

## Отзыв

председателя диссертационного совета Сайфутдинова Алмаз Ильгизовича  
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

Диссертация Шакуровой Лии Алимджановны посвящена разработке строгих математических моделей граничных условий скольжения в реагирующих смесях газов с учетом колебательно-химической кинетики и протеканием реакций на поверхности твердого тела. Такие модели необходимы для описания тел, движущихся со сверх- и гиперзвуковыми скоростями, в частности, для описания входа космических аппаратов в атмосферы планет. Кроме того, они могут быть полезны и для описания процессов, протекающих в химических и плазмохимических реакторах. Очевидно, что актуальность работы не вызывает сомнений.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Диссертация изложена на 131 странице, включая 44 рисунка и 6 таблиц. Список литературы содержит 153 библиографических ссылки.

В **первой главе** представлен подробный вывод граничных условий скольжения для расширенной системы уравнений гидродинамики, учитывающей колебательно-химическую кинетику, газовую динамику, процессы переноса и поверхностные неравновесные процессы. Было рассмотрено два подхода. Первый был основан на методе Грэда, обобщенном на течения реагирующих газов с быстрыми и медленными процессами. Второй подход основан на кинетическом граничном условии. Диссертантом было показано, что для Максвелл-Больцмановского взаимодействия частиц газа с поверхностью оба выведенных условия эквивалентны. Однако второй подход, основанный на кинетическом граничном условии, обладает дополнительными преимуществами, поскольку обобщается на другие ядра рассеяния и модели взаимодействия газа с поверхностью.

Во **второй главе** диссертантом развит новый подход, позволяющий получить граничные условия скольжения для поуровневого набора макропараметров в приближении вязкого теплопроводного газа. Подход основан на обобщении кинетического граничного условия, позволяющего

корректным образом учитывать различные неравновесные поверхностные процессы, такие как адсорбция/десорбция, колебательное возбуждение/деактивация и гетерогенные химические реакции.

**В третьей главе** была проведена верификация выведенных граничных условий на примере моделирования динамики и поуровневой кинетики воздуха в гиперзвуковом пограничном слое на линии торможения. Автором были рассмотрены различные случаи разреженности газа. Были рассчитаны вероятности рекомбинации и эффективные коэффициенты скорости реакции, которые за тем сравнивались с результатами молекулярно-динамического моделирования. Влияние модели граничных условий на параметры потока оценивались путем сравнения полученных результатов в рамках семи различных тестовых случаев.

Наиболее **значимые научные результаты** заключаются в том, что автором сформулирован строгий самосогласованный подход, который позволяет получить граничные условия скольжения для макропараметров течений неравновесных газовых смесей из кинетического граничного условия с учетом произвольной модели рассеяния частиц твердой стенкой, а также с учетом влияния неравновесных гетерогенных процессов. Установлен общий вид выражений для массовых потоков на поверхности, корректно учитывающих влияние гетерогенных процессов. Кроме того, диссертантом представлены результаты численного моделирования течения смеси воздуха в пограничном слое на линии торможения и проведена оценка влияния различных моделей каталитичности стенки, а также подтверждены выводы о необходимости использования разработанного самосогласованного подхода.

**Практическая значимость** заключается в том, что были строго выведены граничные условия скольжения на основе кинетического подхода и интегрированы в программные коды вычислительной газовой динамики. Кроме того, автором сформулированы рекомендации по необходимости учета скачка температуры при выборе моделей граничных условий.

По работе имеются **несколько вопросов и замечание**:

1) При рассмотрении движения тел с гиперзвуковыми скоростями необходимо учитывать формирование плазменного слоя, в котором образуются не только заселенности с колебательным и вращательным возбуждением, но также и электронно-возбужденные атомы и молекулы. В связи с этим возникает вопрос, можно ли адаптировать выведенные граничные условия, в частности, основанные на кинетическом подходе с учетом

образования электронно-возбужденных уровней? На сколько сильно при этом усложнятся граничные условия и их реализация в CFD-решателе?

2) Второй вопрос связан с испарением частиц движущегося тела в пограничный слой - абляцией. Диссертантом в заключении упоминается о возможном дальнейшем развитии модели с учетом этого явления, и сложностью, связанной с необходимостью учета временной составляющей. Можно ли подробнее пояснить этот момент?

3) Автором реализовано 7 тестовых расчетов с достаточно большими наборами элементарных процессов с участием частиц воздушной смеси. Хотелось бы уточнить проводилась ли оценка влияния погрешностей в определении сечений колебательных переходов на характеристики потоков вблизи поверхности тел в рамках уже существующих моделей граничных условий и моделей, полученных автором.

4) На мой взгляд, заключение диссертации можно было бы структурировать и сократить, выделив наиболее важные результаты проведенных исследований.

Указанные вопросы и замечания являются скорее пожеланиями для дальнейшей научной деятельности диссертанта и не затрагивают основных выводов и результатов диссертации, не снижают их научной ценности и не ставят под сомнение их значимость.

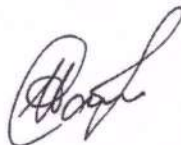
Научная новизна и значимость исследования не вызывает сомнений и обусловлены как актуальностью изучаемой проблемы и выбором метода исследования, так и объемом и качеством полученных результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием строгих методов кинетической теории, проведением детальных сравнений полученных выражений с другими известными моделями условий скольжения и численными расчётами.

Результаты апробированы на известных международных конференциях и опубликованы в 5 статьях, индексируемых Web of Science, Scopus и рекомендованных ВАК.

**Заключение.** Диссертация Шакуровой Лии Алимджановны на тему «Эффекты скольжения в смесях газов с поуровневой кинетикой и поверхностными реакциями» соответствует паспорту научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы и является законченной научно-квалификационной работой, которая по уровню выполнения, объему и актуальности, новизне, значимости и достоверности полученных результатов соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 №11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а соискатель Шакурова Лия Алимджановна

заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Председатель диссертационного  
совета, доктор физико-  
математических наук, ведущий  
научный сотрудник кафедры  
«Гидроаэромеханика» СПбГУ



Сайфутдинов А.И.

10.12.2024