и скоростей реакций.
2. Разработаны и реализованы эффективные численные алгоритмы решения задач кинетики, диффузии, а также метод автоматического численного обнаружения и диагностики сингулярностей в ОДУ.

- Разработан и реализован метод обработки экспериментальных данных с нахождением дисперсии аппроксимирующей кривой.
3. Разработан простой итерационный метод решения многомерных эллиптических уравнений с логарифмической сходимостью, что является теоретическим пределом. Одновременно с решением метод вычисляет асимптотически точную оценку погрешности. Метод позволяет эффективно решать сингулярно возмущенные уравнения.
 4. В среде MatLab созданы пакеты прикладных программ Kinetic, SiDiaG и SuFaReC для решения указанных выше задач. Эффективность пакетов подтверждена численными экспериментами.

Научная новизна.

Для 4 термоядерных реакций, наиболее важных для УТС, найдены аппроксимации сечений и скоростей реакций с хорошей точностью. Разработана специальная явная схема второго порядка для кинетики реакций. Разработана регуляризация метода двойного периода для обработки экспериментов и метод вычисления дисперсии аппроксимирующей кривой. Предложен простой и надежный метод диагностики сингулярностей для ОДУ с апостериорной асимптотически точной оценкой погрешности. Для решения эллиптических уравнений без смешанных производных логарифмическим счетом на установление предложен новый линейно-тригонометрический набор шагов по времени. Разработан метод вычисления апостериорного асимптотически точного значения погрешности итераций. Для сингулярно возмущенных эллиптических уравнений в прямоугольных областях предложена адаптивная квазиравномерная сетка, которая обеспечивает высокую точность даже при очень тонких пограничных слоях (10^{-7} от размеров области) уже на сетках с небольшим числом узлов (до 500 по каждому направлению). На основе предложенных методов разработаны 3 пакета программ на языке MatLab, эффективность которых подтверждена большим количеством численных экспериментов.

Практическая и научная значимость результатов.

Полученные в работе аппроксимации для сечений и скоростей термоядерных реакций значительно точнее известных ранее. Это существенно для моделирования процессов в мишенях управляемого синтеза.

Предложенные математические методы превосходят по точности, надежности и эффективности ранее известные алгоритмы и представляют интерес для широкого круга исследователей. Разработанные пакеты программ должны найти широкое применение для исследовательских расчетов, а также как прототипы программных комплексов для производственных расчетов.

Результаты работы могут быть использованы в теоретических и прикладных исследованиях, проводимых на ряде факультетов МГУ им. М.В. Ломоносова (физическом, ВМК и других), ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, федеральных ядерных центрах (Саров и Снежинск), ФИАН им. П.Н.

Лебедева, ОИЯИ, НИЦ “Курчатовский институт”, МИАН им. В.А. Стеклова, ИММ УрО РАН, МАДИ и других организациях.

Достоверность результатов.

Достоверность и надежность разработанных математических методов основана на проверке на представительных тестовых задачах с известным точным решением, а также расчетами на сгущающихся сетках с апостериорной оценкой погрешности по методу Ричардсона и контролем фактического порядка точности. Надежность обработки экспериментальных данных обеспечивается большим объемом анализируемого материала, и современными физическими представлениями о качественном поведении искомых зависимостей. Оценки точности аппроксимаций для сечений, полученных в результате вычислений, контролируются по соответствию известным физическим закономерностям.

Замечания к работе.

1. Современный научный язык моделирования сложных технических систем находится в стадии формирования. Это отражается и в тексте диссертации, где отмечается, что фундаментальное понятие жесткости не имеет установившейся дефиниции. Поэтому в отдельных случаях автором используются эмоциональные оценки «высокая гарантированная точность», стр. 5, «хорошие качественные свойства», стр.7, «высокой жесткости», стр.7, «наполовину численные, наполовину аналитические», стр.8, «практически неулучшаемый», стр.16 и т.д.
2. Представляется, что в силу специфики рассматриваемого научного направления исследований утверждения типа «эту проблему можно считать закрытой», стр.15 и аналогичные на следующих страницах необходимо формулировать более осторожно, поскольку формально вопросы устойчивости в широком смысле приведенных методов не рассматриваются.
3. Присутствует в небольшой степени разногласия обозначенных заголовков и текста. Например, в п.1.5.2, относящимся к степени разработанности темы исследования, содержится изложение полученных автором результатов.
4. Рассматриваемая работа в современной классификации является гибридной, т. е. содержит как апостериорные оценки качества рассматриваемых методов, так и априорные. Однако леммы и теоремы в тексте диссертации «живут» отдельно, хотя в стандартных теориях одни являются «помощниками» других.
5. Доказательство леммы 2 содержит лишь утверждения об оценке числа решений снизу, в то время как формулировка дает точную оценку.
6. Имеется незначительное количество опечаток, например, в формуле (3.25) на стр. 60.

Общая оценка.

Приведенные замечания не снижают ценности работы. В работе рассмотрены принципиальные вопросы современного состояния научных исследований в области моделирования сложных нелинейных процессов на примере решения актуальных с практической точки зрения задач. Текст работы однозначно свидетельствует о широком кругозоре и высокой квалификации автора по рассматриваемой тематике. Результаты обладают научной новизной и практической ценностью. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Белова А.А. является законченной научно-квалификационной работой и отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 "Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ" (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842), а ее автор Белов Александр Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Д.ф.-м.н, профессор,
заведующий кафедрой высшей
математики МАДИ

А.П.Буслаев

«27» апреля 2017 года

Почтовый адрес:

141700, Москва, Ленинградский пр.,64., МАДИ

Телефон: +7 (495) 1550436; +7 (495) 1550326

Организация – место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный технический университет (МАДИ)», кафедра высшей математики

Должность: заведующий кафедрой

Адрес электронной почты: apal2006@yandex.ru

Web-site: <http://www.madi.ru/920-buslaev-aleksandr-pavlovich.html>

Подпись А.П. Буслаева заверяю
Первый проректор МАДИ

