



ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Феликса Маратовича Шарипова 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 подход для получения условий скольжения температурного скачка на границе реагирующей газовой смеси с твердой поверхностью. Проведено сравнение разработанного подхода с другими методами, такими как метод Грэда и метод Паттерсона–Шидловского, показавшее его преимущества. Предложенный подход был обобщен с учетом таких процессов, как адсорбция, десорбция, колебательное возбуждение и дезактивация, химические реакции. Обобщенный подход был проверен путем сравнения массовых потоков на поверхности с полученными другими известными моделями. Проведено исследование влияния степени разреженности газа на параметры течения в пограничном слое.

Введение диссертации содержит подробный обзор литературы, где приводится длинный список книг и научных статей по теме. Автор упоминает метод прямого статистического моделирования Монте–Карло, континуальный подход и приближение поуровневой кинетики. Далее утверждается, что область применения континуального подхода можно расширить, если использовать граничные условия скольжения и температурного скачка на границе. Проведен подробный анализ работ, где коэффициенты скольжения и скачка получены для чистого газа и смесей. Подчеркивается, что основной задачей диссертационной работы является создание нового подхода к получению граничных условий. Новизна работы состоит в учете поверхностных химических реакций.

В первой главе диссертации получены граничные условия для макропараметров многокомпонентных смесей. Используются два подхода: метод Грэда и метод, основанный на кинетическом граничном условии. Применяются две модели взаимодействия газа с твердой поверхностью: диффузно-зеркальная (модель Максвелла) и модель Черчиньяни–Лампис. Основным результатом данной главы состоит в поуровневых условиях скольжения, см. ур. (1.90), и температурного скачка, см. ур. (1.91) и ур. (1.108). Помимо этого, получены граничные условия для массовых потоков, см. ур. (1.93), учитывающие влияние вязких напряжений.

Во второй главе подход, основанный на кинетическом граничном условии, обобщается на случай гетерогенных процессов на твердой поверхности. Для этого была обобщена формулировка взаимодействия газа с поверхностью, см. ур. (2.12), где была изменена нормировка ядра рассеяния и добавлен член, отвечающий за десорбцию. В результате было

получено условие скольжения (2.18) и условие скачка температуры, ур. (2.24) и ур. (2.25). Получено также новое уравнение для массовых потоков вблизи границы с твердой поверхностью, см. ур. (2.15).

В третьей главе полученные ранее граничные условия применяются к задаче о течении воздуха в гиперзвуковом пограничном слое. Рассматривается смесь кислорода и азота с учетом диссоциации, рекомбинации и неупругих столкновений. Параметры набегающего потока даны в Таблице 1. Автор подробно описывает численную процедуру и анализирует сеточную сходимость. Как результат, получены профили температуры, химического состава и потока тепла, которые представлены графически. Показано влияние скачка температуры и гетерогенной рекомбинации на основные характеристики течения.

Ниже следуют некоторые замечания и вопросы возникшие в процессе чтения диссертации:

1. Несмотря на длинный список анализируемых трудов во введении, некоторые важные работы опущены в ссылках. Например, упоминая метод прямого моделирования, книга G.A. Bird “Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows” (1994) не цитируется. Что касается экспериментальных значений коэффициентов аккомодации, автор упоминает только три работы [55-57], хотя их гораздо больше. Не цитируются ни научные статьи, ни книга I. Kuscer, который внес большой вклад в кинетику многоатомных газов. Не упомянут также обзор по коэффициентам скольжения как чистого газа, так и смесей F. Sharipov, Data on the velocity slip and temperature jump on a gas-solid interface. *J. Phys. Chem. Ref. Data.* **40**, 023101-28 (2011).
2. На стр. 9 утверждается, “что коэффициенты рекомбинации, полученные в работах [72; 103], зависят от колебательного уровня молекул”. Так как рекомбинация происходит между атомами, например $O+O \rightarrow O_2$, то неясно, о каком колебании идет речь.
3. На стр. 16 указано, что N_c и N_{ci} являются числами колебательных и вращательных уровней частицы. Теоретически, число этих уровней бесконечно. На практике, число занятых уровней переменное и увеличивается с увеличением температуры. Не совсем ясно, какие значения принимают N_c и N_{ci} . На стр. 79 указано количество этих уровней: 61, 44, 48. Как были получены эти числа?
4. Ур. (1.1) предполагает зависимость вращательного спектра энергии от колебательного состояния. Обычно этой зависимостью пренебрегают и рассматривают вращение независимо от колебания. Существенна ли данная зависимость и нужно ли ее учитывать?
5. В ур. (1.9) не ясен физический смысл переменной a_{ci} .
6. В ур. (1.21) тепловые потоки поступательной и вращательной энергии рассматриваются совместно, в то же время, колебательная энергия рассматривается отдельно. Почему нельзя рассматривать вращательную энергию отдельно от поступательной?
7. В ур. (1.22) входит статистический вес вращательных уровней. Можно ли записать в явном виде эти веса можно? Почему колебательная энергия не вошла в это выражение?
8. На стр. 27 автор упоминает обобщение теории на многокомпонентные смеси, цитируя только работу [82]. Однако похожие результаты были опубликованы и в других работах,

