

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Гермидер Оксаны Владимировны «Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в разреженных газах в микро- и наноканалах с различной конфигурацией сечения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы диссертации. Нанотечения – это активно развивающаяся область динамики разреженного газа. Основным объектом исследований в этой области являются процессы, протекающие в каналах микро- и наноразмерных технических систем, таких как микронасосы, наноподшипники, вакуумные датчики, системы охлаждения электронных компонентов. Особенностью, объединяющей вышеперечисленные процессы, является то, что их кинетика может быть описана на основе уравнения Больцмана или модельных кинетических уравнений. Диссертационная работа Гермидер О. В., связанная с разработкой математических моделей процессов переноса в разреженных газах в каналах с использованием модельного кинетического уравнения Вильямса, соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в РФ (указ Президента РФ от 07.07.2011 г. N. 899) - Индустрия наносистем. Работа развивает методы решения модельных кинетических уравнений. Актуализация методов математического моделирования в работе включает разработку алгоритмов вычислений макропараметров разреженных однокомпонентных газов в каналах с использованием полиномов Чебышёва и применением новейших компьютерных технологий в рамках кинетического подхода. Высокое научное и практическое значение объекта исследования в области моделирования наноразмерных технических систем, перспективность развиваемых в работе методов определяет актуальность темы и задач диссертационной работы.

Степень обоснованности и достоверности научных результатов исследований, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов, рекомендаций

и заключений, полученных в диссертации, подтверждается корректным применением численных методов интегрирования, математических методов решения модельных кинетических интегро-дифференциальных уравнений в частных производных, методов описания кинетики процессов, обоснованным анализом разработанных математических моделей и методов, апробацией полученных результатов в виде докладов на научных конференциях, публикаций в открытой печати, свидетельства регистрации программы на ЭВМ.

Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов. Комплексный подход к моделированию течений разреженного газа, предложенный автором, позволяет получить аналитические решения задач о тепловом крипе и течении Пуазейля в длинных микро- и наноканалах в зависимости размеров и конфигураций их поперечных сечений, значений коэффициента аккомодации тангенциального импульса и числа Кнудсена, для промежуточного режима течения газа, построить распределения вектора потока тепла и массовой скорости газа в поперечных сечениях каналов, вычислить значения потоков тепла и массы газа.

Теоретическая значимость связана с тем, что полученные математические модели, численные процедуры, алгоритмы могут быть применены при решении задач динамики разреженного газа и плазмы, теории переноса. **Практическая значимость** предложенного исследования обусловлена тем, что полученные математические модели, численные процедуры, алгоритмы и комплекс программ могут быть использованы при описании различных процессов переноса тепла и массы газа в микро- и наноканалах технических систем, в химической промышленности, при использовании вакуумного оборудования, разработке и проектировании микро- и наноэлектронных приборов.

Полученные в работе результаты прошли **достаточную апробацию**, докладывались на ряде авторитетных Всероссийских и международных конференциях. По теме диссертационного исследования опубликовано 25 работ, среди которых 15 входят в издания из списка ВАК РФ, 11 в одну из международ-

ных баз данных и систем цитирования Scopus, Web of Science. По результатам диссертации получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности за 2015-2016 г.г. проект №3628 «Создание вычислительной инфраструктуры для решения наукоемких прикладных задач».

Диссертация включает в себя Введение, четыре главы, Заключение, Список литературы из 99 наименований, двух Приложений, 27 рисунков, 25 таблиц. Объем диссертации составляет 147 страниц машинописного текста.

Во **Введении** обоснована актуальность темы проведенного исследования, сформулирована цель диссертационной работы и задачи исследования, показана ее научная новизна, научная и практическая значимости, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассмотрены общие принципы математического моделирования течений разреженного газа в длинных микро- и наноканалах. Приведено обоснование используемого в работе модельного кинетического уравнения Вильямса в качестве основного уравнения, описывающего кинетику процессов переноса. Определены модели граничных условий на стенках каналов и основные параметры при моделировании течений разреженного газа в каналах. Сформулированы основные положения, лежащие в основе математических моделей процессов переноса. Проведена линеаризация кинетического уравнения Вильямса и определены основные макропараметры газа в каналах через функцию распределения.

