

УТВЕРЖДАЮ



Проректор ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

по научной работе

В.К. Драгунов

«3» мая 2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Рогозина Олега Анатольевича

«Численный и асимптотический анализ некоторых классических задач молекулярной газодинамики»,

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность темы исследования

Диссертация Рогозина О.А. направлена на развитие численных и асимптотических методов анализа существенно неравновесных процессов в разреженном газе, которые, как известно, описываются уравнением Больцмана. Область применения кинетической теории на сегодняшний день очень обширна. Не составляет исключения её классический раздел, связанный с течениями нейтральных газов. Как указано во введении диссертации, кинетический подход успешно применяется при моделировании обтекания летательных аппаратов в верхних слоях атмосферы, процессов переноса в микро- и наноустройствах, а также испарения и конденсации. Таким образом, **актуальность работы и её практическая значимость** не нуждается в специальном обосновании.

Анализ содержания работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав и одного приложения, которые представляют собой связанный материал, начиная с изложения теоретических основ, включая детальное описание применяемых в исследовании подходов и заканчивая результатами моделирования широкого круга конкретных краевых задач динамики разреженного газа.

Первая глава содержит достаточно лаконичное изложение основ кинетической теории, широкий обзор математических достижений в области решения задачи Коши. В третьей, наиболее объёмной, части представлены некоторые разделы современной асимптотической теории уравнения Больцмана, дополненные авторскими наработками, которые в третьей главе используются для численного анализа отдельных течений

разреженного газа. Весьма детально разобраны медленные неизотермические течения слабо Разреженного газа, для описания которых используются уравнения Когана — Галкина — Фридлиндера. Последние могут быть получены из уравнения Больцмана в пределе малых чисел Кнудсена при конечных числах Рейнольдса и перепаде температур. Автор рассмотрен широкий класс граничных условий, в том числе те, что учитывают кривизну граничной поверхности.

Вторая глава посвящена численным методам решения уравнения Больцмана. Начиная с классификации и обзора широкого спектра существующих подходов, автор переходит к изложению консервативного проекционно-интерполяционного метода дискретных скоростей (КПИМДС). Этот метод был впервые предложен Черемисиным Ф.Г., давно известен и успешно применяется для решения прикладных задач, в том числе на нашей кафедре низких температур. Автор использует технику многоточечного проецирования для достижения консервативности на неравномерных сетках, которые за счёт измельчения в областях с высоким градиентом позволяют ему добиться высокой точности численного счёта. Изложение метода подкреплено формальным анализом необходимого числа квадратурных членов для сохранения положительности функции распределения, а также практическими рекомендациями по построению проекционного шаблона и сетки в скоростном пространстве.

В третьей главе описанные ранее методы численного и асимптотического анализа применяются к ряду известных задач динамики разреженного газа, однако, во-первых, представленные результаты отличаются высокой точностью, а во-вторых, автору удалось обнаружить и описать некоторые весьма тонкие эффекты разреженного газа. В частности, детально изучено течение Куэтта в широком диапазоне чисел Кнудсена и Маха. Рассмотрены такие нюансы, как анизотропия тензора давления, изменение кривизны профиля продольного теплового потока. Остальные задачи относятся к классу медленных неизотермических течений. Для газа, заключённого между двумя параллельными пластинами с синусоидальным распределением температур, показано, что численное решение уравнения Больцмана в пределе малых чисел Кнудсена сходится к решению уравнений Когана — Галкина — Фридлиндера (КГФ). Проведённый параметрический анализ задачи с двумя некоаксиальными цилиндрами и сферами наглядно раскрывает нелинейную природу физических процессов, происходящих при термострессовой конвекции. Численный и асимптотический анализ поведения слабо Разреженного газа между коаксиальными эллиптическими цилиндрами выявил различные нетривиальные паттерны течения при достаточно малых числах Кнудсена. Эти эффекты также очень

тонкие и продемонстрированы впервые. Важно отметить, что они практически недоступны для исследования с помощью классического метода прямого статистического моделирования.

