

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИЦ ИУ РАН

академик РАН

И.А. Соколов



« 2 » ноября 2017 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН)»

Диссертация «Численный и асимптотический анализ некоторых классических задач молекулярной газодинамики», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы» выполнена в секторе кинетической теории газов Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН). Соискатель — **Рогозин Олег Анатольевич** в 2011 г. окончил факультет общей и прикладной физики Московского физико-технического института (МФТИ) по специальности «прикладные математика и физика», а в 2014 г. — очную аспирантуру МФТИ по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Сдача кандидатских экзаменов, в том числе по специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы», подтверждается справкой, выданной в 2016 г. в Московском авиационном институте (МАИ). С 2017 года является младшим научным сотрудником сектора кинетической теории газов отдела механики ВЦ ФИЦ ИУ РАН.

Научный руководитель — доктор физико-математических наук, профессор Черемисин Феликс Григорьевич. Основное место работы — федеральное государственное учреждение ФИЦ ИУ РАН, отдел механики, сектор кинетической теории газов, главный научный сотрудник.

По итогам обсуждения диссертации «Численный и асимптотический анализ некоторых классических задач молекулярной газодинамики» **принято следующее заключение.**

Тема диссертации является актуальной для развития методов анализа течений разреженного газа, возникающих во многих современных прикладных областях: микро- и наноэлектромеханические устройства, вакуумные микронасосы, аэродинамика разреженных газов, экология атмосферы.

Цели и задачи диссертации:

1. Развитие консервативного проекционно-интерполяционного метода дискретных скоростей (КПИМДС) для неравномерных сеток, его верификация в широком диапазоне неравновесности.
2. Численный анализ некоторых одномерных и медленных неизотермических течений разреженного газа на основе как уравнения Больцмана, так и соответствующих уравнений гидродинамического типа. Оценка области применимости последних при различных граничных условиях.

Основные результаты диссертации:

1. Для многоточечных проекционных шаблонов выявлены критерии, минимизирующие требования к мощности множества кубатурных точек.
2. С точностью 8–10 знаков вычислены неизвестные ранее транспортные коэффициенты для газа твёрдых сфер, необходимые для вычисления тензора напряжений и вектора потока тепла в пограничном слое Прандтля.

3. Получено решение плоской задачи Куэтта для широкого диапазона чисел Кнудсена вплоть до гиперзвуковых скоростей.
4. Абсолютная погрешность первых 13-ти моментов функции распределения не выше 10^{-4} .
5. Продемонстрировано, что КПИМДС на неравномерных прямоугольных сетках — надёжный инструмент для высокоточного анализа нелинейных плоских кинетических слоёв. Отклонение от асимптотического решения не более 10^{-4} для нелинейных течений между параллельными пластинами с температурой, распределённой константно и синусоидально.
6. На численных примерах показано, что использование совместимых граничных условий первого и второго порядка для уравнений Когана — Галкина — Фридлендера (КГФ) существенно улучшает точность асимптотического решения.
7. Исследованы, в том числе, граничные условия, учитывающие кривизну граничной поверхности.
8. На основе численного параметрического анализа некоторых нелинейных течений газа между равномерно нагретыми телами в континуальном пределе было обнаружено, что обтекаемые тела притягиваются подобно электрически заряженным телам.

Научная новизна работы:

1. КПИМДС применяется для существенно неравномерных сеток в пространстве скоростей для достижения высокой точности.
2. Нелинейная асимптотическая теория используется для верификации численного метода решения уравнения Больцмана.
3. Уравнения КГФ решаются с граничными условиями, содержащими члены отличные от теплового скольжения.
4. Рассматриваются неизученные ранее эффекты и свойства известных течений разреженного газа.

Практическая ценность:

1. Результаты анализа нелинейной задачи Куэтта могут служить эталоном для верификации других численных методов.
2. Предложенная методология численного анализа медленных неизотермических течений существенно расширяет возможности их компьютерного моделирования.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов.

