

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе и
научно-технической политике ФГБОУ
ВО «МГТУ «СТАНКИН»
кандидат технических наук
Зеленский А.А.

2019 г.



**ОТЗЫВ
ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» на диссертационную работу Гермидер Оксаны Владимировны «Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в разреженных газах в микро- и наноканалах с различной конфигурацией сечения», представленную к защите в диссертационный совет Д 212.038.20 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы диссертации. Математическое моделирование процессов переноса в каналах и микроканалах различного поперечного сечения в силу большого числа приложений представляет собой одну из наиболее важных в прикладном значении областей динамики разреженного газа. Особая роль в исследованиях, проводимых в последнее время в данной области динамики разреженного газа, связана с развитием современной микропроцессорной техники, микро- и наноэлектронных механических систем (MEMS/NEMS), вакуумных технологий и т.д. Разработка и применение микро- и наноразмерных устройств, а также их комплектующих потребовали проведения фундаментальных исследований, направленных на выяснение детальной структуры течения, выявление особенностей протекающих в них процессов тепло и массопереноса. При этом потребовалось в общем случае не только получение интегральных

характеристик течения, таких как средние значения потоков через поперечное сечение канала, но и их распределение по сечению канала, учитывающее характер взаимодействия молекул газа со стенками канала. В силу миниатюрности исследуемых устройств, значение числа Кнудсена, характеризующего течение газа в микро и наноканалах, как правило, велико. Это приводит к тому, что гидродинамическое описание, основанное на уравнениях Навье-Стокса-Фурье, оказывается неприменимым. Исследование должно проводиться на основе кинетического уравнения Больцмана или соответствующего модельного уравнения. Диссертационная работа Гермидер Оксаны Владимировны посвящена построению математических моделей тепло- и массопереноса в разреженных газах через каналы с различной конфигурацией поперечного сечения в широком диапазоне изменения значений числа Кнудсена в рамках кинетического подхода. В диссертации делается акцент на решении модельного кинетического уравнения Вильямса с частотой столкновений, зависящей от молекулярной скорости газа, что позволяет получить выражения для функции распределения и на их основе вычислить значения потоков тепла и массы газа через сечения каналов.

Научная новизна исследований и полученных результатов.

Диссертационная работа Гермидер О.В. развивает методы решения задач динамики разреженных газов. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

- построены новые математические модели процессов тепло- и массопереноса в прямых длинных микро- и наноканалах с учетом формы и размеров их поперечных сечений в рамках задач о тепловом крипе и течении Пуазейля с использованием уравнения Вильямса, диффузных и зеркально-диффузных граничных условий Максвелла;
- получены распределения вектора потока тепла и массовой скорости газа в поперечных сечениях каналов, вычислены значения приведенных потоков тепла и массы газа; показано, что выражения для макроскопических величин в свободномолекулярном режиме согласуются с результатами, полученными на основе уравнения Больцмана для бесстолкновительного газа;
- предложены эффективные алгоритмы расчета макропараметров газа с использованием полиномов Чебышёва. Выполненный в работе анализ полученных результатов показал, что предложенные алгоритмы позволяют получать верифицированные наборы значений макропараметров газа для произвольных значений числа Кнудсена при диффузном и зеркально-диффузном отражении молекул газа от внутренних поверхностей каналов;

- разработан комплекс программ для ЭВМ с проведением вычислительных экспериментов.

Степень обоснованности и достоверности научных результатов исследований, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Обоснованность научных результатов исследования, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается использованием фундаментальных уравнений классической кинетической теории переноса газа и плазмы, классических методов решения интегро-дифференциальных уравнений в частных производных, методов численного интегрирования. Результаты вычислительных экспериментов подтверждены сопоставлением с данными, имеющимися в литературе.

Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных в диссертации. Теоретическая значимость результатов заключается в возможности использования полученных в диссертационной работе математических моделей для решения задач динамики разреженного газа и плазмы, теории переноса.

Практическая значимость результатов состоит в том, что разработанные и реализованные в виде программного комплекса вычислительные алгоритмы могут быть использованы для исследования процессов, протекающих в прямых каналах в системах MEMS и NEMS, в вакуумных технологиях. Полученные в диссертации результаты могут быть применены в высшей школе при подготовке аспирантов физико-математического профиля.

Оценка структуры и содержания работы. Диссертация представлена на 147 страницах, состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 99 наименований и двух приложений.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна, научная и практическая значимость проведенного исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов диссертации.

В первой главе рассмотрены общие вопросы, связанные с математическим моделированием течений разреженного газа в каналах. Обоснован выбор используемой модели кинетического уравнения Больцмана, граничного условия на стенках канала. Содержится описание положений, на которых основано построение математических моделей процессов переноса в каналах через функцию распределения. Приведены выражения для нахождения потоков тепла и массы в каналах.