Во **второй главе** в первом разделе сформулированы условия задачи о тепловом крипе в рамках диффузной модели отражения. Во втором разделе рассмотрено неизотермическое течение разреженного газа в длинном прямоугольном канале. В предположении, что течение газа обусловлено продольным градиентом температуры, который является малым по абсолютной величине (задача о тепловом крипе), линеаризованное уравнение Вильямса сведено к квазилинейному дифференциальному уравнению в частных производных. Ре-

шение полученного уравнения найдено методом характеристик. Для этого записана система уравнений характеристик и получены два ее первых интеграла. Постоянные интегрирования, входящие в построенное решение, найдены из граничных условий на стенках канала. В результате получен явный вид функции распределения. Далее, исходя из статистического смысла функции распределения, построены профили вектора потока тепла и массовой скорости газа, а затем вычислены удельные потоки тепла и массы газа через поперечное сечение канала. Полученные численные результаты сравниваются с аналогичными результатами, представленными в литературных источниках. Проводится анализ полученных результатов для различных значений числа Кнудсена. С использованием описанной выше процедуры в остальных разделах второй главы получены аналитические решения краевых задач о тепловом крипе и течении Пуазейля для цилиндрического, эллиптического каналов и каналов, имеющих внутренний цилиндрический элемент.

В третьей главе построены математические модели течений разреженного газа в каналах при зеркально-диффузном отражении молекул газа от стенок каналов. Показано, что результаты, полученные на основании этих моделей, обобщают ранее найденные во второй главе результаты. Выявлено существенное влияние коэффициента аккомодации тангенциального импульса молекул газа на величины потоков при приближении к свободномолекулярному режиму течения.

В четвертой главе приведено описание алгоритмов и программного комплекса для нахождения макропараметров газа в каналах на основе построенных моделей с использованием полиномов Чебышёва. Данные алгоритмы реализованы в виде программного комплекса в системе компьютерной алгебры Maple 18.

В Заключении приводятся основные результаты, полученные в диссертационном исследовании.

Замечания.

1. Обзор работ по известным моделям в рамках рассматриваемых задач выглядит недостаточно полным. В частности, в диссертационной работе не упоминается о квазигазодинамических уравнениях. Каково преимущество кинетического подхода, развиваемого автором, по сравнению с применением квазигазодинамических уравнений?

2. В пункте 4.3 диссертации говорится, что программный комплекс разработан с использованием объектно-ориентированного подхода. Из приведенного в приложении В листинга кода программы это не очевидно. Возможно, имелось в виду использование встроенных объектов системы Maple?

Следует заметить, что высказанные замечания не снижают ценности и весомости диссертационного исследования, выполненного Гермидер О.В.

Заключение. Диссертация Гермидер О. В. «Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в разреженных газах в микро- и наноканалах с различной конфигурацией сечения» посвящена актуальной теме, связанной с математическим моделированием процессов, протекающих в разреженных газах в каналах, и вносит существенный вклад в развитие методов решения задач кинетической теории. В ней разработаны вычислительные алгоритмы для определения макропараметров течений газа в каналах микро- и наноразмерных системах, их реализация произведена в виде комплекса программ для проведения вычислительного эксперимента. Научные результаты диссертационной работы являются новыми и актуальными, своевременно и в полной мере отражены в научных публикациях автора. Область исследования и содержание диссертации полностью соответствует формуле специальности 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Автореферат диссертации правильно и полно отражает основное содержание работы.

Диссертация в полной мере соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства Российской

Федерации от 24 сентября 2013 г. №842), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Гермидер Оксана Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

заведующий кафедрой прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва», кандидат физико-математических наук, доцент

 Жалнин Руслан Викторович
23.05.19

Электронная почта: zhrv@mrsu.ru

Телефон: +7 (8342) 27-02-56

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева»,

Большевицкая ул., 68, г. Саранск, Республика Мордовия, 430005

Телефон: +7 (8342) 23-37-55; 29-05-45

Факс: +7 (8342) 47-29-13

Веб-сайт организации: <https://www.mrsu.ru>

Электронный адрес организации: dep-general@adm.mrsu.ru