- например, В. М. Жданов, К теории скольжения на границе газовой смеси. *ЖТФ*, т. 37, с. 192–197 (1967).
9. На стр. 28 утверждается, что ур. (1.48) записано для внешней границы слоя Кнудсена, хотя данное условие должно быть поставлено на границе с твердой поверхностью.
 10. В случае чистого газа ур. (1.61a) сводится к классическим условиям скольжения. Было бы полезно показать это в явном виде.
 11. На стр. 39 автор приводит условие взаимности для многоатомных газов и ссылается на работы [120, 121], которые рассматривают только одноатомные газы. При этом статья I. Kuscer, Reciprocity in scattering of gas molecules by surface. *Surface Sci.* 25, 225–237 (1971), где получено ур. (1.75) для многоатомных газов, не цитируется.
 12. При выводе условия скольжения, в частности на стр. 47, автор предполагает, что коэффициенты аккомодации одинаковы для всех сортов газов. Это достаточно сильное предположение, так как на практике эти коэффициенты сильно варьируются в зависимости от типа газа.
 13. В ур. (1.94) последний член в числителе представляет тепловое скольжение, которое не зависит от коэффициента аккомодации. То же относится к последнему члену в ур. (1.104). Между тем, в ряде опубликованных работ, например, С. Е. Siewert and F. Sharipov, Model equations in rarefied gas dynamics: Viscous-slip and thermal-slip coefficients. *Phys. Fluids* 14, 4123–4129 (2002), показано, что данное тепловое скольжение зависит от коэффициента аккомодации.
 14. В ур. (1.106) предусматривается ли вероятность смены вращательного состояния? Что означает нижний индекс l в левой части?
 15. Форма ядра (1.106) через аккомодацию касательной энергии не совсем эквивалентна изначальной форме через касательный импульс. Форма (1.106) не допускает обратного отражения, в то время как изначальная форма допускает это.
 16. На стр. 51 утверждается, что выражение для скольжения на основе Черчиньяни-Лампис модели такое же, как и на основе диффузно-зеркальной модели. Однако первая модель содержит два параметра, тогда как вторая модель содержит только один параметр. Не ясно, как можно получить одинаковые выражения для этих двух разных моделей.
 17. Согласуется ли выражение (1.108a) с ранее полученными результатами для чистого газа?
 18. На стр. 57 после ур. (2.4) утверждается, что “такой подход не позволяет корректно описывать неравновесные поверхностные процессы”. В то же время на стр. 40 после идентичного уравнения (1.76) утверждается, что “коэффициент γ_{ci} должен включать в себя все процессы, которые могут изменить состояние частицы сорта ci ”. В этом есть некое противоречие.
 19. Какой физический смысл последнего члена в ур. (2.6)?
 20. На стр. 64 утверждается: “Скачок температуры в рамках представленного подхода остается таким же”. Не ясно, таким же, как что?
 21. Фраза перед ур. (1.106) та же самая, что и перед ур. (2.19), но при этом в последнем имеется дополнительный член. В чем разница между (1.106) и (2.19)?
 22. В ссылке 141 отсутствует фамилия первого автора.

Нужно отметить, что приведенные выше вопросы и замечания никоим образом не умаляют ценности диссертации. В целом, автор выполнил значительную и важную работу по получению граничных условий для скольжения газа и температурного скачка с учетом сложных химических явлений на поверхности твердого тела. Результаты, полученные в диссертации, являются новыми, интересными и достоверными. Диссертация вносит заметный вклад в развитие кинетической теории смесей реагирующих газов, соответствующей специальности 1.1.9. На основе полученных данных было опубликовано двенадцать работ как в российских журналах, так и в международных индексируемых изданиях (Physical Review E, Physics of Fluids). Результаты исследования были представлены на российских и международных конференциях. Личный вклад автора диссертации в публикации совместно с ее научным руководителем является значительным.

Исходя из вышеизложенного констатируется, что 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». Несомненно, 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
Профессор кафедры физики
Федерального Университета штата Паранá, Бразилия



Феликс Маратович Шарипов
Email: sharipov@fisica.ufpr.br
URL: fisica.ufpr.br/sharipov
Рабочий адрес: Felix Sharipov
Departamento de Física,
Universidade Federal do Paraná
Caixa postal 19044,
81531-980, Curitiba – PR, Brazil

Куритиба, 2 декабря 2024 г.