

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана

Математико-механического факультета
Дмитрий Вадимович Луцив

(подпись)

(инициалы, фамилия)

« 26 »

июль

2024 г



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

По итогам рассмотрения и обсуждения
Диссертации Шакуровой Лии Алимджановны
(ФИО соискателя ученой степени)

представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Ученая степень

по теме «Эффекты скольжения в смесях газов с поуровневой кинетикой и
поверхностными реакциями»
(тема диссертации)

по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы
шифр и наименование научной специальности (научных специальностей)

и выполненной в Федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный
университет», 2024

а также представленных соискателем научных публикаций, в которых излагаются основные научные результаты диссертации, приняты следующие решения, замечания и рекомендации:

Диссертация Шакуровой Лии Алимджановны посвящена разработке теоретического подхода для получения граничных условий скольжения макропараметров течения реагирующей газовой смеси. Смесь рассматривается на основе детального поуровневого приближения. Предложенный подход сравнивается с методами Грэда и Паттерсона–Шидловского для выявления его преимуществ. Помимо этого, предложено дальнейшее обобщение подхода для учета влияния гетерогенных процессов, таких как адсорбция/десорбция, колебательное возбуждение/деактивация и химические реакции. Получены системы граничных условий для двух различных моделей рассеяния частиц на поверхности твердого тела. Валидация моделей основана на теоретическом анализе, сравнении с другими известными моделями граничных условий, а также на сравнении рассчитанных эффективных скоростей гетерогенной рекомбинации с результатами молекулярно-динамического моделирования. Граничные условия скольжения интегрируются в гидродинамический решатель для моделирования динамики и кинетики смеси пятикомпонентного воздуха в пограничном слое на линии торможения. На основе этой же задачи исследуется влияние разреженности газа и каталитичности стенки на

параметры течения.

Актуальность темы диссертации связана с необходимостью разработки точных моделей, описывающих взаимодействие неравновесных потоков разреженного газа с твердыми поверхностями. Эти модели важны для анализа входа космических аппаратов в атмосферу планет и моделирования газовых течений в микроканалах. Они также необходимы для учета неравновесных гетерогенных процессов, таких как каталитические реакции, абляция и ионизация. Детальные модели позволяют точно оценить влияние разреженности и гетерогенных процессов на характеристики течения, включая поверхностный тепловой поток.

Работа содержит 131 страницу и состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

В первой Главе выводятся граничные условия для макропараметров сильнонеравновесных течений многокомпонентных газовых смесей в режиме скольжения с использованием двух подходов: обобщенного метода Грэда и разработанного подхода, основанного на кинетическом граничном условии. Показано, что для зеркально-диффузного рассеяния на твердой стенке оба подхода эквивалентны, однако второй подход предлагает более строгое математическое описание и легко применим для других моделей взаимодействия газа с поверхностью. Приведены выражения для граничных условий скольжения для двух типов рассеяния: Максвелла и Черчиньяни–Лампис.

Во второй Главе обобщается теоретический подход, разработанный ранее, для корректного учета влияния гетерогенных реакций. Процедура вывода граничных условий аналогична методике из предыдущей главы, однако выражения зависят от вероятностей гетерогенных процессов, а не от эмпирических коэффициентов. Помимо этого, в Главе проведено сравнение известных теоретических и феноменологических моделей для учета каталитичности поверхности.

В третьей Главе проводится численная верификация полученных условий на примере задачи о течении газа в гиперзвуковом пограничном слое. Для этого граничные условия скольжения реализуются в CFD-решателе для моделирования динамики и кинетики воздуха в пограничном слое на линии торможения. Влияние граничных условий на параметры потока оценивается на основе семи тестовых случаев, с учетом или без учета скачка температуры и различных моделей каталитичности стенки. Также исследуется влияние моделей рассеяния, скоростей диффузии и различных обобщений подхода.

Наиболее значимые научные результаты, полученные автором лично:

1. Сформулирован строгий самосогласованный подход к получению поуровневых граничных условий для макропараметров течений неравновесных газовых смесей из кинетического граничного условия.