Наконец, в приложение вынесены методы вычисления транспортных коэффициентов, основанные на конечно-разностном решении интегральных уравнений. Для модели твёрдых сфер автору удалось достигнуть очень высокой точности путём сведения интегральных уравнений к одномерным. Кроме того, те транспортные коэффициенты, которые используются для построения нелинейного асимптотического решения вплоть до членов третьего порядка по числу Кнудсена, вычислены впервые.

Степень достоверности

В качестве теоретического базиса настоящего исследования используется кинетическое уравнение Больцмана. Все полученные численные результаты подкреплены сравнениями с другими методами. В частности, для течения Куэтта полное совпадение достигнуто с прямым статистическим моделированием. Для медленных течений такое сравнение проведено с асимптотическими решениями. Кроме того, представлены результаты, полученные на сетках различной детализации, проанализирована их сходимость.

Значимость полученных результатов

В диссертации представлено множество практически эталонных для динамики разреженных газов численных расчётов, обладающих высокой степенью достоверности. Задачи эти носят скорее академический характер и далеки от приложений, однако полученные данные могут служить базой для обоснования правомерности применения других численных методов и математических моделей разреженного газа. Однако наибольшую ценность представляет разработанная методология высокоточного численного анализа течений разреженного газа на основе уравнения Больцмана. Как указано автором в заключении, она может быть с успехом применена для широкого круга более прикладных задач, в том числе пространственных сверх- и гиперзвуковых течений, задач с существенно нелинейными процессами испарения и конденсации. Естественным продолжением диссертационной работы является обобщение на случай многоатомных и химически реагирующих газов.

Замечания по диссертационной работе

1. Во второй главе при описании алгоритма решения пространственно-однородного уравнения Больцмана на неравномерных сетках большое внимание уделяется анализу минимального количества членов в квадратурной формуле для обеспечения положительности функции распределения, однако в дальнейшем в диссертации используется только весьма грубая схема с исключением нежелательных членов из квадратурной формулы. Несмотря на то, что вклад исключенных членов мал, он может накапливаться в итерационном процессе, а также значительно влиять на высокэнергетический спектр распределения молекулярных скоростей. Никаких строгих обоснований и исследований этой проблемы в диссертации не представлено.
2. Численный метод решения уравнения Больцмана, представляющий наибольшую ценность с методологической точки зрения, является по сути новым, однако изложен в диссертации всего на семи страницах. В излишне кратком описании отсутствуют многие алгоритмические детали. За кадром остались численный метод для правой части уравнения Больцмана, схема операторного расщепления, методика выбора проекционного шаблона для граничных точек и др. То же самое замечание относится и к методу решения уравнений КГФ. Всё это в некоторой степени нарушает принцип воспроизводимости научных исследований.
3. Во второй главе нет ни одной графической иллюстрации, которые могли бы наглядно изобразить суть используемого численного метода. Это касается как схемы многоточечного проецирования, так и используемых проекционных шаблонов. Подобный формализованный стиль изложения затрудняет восприятие материала.

Указанные замечания не имеют принципиального характера и могут быть учтены в дальнейших публикациях по теме исследования.

Заключение

Диссертация, представленная на 147 страницах со 260 литературными ссылками, является законченной и выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Полученные результаты достаточно полно опубликованы в ведущих специализированных научных журналах. В заключении представлены основные выводы и рекомендации. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа «**Численный и асимптотический анализ некоторых классических задач молекулярной газодинамики**» представляет собой завершённый

научно-исследовательский труд, выполненный на актуальную тему, полностью соответствует паспорту специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы» и отвечает всем требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842) ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук. Автор диссертационной работы, Рогозин Олег Анатольевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа и отзыв были обсуждены на заседании кафедры низких температур 19 апреля 2018 г., протокол №07-17/18.

Д.т.н., профессор,
профессор кафедры низких температур



А.П. Крюков

К.т.н.,
доцент кафедры низких температур



А.К. Ястребов

Крюков Алексей Павлович

Ястребов Арсений Константинович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Почтовый адрес: 111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.

Телефон: (495) 362-75-60

Эл. почта: universe@mpei.ac.ru