Вторая глава посвящена построению математических моделей процессов тепло- и массопереноса в прямоугольном, цилиндрическом, эллиптическом канале и в каналах, имеющих внутренний цилиндрический элемент, с использованием линеаризованного уравнения Вильямса и диффузного граничного условия в рамках задач о тепловом крипе и течении Пуазейля. Для нахождения функции распределения молекул газа по координатам и скоростям получено решение краевой задачи, состоящей из неоднородного дифференциального уравнения с частными производными и однородными граничными условиями на стенках канала. С использованием найденной функции распределения построены профили массовой скорости и вектора потока тепла, получены выражения приведенных потоков для промежуточного режима течения и вычислены значения этих потоков. Проведен их сравнительный анализ с результатами, полученными на основе БГК и S моделей кинетического уравнения Больцмана с постоянной частотой столкновения и свободномолекулярного решения. Получены явные аналитические формулы для определения приведенных потоков в прямоугольном и слабдеформированном эллиптическом канале в свободномолекулярном режиме течения.

В третьей главе построены математические модели процессов переноса в каналах с использованием зеркально-диффузного отражения молекул газа от стенок каналов. Использование данной модели отражения приводит к тому, что граничные условия краевых задач перестают быть однородными и решение линеаризованной задачи находится с учетом значений коэффициента аккомодации тангенциального импульса молекул газа. Для свободномолекулярного режима течения получены асимптотические выражения для потоков массы газа и тепла

В четвертой главе представлены вычислительные алгоритмы с использованием многочленов Чебышёва и программный комплекс для нахождения значений макропараметров газа в канале. Описана структура разработанного комплекса и рассмотрены его основные элементы и инструменты моделирования с описанием функциональных возможностей.

Замечания по диссертационной работе. По тексту диссертационной работы Герמידер О.В. имеются следующие замечания:

1. При записи (1.2.7) не указано, что автор понимает под приведенными потоками тепла и массы газа через поперечное сечение канала.

2. На странице 17 не закончена фраза «происходит полная аккомодация энергии падающих частиц». Не ясно, в какой ситуации это происходит.

3. На странице 20 не корректна фраза «в предположении тепловой непроницаемости стенок канала для молекул газа». Правильнее было бы написать «с учетом непроницаемости стенок канала молекулами газа».

4. Не пояснен смысл параметров T_* , n_* , U_* на странице 20.

5. Из формул (2.2.17) и (2.2.18), вообще говоря, не видно, что «приведенные потоки тепла и массы газа не зависят явно от размеров сечения канала, а определяются их отношением $a = a'/b'$ и числом Кнудсена Kn ». Аналогичный вопрос относится и к выводу, приведенному на странице 53 при рассмотрении двух коаксиальных цилиндров.

6. В работе ничего не сказано относительно выбора рассмотренных конфигураций сечений канала. Чем этот выбор был обусловлен?

7. В работе не сказано, как задавалась точность вычислений, и чем руководствовался автор, приводя в таблицах результаты расчетов с четырьмя знаками после запятой.

8. В работе не указаны характеристики использовавшегося для вычислений процессора и время счета.

Следует, однако, отметить, что высказанные замечания никак не снижают научную и практическую значимость результатов, полученных в диссертационной работе, и не влияют на положительную оценку работы.

Рекомендации по практическому использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации. Тема диссертационного исследования соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в РФ (указ Президента РФ от 07.07.2011 г. N. 899) - Индустрия наносистем, и может внести вклад в развитие критической технологии РФ - Компьютерное моделирование наноматериалов, наноустройств и нанотехнологий. Результаты диссертационной работы О.В. Гермидер могут быть использованы в научных исследованиях и в учебном процессе, реализуемых в ведущих университетах страны, в научно-исследовательских, проектных учреждениях и организациях, занимающихся проектированием, конструированием, математическим и компьютерным моделированием процессов, протекающих в наносистемах.

Заключение. На основе проведенного анализа материалов диссертации и автореферата, учитывая научную новизну, теоретическую и практическую значимость полученных научных результатов, их достоверность и обоснованность, считаем, что диссертационная работа Гермидер Оксаны Владимировны «Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в разреженных газах в микро- и наноканалах с различной конфигурацией сечения» представляет собой законченную научную работу

по актуальной теме, имеющую существенное значение в области математического моделирования процессов, протекающих в микро- и нанoeлектронных системах. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (физико-математические науки), в частности: п.1 «разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений», п.4 «реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента», п.5 «комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента». Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертационной работы. Основные результаты опубликованы в 25 научных работах, в том числе 15 публикациях в изданиях из перечня ВАК РФ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Диссертационная работа Гермидер Оксаны Владимировны «Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в разреженных газах в микро- и наноканалах с различной конфигурацией сечения» по своему научному уровню, практической значимости, степени новизны полученных результатов соответствует всем требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв обсуждён на заседании кафедры прикладной математики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (протокол заседания № 8-18/19 от «24» мая 2018 года).

Заведующий кафедрой
прикладной математики ФГБОУ ВО
«МГТУ «СТАНКИН»
доктор физико-математических наук,
профессор

Уварова Л.А.

Подпись руки *Уварова Л.А.* удостоверяю
УД ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
Документовед Берюшнев ЕИ
30.05.2019