2. Посредством теоретического анализа выявлены проблемы, связанные с учетом гетерогенных реакций в рамках известных теоретических методов. Проблемы состоят в невозможности учета вкладов частиц различных сортов в массовые потоки на стенке, что также подтверждается численным моделированием.

3. Предложено обобщение классического кинетического граничного условия для функции распределения путем включения членов, описывающих образование и потерю частиц вследствие гетерогенных процессов.

4. На основе моделей рассеяния частиц Максвелла и Черчиньяни–Лампис получены граничные условия скольжения в поуровневом приближении, включающие в себя выражения для скорости скольжения, скачка температуры и массовых потоков частиц.

5. Обнаружена зависимость полученных граничных условий от диагональных компонент тензора напряжений – объемной вязкости и релаксационного давления,

учитывающих быстрые неупругие поступательно-вращательные обмены энергией при взаимодействии частиц.

6. Изучено влияние степени разреженности газа, гетерогенной рекомбинации и скачка температуры на параметры течения воздуха в пограничном слое на линии торможения. Продемонстрировано существенное влияние скачка температуры на аэродинамические характеристики и тепловой поток к поверхности, при этом влияние гетерогенных реакций на поверхности из диоксида кремния оказывается более слабым.

7. Исследованы эффекты от применения различных моделей скорости диффузии в граничных условиях скольжения. Выявлено, что модели диффузии оказывают заметное влияние на концентрации частиц и тепловой поток вблизи поверхности.

Шакурова Лия Алимджановна окончила с отличием программу аспирантуры (2019–2023 гг.) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» по направлению подготовки «Механика жидкости, газа и плазмы». Научный руководитель – доктор физ.-мат. наук, профессор Кустова Елена Владимировна. Результаты научных исследований Шакуровой Л.А. были представлены на 8 конференциях. Всего диссертантом опубликовано 15 работ по теме исследования, из которых 4 статьи опубликовано в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science, 1 статья опубликована в журнале, рекомендованного ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Считаем, что диссертация Шакуровой Лии Алимджановны на тему «Эффекты скольжения в смесях газов с поуровневой кинетикой и поверхностными реакциями» представляет фундаментальный научный и практический интерес, вносит вклад в развитие кинетической теории разреженных газов, газовую динамику неравновесных течений смесей газов со связанной колебательной релаксацией и химическими реакциями, моделирование неравновесных физико-химических процессов на поверхности. Работа диссертанта содержит целый ряд новых интересных результатов для указанных областей. Работа хорошо оформлена, удовлетворяет всем необходимым требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, и рекомендуется к защите по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Нарушения со стороны Шакуровой Лии Алимджановны

ФИО соискателя

п. 11 Приказа СПбГУ от «19» ноября 2021 г. №11181/1

не выявлены

не выявлены, выявлены

и Приказа СПбГУ от 03.07.2023 № 9287/1

не выявлены

не выявлены, выявлены

Все основные выносимые на защиту научные материалы диссертации опубликованы в предложенных соискателем статьях.

Коллектив сотрудников Кафедры гидроаэромеханики СПбГУ

наименование подразделения

рекомендовал

рекомендовал / не рекомендовал / рекомендовал при условии устранения замечаний

диссертацию **Шакуровой Лии Алимджановны**

ФИО соискателя

по теме **«Эффекты скольжения в смесях газов с поуровневой кинетикой и поверхностными реакциями»**

тема диссертации

к защите на соискание ученой степени **кандидата физико-математических наук**

ученая степень

по научной специальности **1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы**

шифр и наименование научной специальности (научных специальностей)

При проведении голосования коллектива сотрудников Кафедры гидроаэромеханики (протокол заседания № 44/8/6-02-1 от 24.06.2024) в количестве 8 человек, участвовавших в заседании из 11 человек штатного состава:

Проголосовали «за»: 7 (Кустова Е.В. участие в голосовании не принимала),

«против»: 0,

«воздержались»: 0.

Подписал: профессор

(должность)

Кафедры гидроаэромеханики

(наименование структурного подразделения)

д.ф.-м.н.

(ученая степень)

профессор

(ученое звание)



(подпись)

А. Н. Рябинин / 24.06.2024

Расшифровка подписи, дата