1. Исследование основано на классическом уравнении Больцмана. Используется газ твёрдых сфер и граничные условия полного диффузного отражения. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что эти модели достаточно адекватно отражают реальные физические процессы в широком диапазоне неравновесности.
2. Проводится сравнительный анализ результатов, полученных с помощью КПИМДС, прямого статистического моделирования и асимптотического анализа уравнения Больцмана. Проводится анализ сходимости численных методов на основе решений на разностных сетках различной мелкости и верификация используемых солверов и систем обработки данных на тестовых задачах, решение которых с высокой точностью представлено в литературе. Результаты находятся в полном соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Рогозин О. А. Медленные неизотермические течения: численный и асимптотический анализ уравнения Больцмана // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. — 2017. — Т. 57, No 7. — С. 1205—1229.
2. Rogozin O. Numerical analysis of the nonlinear plane Couette-flow problem of a rarefied gas for hard-sphere molecules // Eur. J. Mech. B/Fluids. — 2016. — Vol. 60. — P. 148–163.
3. Rogozin O. Computer simulation of slightly rarefied gas flows driven by

significant temperature variations and their continuum limit // Theor. Comput. Fluid Dyn. — 2014. — Vol. 28, no. 6. — P. 573–587.

4. Додулад О. И., Клосс Ю. Ю., Мартынов Д. В., Рогозин О. А., Рябченков В. В., Черемисин Ф. Г., Шувалов П. В. Проблемно-моделирующая среда для расчётов и анализа газокинетических процессов // Нано- и микросистемная техника. — 2011. — No 2. — С. 12—17.
5. Anikin Y. A., Derbakova E. P., Dodulad O. I., Kloss Y. Y., Martynov D. V., Rogozin O. A., Shuvalov P. V., Tcheremissine F. G. Computing of gas flows in micro- and nanoscale channels on the base of the Boltzmann kinetic equation // Procedia Comput. Sci. — 2010. — Vol. 1, no. 1. — P. 735–744.

Личный вклад соискателя в работах с соавторами заключается в следующем: разработка алгоритмов, программная реализация, проведение вычислительных экспериментов, анализ результатов.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

1. Научный семинар сектора кинетической теории отдела механики ВЦ РАН ФИЦ ИУ РАН (Москва, 2016).
2. Второй Международный симпозиум по аэродинамике, охватывающем различные режимы течений (Маньян, Китай, 2017).
3. Всероссийская конференция по аэрогидродинамике, посвященная 100-летию со дня рождения С. В. Валландера (Санкт-Петербург, 2017).

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы», в частности, пунктам:

- п. 5 — Динамика разреженных газов и молекулярная газодинамика.
- п. 18 — Аналитические, асимптотические и численные методы исследования уравнений кинетических и континуальных моделей однородных и многофазных сред (конечно-разностные, спектральные, методы конечного объема, методы прямого моделирования и др.).

ПОСТАНОВИЛИ:

Диссертационная работа **Рогозина Олега Анатольевича** «Численный и асимптотический анализ некоторых классических задач молекулярной газодинамики» представляет собой цельное и законченное научно-квалификационное исследование, в котором содержится решение задач, имеющих важное значение для развития динамики разреженного газа. Она выполнена и написана диссертантом самостоятельно, обладает внутренним единством. Все положения, представленные к защите, являются новыми и научно обоснованными. Результаты диссертации опубликованы с достаточной полнотой в ведущих рецензируемых отечественных и зарубежных журналах, которые соответствуют требованиям ВАК. Таким образом, диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы»**.

Заключение принято на заседании научного семинара отдела механики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, на котором присутствовало 18 человек. Результаты голосования: «за» — 18 чел., «против» — нет, «воздержались» — нет. Протокол № 2 от 2 ноября 2017 года.

Председатель



д.ф.-м.н. Степанов В. Я.

Секретарь



д.ф.-м.н. Аристов В. В.