

ОТЗЫВ

официального оппонента 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»

Динамика разреженного газа является важным и активно развивающимся направлением современной аэромеханики и микроэлектромеханических систем (МЭМС). В первом случае это связано с интенсивным развитием аэрокосмической техники, где существенно неравновесные режимы обтекания летательного аппарата преобладают в верхних слоях атмосферы. Во втором случае газ обладает высокой степенью разреженности при нормальном давлении из-за микроскопических масштабов устройств, производимых с помощью современных технологий. В обоих случаях численный эксперимент обходится гораздо дешевле реального, особенно учитывая бурный рост доступных вычислительных ресурсов. **В этой связи актуальность выбранной темы исследований не вызывает сомнений.**

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и одного приложения. Общий объём составляет 147 страниц. Список используемых источников содержит 260 наименований.

Во введении автором обоснована актуальность темы и направления исследования, сформулированы основные цели и задачи, показана научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на за защиту, описана структура диссертации.

В первой главе изложен основной математический аппарат кинетической теории нейтральных одноатомных газов, применяемый в исследовании. Во второй части этой главы автором представлен обзор строгой современной математической теории. Ключевую роль играет третья часть, где изложена нелинейная теория возмущений в приложении к уравнению Больцмана при малых числах Кнудсена. Подробно рассмотрен случай медленных неизотермических течений, корректное описание которых требует учёта температурных напряжений в уравнении сохранения импульса. Классические уравнения Навье — Стокса дополняются некоторыми барнеттовскими членами. Полученная система гидродинамических уравнений впервые была изучена в 60-х годах XX века в Центральном аэрогидродинамическом институте им. профессора Н. Е. Жуковского (ЦАГИ).

Несомненной новизной диссертационной работы является использование граничных условий второго порядка малости по числу Кнудсена, включая члены, учитывающие кривизну поверхности. Эти граничные условия выводятся из асимптотической теории

кнудсеновского слоя. Важно отметить, что они не просто реализованы в авторском коде, но верифицированы на основе сравнения с точным численным решением уравнения Больцмана.

В последнем параграфе третьей части рассматриваются одномерные течения слаборазреженного газа с произвольными числами Рейнольдса. Асимптотические решения таких существенно нелинейных задач уже во втором порядке малости по числу Кнудсена приводят к громоздким выражениям.

Следует отметить большой труд автора по получению этих выражений в наиболее полном виде.

Автором продемонстрирован очень важный аспект асимптотической теории — верификация решений полного уравнения Больцмана. Для этого ему пришлось вычислить некоторые ранее неизвестные транспортные коэффициенты. Эти коэффициенты возникают при анализе пограничного слоя во втором порядке по числу Кнудсена. В приложении приведена уникальная аналитическая методика получения этих коэффициентов с очень высокой точностью.

Во второй главе представлен систематический обзор существующих подходов к численному анализу течений разреженного газа. Подробно изложен основной вычислительный метод, используемый автором для решения уравнения Больцмана.

Автором диссертационной работы обобщена на случай неравномерных сеток в скоростном пространстве консервативная методика вычисления столкновительного интеграла, предложенная ранее профессором Ф. Г. Черемисиным. Этот метод позволил автору провести численный анализ краевых задач динамики разреженного газа с высокой точностью.

Представленные в диссертации численные результаты говорят о высокой степени работоспособности и эффективности предложенного численного метода.

В третьей главе представлены результаты численного и асимптотического анализа нескольких канонических задач. Автор ограничился рассмотрением одноатомного газа, состоящего из твёрдых сфер, и моделью диффузного отражения молекул от твёрдой границы. Как известно из сравнения с экспериментом, такие предположения позволяют отразить реальную картину течений разреженного газа.

В первой части третьей главы подробно изучено плоское течение Куэтта в широком диапазоне чисел Кнудсена и Маха.

При этом наглядно продемонстрирована необходимость использования неравномерных сеток в скоростном пространстве для достижения высокого уровня точности.

Во второй части третьей главы рассмотрены некоторые плоские медленные неизотермические течения слаборазреженного газа. При этом рассмотрены случаи динамики газа между а) параллельными пластинами, б) некоаксиальными цилиндрами и сферами, в) коаксиальными эллиптическими цилиндрами. Рассчитаны с высокой точностью поля скорости и температуры газа. Проведены сравнения гидродинамических решений с кинетическими. В зависимости от используемых граничных условий определена область применимости гидродинамических решений.

Большой интерес представляет картина переходного течения между эллиптическими цилиндрами, большие оси которых перпендикулярны. Известно, что при малых и больших по сравнению с единицей числах Кнудсена стационарное течение состоит из одного вихря. При этом направления течений в этих случаях прямо противоположны.

Автору диссертационной работы впервые удалось рассчитать процесс перехода из одного случая в другой, представив наглядную картину переходного течения. Этот результат потребовал очень высокой точности численного счёта.

В заключении диссертации изложены основные выводы и рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы. Используемая автором методология анализа течений разреженного газа успешно продемонстрирована и может быть применена для широкого класса задач, где требуется высокая точность, а неравновесность газа играет существенную роль.

В качестве **замечаний** к представленной диссертационной работе следует отметить:

1. Проведённый детальный параметрический анализ плоского течения Куэтта обнаружил новые эффекты, связанные с профилем продольного теплового потока и анизотропностью тензора напряжения. Небольшим недочётом работы является то, что другие известные в этом течении физические эффекты не были в достаточной мере изучены и проверены. В частности, не исследовано превышение сдвигового напряжения при достаточно больших числах Кнудсена по сравнению со свободномолекулярным пределом.

2. В диссертационной работе недостаточно чётко разграничены известные результаты японского учёного Ё. Соне по граничным условиям второго порядка, которые получены в частном случае линейных течений. В отличие от результатов Соне, в диссертации рассмотрен более общий случай медленных неизотермических течений.

3. В диссертационной работе имеются некоторые опечатки и небрежности. Например, в уравнении (1.44) пропущены число Кнудсена в знаменателе за квадратными скобками и температура внутри малых круглых скобок. Стоит, правда, отметить, что

формула (1.44) приведена исключительно для ознакомления и нигде в дальнейшем не используется.

Указанные замечания, однако, не носят принципиального характера и никак не снижают научную значимость диссертационной работы.

Диссертация написана на высоком математическом уровне, обобщает самостоятельные исследования автора, является законченной актуальной научной работой и полностью соответствует паспорту специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы». Все научные положения и выводы, содержащиеся в диссертации, обоснованы. Все представленные результаты получены впервые и обладают высокой степенью достоверности, которая обеспечена детальными сопоставлениями с другими численными методами и асимптотическими решениями. Материал диссертации изложен логично и аргументировано. Автореферат правильно и в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Диссертация Рогозина Олега Анатольевича «Численный и асимптотический анализ некоторых классических задач молекулярной газодинамики» 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 учёной степени кандидата наук, а её автор заслуживает присуждения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент,
Доктор физико-математических наук,
Профессор кафедры теоретической физики МГОУ

Кузнецов М. М.

Государственное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Московский государственный областной университет».

Почтовый адрес: 141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24.

Телефон: (495) 780-09-43

Эл. почта: kaf-tfiz@mgou.ru

25 04 2018 г.

Подпись Кузнецова М.М. заверяю.

Начальник управления кадров МГОУ



Крохин Г. А.