

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

В последнее время значительно возрос интерес к неизотермическим течениям разреженного газа в микро- и наноканалах различной конфигурации сечения. Интерес обусловлен как фундаментальным, так и прикладным значением микро- и наноразмерных систем в различных областях физики, химии, техники. В качестве примеров таких систем можно привести установки для создания высокоскоростных молекулярных пучков импульсного типа, для оценки утечки газа через компрессорные клапаны, наноподшипники, молекулярные насосы, используемые в оптических и масс-спектрометрах, вакуумные датчики Pirani и т.д. Разработка и применение микро- и наноразмерных систем потребовали проведения фундаментальных исследований, направленных на выяснение детальной структуры течения, выявление особенностей протекающих в них процессов тепло и массопереноса. В силу миниатюрности исследуемых устройств гидродинамическое описание, основанное на уравнениях Навье-Стокса-Фурье, оказывается неприменимым. Исследование должно проводиться на основе кинетического уравнения Больцмана или соответствующим образом выбранного модельного уравнения. В силу этого диссертация Гермидер О.В., посвященная математическому моделированию процессов тепло- и массопереноса в разреженных газах в микро- и наноканалах с различной конфигурацией сечения, является актуальной.

Для решения поставленной задачи диссертантом рассмотрены общие принципы математического моделирования течений разреженного газа в длинных микро- и наноканалах, приведено обоснование используемого в работе модельного кинетического уравнения Вильямса, определены модели граничных условий на стенках каналов и основные параметры при моделировании течений разреженного газа в каналах. Сформулированы основные положения, лежащие в основе построения математических моделей процессов переноса. Проведена линеаризация кинетического уравнения

Вильямса и определены основные макропараметры газа в каналах через функцию распределения.

Аналитическое решение сформулированного уравнения О.В.Гермидер вначале осуществила для течений слабо неравновесного разреженного газа в длинных каналах с использованием модели диффузного отражения молекул газа стенками канала. С этой целью соискателем предложена в работе общая процедура построения математических моделей процессов переноса в каналах различного сечения. Вначале рассмотрено течение разреженного газа в канале прямоугольного сечения. В предположении, что течение газа обусловлено продольным градиентом температуры, который является малым по абсолютной величине, линеаризованное уравнение Вильямса сведено к квазилинейному дифференциальному уравнению первого порядка в частных производных. Первые независимые интегралы системы характеристик полученного уравнения построены с использованием метода характеристик. Из граничных условий на стенках канала найдены значения постоянных интегрирования, входящие в интегралы системы, что позволило диссертанту записать функцию распределения в явном виде. На основе построенной функции распределения получены профили вектора потока тепла и массовой скорости газа в канале. С учетом определения компонент векторов потоков найдены приведенные безразмерные потоки тепла и массы газа. Анализ полученных результатов при переходе к предельным режимам течения и сравнение с аналогичными результатами, имеющимися в открытых источниках, показал хорошую адекватность предлагаемой модели. Ценным результатом работы является то, что указанная процедура также использована для построения математических моделей процессов переноса в прямом круговом, эллиптическом цилиндрах, в пространстве между двумя коаксиальными цилиндрами, в прямоугольном канале с внутренним круговым элементом.

Построенные математические модели течений разреженного газа в каналах затем были обобщены при использовании зеркально-диффузной модели отражения молекул газа от стенок каналов. Показано, что результаты, полученные на основании этих моделей, обобщают результаты для диффузного отражения. Выявлено существенное влияние коэффициента аккомодации тангенциального импульса молекул газа на величины потоков тепла и массы газа при приближении к свободномолекулярному режиму течения.

Для вычисления макрохарактеристик течений по найденным модельным решениям диссертантом предложен алгоритм вычисления многомерных интегралов с использованием полиномов Чебышёва, на основе которого разработан программный комплекс, реализованный в системе компьютерной

алгебры Maple 18. Предложенный программный комплекс включает в себя программы для вычисления значений приведенных потоков тепла и массы газа в каналах, а также для построения компонент массовой скорости и вектора потока тепла. Разработана структура программного комплекса, а также его основные элементы и инструменты моделирования с описанием функциональных возможностей. С использованием разработанного программного комплекса выполнен ряд верифицированных расчетов.

