

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Брыкиной Ирины Гргорьевны 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 по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

В диссертации предложен теоретический метод вывода граничных условий скольжения на поверхности твердого тела, обтекаемого умеренно разреженной реагирующей неравновесной смесью газов. Получены граничные условия для макропараметров течения в рамках поуровневого приближения для различных моделей рассеяния частиц на поверхности. Учитываются сильные отклонения от термического и химического равновесия в газовой фазе, процессы рекомбинации, диссоциации, возбуждения и дезактивации колебательных состояний при взаимодействии с твердой поверхностью. В последние годы развитие исследований неравновесных течений около космических аппаратов идет в сторону учета все более тонких и одновременно практически значимых физико-химических эффектов. Для создания новых теплозащитных материалов, способных выдерживать значительные температуры без разрушения, необходимо корректно рассчитывать тепловые потоки, действующие на поверхность тела, а для этого надо качественно учитывать возбуждение внутренних степеней свободы, гетерогенные и гомогенные химические реакции, явления переноса, а также эффекты взаимодействия разреженного газа с поверхностью. Учету этих эффектов посвящена диссертация, и это определяет ее **актуальность**. **Актуальным** является также создание континуальных моделей, учитывающих все эти физическо-химические эффекты и дающих значительное преимущество в вычислительных затратах по сравнению с кинетическими моделями. Расширить границы применимости континуальных моделей можно учетом сильных отклонений от равновесия в потоке газа и использованием условий скольжения на поверхности. В диссертации рассматривается сочетание этих методов.

Основные научные результаты диссертационной работы:

В первой главе для течения многокомпонентной газовой смеси с внутренними степенями свободы и поуровневой колебательно-химической кинетикой получены граничные условия скольжения на поверхности для скачков макропараметров – концентраций, скорости и температуры – с применением метода Грэда в случае зеркально-диффузного рассеяния частиц. Разработан новый метод вывода граничных условий скольжения, основанный на применении предложенного кинетического граничного условия для функции распределения в поуровневом приближении. Показана эквивалентность двух методов для зеркально-диффузного рассеяния частиц и отмечены преимущества нового подхода. Выявлено влияние объемной вязкости и релаксационного давления на граничные условия.

Во второй главе проведено обобщение развитого подхода вывода граничных условий, которое позволяет учесть влияние неравновесных процессов на поверхности, таких как адсорбция/десорбция и гетерогенные реакции, на характеристики течения газовой смеси. Получены выражения для скорости скольжения, скачка температуры и массовых потоков частиц для зеркально-диффузного рассеяния частиц и модели рассеяния Черчиньяни-Лампис.

В третьей главе различные модели граничных условий скольжения реализованы в коде численного моделирования течения и поуровневой кинетики пятикомпонентного воздуха в пограничном слое на линии торможения тела, движущегося с гиперзвуковой скоростью. Проведена оценка моделей по предсказанию температуры, теплового потока, массовой доли компонентов, распределений молекул по колебательной энергии вблизи стенки. Показано хорошее согласие эффективных коэффициентов скорости гетерогенной рекомбинации с имеющимися в литературе результатами молекулярно-динамических расчетов для обобщенной модели, развитой во 2-й Главе. Дан анализ влияния скачка температуры, гетерогенных реакций и модели диффузии на характеристики течения.

Перечисленные результаты являются **новыми**. **Теоретическая ценность** диссертационной работы заключается в разработке нового метода получения граничных условий скольжения для течений газов с поуровневой колебательно-химической кинетикой, основанного на кинетическом граничном условии для функции распределения, учитывающем неравновесные процессы на поверхности (адсорбцию/десорбцию, колебательное возбуждение/дезактивацию, гетерогенные химические реакции) и произвольный вид ядра рассеяния. А также в выводе граничных условий скольжения для макропараметров (скорости скольжения, скачка температуры, массового потока частиц разных химических сортов в разных колебательных состояниях) для конкретных моделей рассеяния. **Практическая значимость** состоит в реализации выведенных граничных условий в коде для моделирования течения воздуха в пограничном слое на линии торможения затупленного тела, оценке влияния эффектов скольжения и неравновесных реакций на поверхности на характеристики течения, в частности, на тепловой поток, и в возможности использовать полученные граничные условия в разных кодах по расчету неравновесных течений разреженного газа около твердой поверхности.

Достоверность и обоснованность научных положений диссертации и полученных в ней результатов определяется использованием апробированного строгого математического аппарата кинетической теории газов, валидацией разработанного метода путем демонстрации возможности получения известных из литературы результатов в частных случаях, а также хорошим согласием коэффициентов гетерогенной рекомбинации, полученных с помощью предложенной модели, с молекулярно-динамическими расчетами.

По содержанию диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. Моделирование течения воздуха на линии торможения тела, движущегося с гиперзвуковой скоростью, проводилось в рамках модели пограничного слоя. Однако эта модель выведена при больших числах Рейнольдса, или малых числах Кнудсена, т.е. не для режимов разреженного газа, где существенную роль играют граничные условия скольжения. Имеет смысл использовать выведенные граничные условия в рамках моделей, более пригодных для описания течений разреженного газа – вязкого ударного слоя, уравнений Навье-Стокса.
2. При численном моделировании «скоростью скольжения пренебрегается во всех случаях, поскольку ее влияние пренебрежимо мало вблизи точки торможения» (стр. 84). В уравнения (3.2) входит функция тока f , уравнение для нее не выписано, но оно должно входить в решаемую систему, а функция тока определяется производной продольной скорости по продольной координате, т.е. в уравнения входит производная скорости (в частности, и производная скорости скольжения в точке торможения, которая ненулевая),

поэтому непонятно утверждение априори о пренебрежимо малом влиянии скорости скольжения.

3. В тексте диссертации имеются стилистически некорректные утверждения:

Стр. 42: «Из полученного общего интегрального соотношения можно видеть, что предложенный подход приводит к соотношению для числовых плотностей, не зависящему от выбранной модели рассеяния». Соотношение (1.81) явно зависит от модели рассеяния через функцию T_l^{cij} , поэтому правильно: «не зависящему от выбора модели рассеяния».

Стр. 45: «Таким образом, отношение плотностей $n^{w_{ci}}/n_{ci}$ в (1.84), не имеющее точного физического смысла, исключено». Члена $n^{w_{ci}}/n_{ci}$ в (1.84) нет.

Стр. 105: «профиль температуры является постоянным в рассматриваемой области течения». Постоянна температура, а не профиль.

Указанные замечания не снижают научной ценности и общей положительной оценки работы. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, вносящей вклад в развитие неравновесной физико-химической аэродинамики, содержит новые результаты, представляющие научный и практический интерес. Работа выполнена на высоком теоретическом уровне, имеет продуманную структуру и хорошо оформлена.

Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 12 работах. Из них одна статья опубликована в журнале, входящем в перечень рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК, четыре – в рецензируемых изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, семь – в материалах конференций, индексируемых в РИНЦ. Работа прошла апробацию на всероссийских и международных конференциях.

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 наук 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 физико-математических наук, доцент/с.н.с.,
ведущий научный сотрудник НИИ механики МГУ

Брыкина И.Г.

07.12.2024

Бориса Бронштейн Ч.В. завершено

Нач. отдела кадров
НИИ механики МГУ

Шакурова С.А.
09.12.2024