

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Рогозина Олега Анатольевича

«Численный и асимптотический анализ некоторых классических задач молекулярной газодинамики», представленную к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность работы

Классические способы моделирования, основанные на уравнениях Навье-Стокса, не подходят для описания движений разреженного газа, в котором средняя длина свободного пробега молекул становится сравнимой с характерным размером рассматриваемой области течения. Корректное описание течения возможно на основе кинетических подходов: уравнение Больцмана, аппроксимирующие кинетические уравнения, метод прямого статистического моделирования, и других. Важной областью применения теории разреженных газов является исследование течений в различных микроэлектромеханических устройствах: микронасосы, микротурбины, микросопла и т.д. Другим традиционным приложением уравнений динамики разреженного газа является моделирование аэродинамики и теплообмена космических аппаратов, движущихся в верхних слоях атмосферы. Наиболее популярным в настоящее время способом моделирования течений разреженного газа является метод прямого статистического моделирования. Метод статистического моделирования хорошо подходит для широкого класса задач аэродинамики для больших и умеренных чисел Кнудсена, включая течения с химическими реакциями, но менее эффективен для расчета медленных течений.

Альтернативой использованию статистических методов является прямое численное решение кинетического уравнения Больцмана для функции распределения молекул по скоростям. Основные преимущества данного подхода состоят в возможности построения методов высокого порядка аппроксимации, применимости всех традиционных для вычислительной аэродинамики численных методов, подходов к построению расчетных сеток и алгоритмов создания параллельных программ. Таким образом, актуальной является задача разработки более эффективных и универсальных методов решения задач теории разреженных газов на основе численного решения кинетических уравнений.

Степень обоснованности научных положений

В диссертации развивается “консервативный проекционно-интерполяционный метод дискретных скоростей (КПИМДС)”, предложенный и обоснованный Ф.Г. Черемисиным, который позволяет построить более эффективную численную схему. Так как во многих прикладных задачах эффективная аппроксимация уравнения Больцмана требует существенно неоднородной дискретизации в скоростном пространстве КПИМДС на неравномерных сетках строится с помощью техники многоточечного проецирования. В диссертации выделены следующие цели: развитие КПИМДС для неравномерных сеток и его верификация; численный анализ некоторых одномерных и медленных неизотермических течений разреженного газа; оценка области применимости уравнений гидродинамического типа для подобных задач.

Достоверность исследования

Достоверность исследования обеспечивается: анализом численных решений задачи Куэтта в широком диапазоне параметров, получаемых с помощью КПИМДС и других общепризнанных методов; исследованием сходимости численного решения уравнения Больцмана к асимптотическому для широкого класса течений между параллельными пластинами; исследованием различных подходов к постановке граничных условий для уравнений медленных неизотермических течений газа и сравнительный анализ решения этих уравнений с решением уравнения Больцмана.

Научная новизна исследований

Разработан КПИМДС для существенно неравномерных сеток, что позволило исследовать неизученные ранее эффекты и свойства известных течений разреженного газа. Уравнения медленных неизотермических течений газа решены с граничными условиями отличными от теплового скольжения.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные численные методы позволили получить результаты, которые выявили ряд новых эффектов разреженности в течениях газа. Это расширяет существующие представления о процессах тепломассопереноса в газах и стимулирует дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования явлений переноса.

Диссертацию отличает отчетливость, ясная очерченность предмета исследования. В диссертации приведен прекрасный обзор современных численных методов решения уравнения Больцмана. Логика исторического развития приводит к появлению методов, которые предложены в диссертации. Подробно излагается методические основы этих методов: численные методы интегрирования систем дифференциальных уравнений; численные методы многомерного интегрирования; квадратурные методы решения интегральных уравнений; проекционные методы решения операторных уравнений. В работе использован широкий спектр современных компьютерных технологий: системы компьютерной алгебры; генерация расчетных сеток; организация параллельных вычислений и т.п. В работе описаны авторские коды: солвер на основе алгоритма SIMPLE; программный комплекс анализа газокинетических процессов.

Основные результаты численного решения задач динамики разреженного газа, полученные в диссертации: вычислены неизвестные ранее коэффициенты переноса; получено решение задачи Куэтта для широкого диапазона чисел Кнудсена и скоростей пластин; на основе численного анализа некоторых нелинейных течений газа обнаружено, что обтекаемые тела притягиваются подобно электрически заряженным телам.

Замечания

1. В настоящем исследовании для обобщения КПИМДС на неравномерные сетки в пространстве скоростей используется идея многоточечного проецирования. По-видимому, эта идея для аппроксимации столкновительного интеграла уравнения Больцмана впервые предложена Альфредом Бейлихом ещё в 1999 году (Beylich, A. E. Solving the kinetic equation for all Knudsen numbers // *Physics of Fluids* 12.2 (2000): 444–465). Однако эта пионерская работа нигде не упоминается в диссертации.

2. Важная новизна работы — решение полного уравнения Больцмана с неравномерными скоростными сетками. Такие расчёты в литературе практически не

встречаются, однако автор ограничился лишь кратким описанием параметров скоростной сетки. Отсутствие визуальной графической демонстрации расчётных сеток значительно усложняет оценку и восприятие важности используемого в работе обобщения КПИМДС.

Указанные замечания носят исключительно рекомендательный характер и никоим образом не умаляют значимости диссертационного исследования.

Заключение

Диссертация представляет собой завершённое научное исследование, выполненное автором самостоятельно и на достаточно высоком уровне. В ней содержится данные исследования течений разреженного газа полученные с помощью численных методов разработанных и обоснованных автором. Полученные автором результаты являются достаточно новыми, обоснованными и достоверными. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Рогозина Олега Анатольевича соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»

Горелов Сергей Львович
доктор физико-математических наук,
доцент, ведущий научный сотрудник
e-mail: gorelovsl@yandex.ru
8(916)920-08-71

ФГУП «Центральный аэрогидродинамический
институт имени профессора Н.Е. Жуковского»
140180, Россия, г. Жуковский, Московская обл.
ул. Жуковского, 1.
e-mail: info@tsagi.ru
8(495)556-42-05

23.04.2018



/Горелов С.Л./

Подпись Горелова С.Л. заверяю
Ученый секретарь диссертационного совета
Д 403.004.01,
доктор физико-математических наук, доцент



Брутян М.А./