Список литературы содержит 99 наименований и достаточно полно отражает состояние рассматриваемой проблемы.

Научная новизна диссертации Гермидер О.В. по заявленной научной специальности заключается в:

– разработке комплексного подхода к моделированию течений разреженного газа с применением аналитических методов для построения решений кинетического модельного уравнения с частотой, пропорциональной молекулярной скорости, и численных методов для получения значений потоков тепла и массы газа в микро- и наноканалах технических систем различного поперечного сечения (п.5 Паспорта специальности – комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента);

– разработке метода моделирования, позволившего получить новые модели процессов переноса в каналах в зависимости от геометрии сечения этих каналов, значений числа Кнудсена и характера взаимодействия молекул газа со стенками канала (п.1 Паспорта специальности – разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений);

– разработке алгоритмов расчета макропараметров газа в канале с использованием полиномов Чебышёва и осуществлении их программной реализации (п.4 Паспорта специальности – реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента).

Таким образом, в работе имеются новые научные результаты по всем компонентам специальности. В работе преобладают математические методы исследования, поэтому диссертация относится к отрасли физико-математических наук.

Обоснованность основных научных результатов диссертации обусловлена тем, что в их основу положены фундаментальные уравнения классической кинетической теории переноса газа и плазмы, классические методы решения интегро-дифференциальных уравнений в частных

производных и методы численного интегрирования. Достоверность результатов подтверждается их согласием с частными результатами, полученными в рамках других моделей, а также с экспериментальными результатами по переносу инертных газов. Разработанные вычислительные алгоритмы верифицированы на модельных двухмерных и трехмерных задачах.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в том, что полученные математические модели, разработанные численные алгоритмы и процедуры могут быть применены для решения 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, микро- и нанoeлектронных приборов.

Полученные Гермидер О.В. результаты прошли достаточную апробацию. Они опубликованы в 25 работах, среди которых 15 входят в издания, рекомендованные ВАК РФ для публикации результатов диссертационных исследований, 11 в одну из международных баз данных и систем цитирования Scopus и Web of Science, докладывались на целом ряде авторитетных Всероссийских и международных конференций. По результатам проведенного исследования оформлено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В качестве критических замечаний можно отметить:

1. В работе рассмотрен только тепловой крип и течение Пуазейля. Не обсуждается, применимы ли разработанные методы моделирования для всего комплекса эффектов Кнудсеновских течений, таких как парадокс Кнудсена, термомеханический эффект, термофорез и другие.

2. Авторский метод моделирования использует граничные условия диффузного или зеркально-диффузного отражения на стенках канала. Возможно ли обобщение данного метода на случай аккомодации энергии на стенках и различных видов сорбции газа?

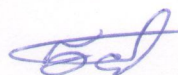
3. Недостаточно обоснована необходимость разработки специального метода численного интегрирования для рассматриваемой задачи по сравнению с известными методами высокой точности, например, Гаусса-Кристоффеля.

Высказанные замечания не снижают качество и ценность диссертационного исследования, выполненного Гермидер О.В.

Диссертация Гермидер Оксаны Владимировны «Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в разреженных газах в микро- и наноканалах с различной конфигурацией сечения», является завершённой научно-исследовательской работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе получены новые научные результаты для решения актуальной задачи – аналитического моделирования кнудсеновского течения газов в прямолинейных каналах. Полученные автором результаты достоверны, выводы в заключении обоснованы.

Автореферат достаточно полно отражает содержание выполненного соискателем диссертационного исследования. Работа полностью соответствует критериям, установленным п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её 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: доктор физико-математических наук
(специальность: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния),
профессор, заведующий кафедрой Высшей математики и
физико-математического моделирования, ФГБОУ
«Воронежский государственный технический университет»,
e-mail: ibat@mail.ru
тел.: +7(473) 246-42-22



Батаронов Игорь Леонидович

ФГБОУ «Воронежский государственный технический университет»,
Московский проспект, 14, г. Воронеж, 394026
Телефон: +7(473) 271-59-05
Факс: +7(473) 271-59-05
Веб-сайт организации <http://cchgeu.ru/>
Электронный адрес организации rectorat@vgasu.vrn.ru

Подпись И.Л.Батаронова заверяю
Проректор по научной работе ВГТУ
доктор технических наук



И.Л. Дроздов