

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Михаила Викторовича Чернышова  
на диссертацию Шакуровой Лии Алимджановны  
на тему «Эффекты скольжения в смесях газов с поуровневой кинетикой и поверхностными  
реакциями», представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Исследование Л.А. Шакуровой посвящено изучению эффектов скольжения в многокомпонентных газовых смесях, взаимодействующих с твердыми поверхностями. Работа направлена на теоретическое описание процессов, возникающих на микроскопическом уровне, и их влияние на макроскопические характеристики течения. В диссертации выполнен переход от локального взаимодействия молекул и атомов с поверхностью к формулировке граничных условий, применимых для расчета неравновесных газодинамических потоков.

Тема работы **актуальна**, поскольку решается задача учета сложных молекулярных эффектов, возникающих в реальных неравновесных течениях реагирующих газовых смесей, на гидродинамическом уровне. Процессы, изучаемые в диссертации, наблюдаются у поверхности спускаемых аппаратов, входящих в атмосферу планеты, поэтому тематика востребована в аэрокосмических приложениях, особенно в связи с развитием технологий летательных аппаратов, совершающих полеты в плотных и относительно разреженных слоях атмосферы с большой сверхзвуковой скоростью. Данные процессы до настоящего времени не удавалось смоделировать с использованием классических моделей гидродинамики. В диссертации основное внимание уделено разработке нового подхода для получения граничных условий скольжения с учетом газофазных и поверхностных реакций, а также эффектов разреженности. Автор демонстрирует, как эти эффекты могут быть интегрированы в граничные условия для макроскопических параметров, характерных для поуровневого описания газовых течений.

**Новизна** исследования заключается в оригинальной постановке задачи взаимодействия разреженных газов с поверхностью, учитывающей микроскопические характеристики молекулярных процессов. Предложенное кинетическое граничное условие впервые позволило учесть процессы адсорбции, десорбции, рекомбинацию, обменные реакции, возбуждение колебательных степеней свободы в выражениях для скорости скольжения, скачка температуры и массовых потоков частиц к поверхности. Работа также отличается глубокой детализацией

учета поверхностных реакций, которые ранее рассматривались только на основе упрощенных моделей.

**Основные результаты** исследования включают: 1) новое кинетическое граничное условие для функции распределения частиц, записанное для случая поуровневого приближения; 2) метод получения граничных условий скольжения на основе предложенного кинетического граничного условия; 3) выражения для граничных условий скольжения для разных ядер рассеяния; 4) результаты численного моделирования течения смеси воздуха в пограничном слое на линии торможения, оценки влияния моделей каталитичности стенки и эффектов разреженности на параметры течения и тепловой поток.

**Достоверность** результатов обеспечена использованием строгих методов кинетической теории и проверкой разработанных подходов с помощью численных расчетов. Приведенные результаты демонстрируют согласованность с известными теоретическими данными. В частности, получено хорошее согласие вероятностей рекомбинации компонентов воздуха на поверхности из диоксида кремния с результатами, полученными методами молекулярной динамики.

**Теоретическая значимость** работы состоит в разработке и обосновании нового метода получения граничных условий для разреженных газовых потоков, включающего корректный учет поверхностных реакций. **Практическая значимость** работы выражена в возможности применения разработанного подхода к задачам высокоскоростной аэродинамики, где эффекты скольжения и теплового взаимодействия с поверхностью играют важную роль. В частности, на мой взгляд, они могут, при условии продолжения исследований в прикладном направлении, внести вклад в развитие систем теплозащиты не только возвращаемых, но и невозвращаемых высокоскоростных летательных аппаратов, движущихся в среде относительно разреженного газа. В частности, математические модели кнудсеновского слоя (с использованием граничных условий, разработанных автором) могут быть применены для оценки эффективности термоэмиссионного охлаждения поверхностей высокоскоростных летательных аппаратов, движущихся в относительно разреженной среде. Ранее была неоднократно показана (в работах А.В. Колычева, В.А. Керножицкого, М.В. Чернышова и др.), что методы и технологии термоэмиссионного охлаждения эффективны для тепловой защиты аппаратов в космическом пространстве. Вместе с тем, публикации П.В. Булата, М.Е. Ренева и других авторов свидетельствуют, что при движении в плотной воздушной среде термоэмиссионные эффекты становятся пренебрежимо малыми. Было бы целесообразно провести оценку эффективности

и целесообразности термоэмиссионного охлаждения при сверхзвуковом движении летательных аппаратов в относительно разреженной среде, адекватно описываемой математическими моделями обтекания со скольжением.

**Публикации.** Результаты работы в достаточной степени представлены в 12 статьях, две из которых опубликованы в журналах первого квартала (Q1) международных баз данных научного цитирования. Кроме того, материалы диссертации были апробированы на ряде конференций, включая крупные международные форумы.

**Замечания:**

1. В параграфе 3.2.7 представленной диссертационной работы показано, что значение коэффициента аккомодации существенно влияет на параметры потока воздуха в гиперзвуковом пограничном слое. Вместе с тем, неясно, как определяется коэффициент аккомодации в зависимости от свойств поверхности, высоты и скорости полета, других условий.

2. В русскоязычной версии рукописи диссертации присутствуют, на мой взгляд, неоправданные включения на английском и латинском языках (“Extension I”, “Extension II”, “Model I”, “Present model”, “Barbato model”, “Dr. I. Armenise” без русской транскрипции, “ab initio”). К счастью, количество таких включений невелико.

3. В список цитируемых работ, содержащийся в русскоязычной версии рукописи диссертации, включены не работы отечественных ученых, опубликованные первоначально на русском языке (в журналах “Прикладная математика и механика”, “Известия РАН. Механика жидкости и газа”, “Теплофизика высоких температур” и др.), а их переводы, опубликованные в переводных версиях этих журналов (см. ссылки [105, 108, 124, 126, 152, 153] и ряд других). Такой подход к составлению списка источников к публикации на русском языке нельзя назвать целесообразным.

Данные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация логично структурирована, включает теоретическую часть, детальный анализ моделей и численных результатов. Содержание изложено последовательно, что облегчает восприятие сложного материала. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, вносящей заметный вклад в развитие методов неравновесной газовой динамики.

Диссертация Шакуровой Лии Алимджановны на тему: «Эффекты скольжения в смесях газов с поуровневой кинетикой и поверхностными реакциями» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения

ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете». Соискатель Шакурова Лия Алимджановна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета

доктор технических наук,

кандидат физико-математических наук, доцент,

профессор кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника» (А9)

ФГБОУ ВО «Балтийский государственный

технический университет

«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

**М.В. Чернышов**

05.12.2024 г.

ПОДПИСЬ  
УДОСТОВЕРЯЮ

*Чернышова М.В.*

НАЧАЛЬНИК УПРАВЛЕНИЯ  
КАДРОВ



*Селуф 05.12.2024*