

О Т З Ы В

официального оппонента по диссертации Сограби Тимура Вагидовича на тему: «Роль взаимодействия газа с поверхностью аэрозольной частицы в ее движении при больших числах Кнудсена», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» и посвящена разработке физико-математической модели движения сферической аэрозольной частицы под действием сил, возникающих при рассеянии бесструктурных частиц газа на ее поверхности в неравновесных условиях. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложения, изложена на 123 листах, содержит 37 рисунков и 14 таблиц.

В первой главе диссертации приведены известные положения кинетической теории газов. Обоснована модель движения аэрозольной частицы в газе, построенная на основе приближенного решения кинетического уравнения для функции распределения молекулярных скоростей в условиях почти свободномолекулярного режима с граничным условием на поверхности частицы в форме ядра рассеяния.

Во второй главе представлены результаты расчетов силы сопротивления и полей макроскопических величин вблизи частицы с использованием четырех известных моделей ядра рассеяния. Учитываются возмущение функции распределения газа вблизи частицы, а также тепловая поляризация самой частицы.

В третьей главе проведены расчеты термофоретической силы и скорости движения частицы, а также полей макроскопических величин с использованием выбранных автором моделей граничных условий. Вдали от частицы неравновесное состояние газа определяется заданным градиентом температуры, аэрозольная частица дополнительно возмущает газ. Учитывается возникающая неоднородность температуры поверхности частицы.

В четвертой главе представлено решение задачи о фотофорезе в условиях свободномолекулярного режима. Вдали от частицы газ считается равновесным, учитывается изменение температуры частицы и состояния газа вблизи нее под действием монохроматического излучения. Проведены численные расчеты фотофоретической силы при различных значениях аккомодационных параметров моделей ядра рассеяния.

В пятой главе представлено решение задачи о силах, действующих на частицу при ее движении в бинарной газовой смеси, неоднородной по концентрации компонентов в условиях свободномолекулярного режима. Вы-

полнены численные расчеты диффузионной силы и скорости движения частицы.

Исходя из требования наилучшего согласия результатов расчета с экспериментальными данными определены численные значения аккомодационных параметров рассмотренных ядер рассеяния для силы сопротивления, термофореза, фотофореза и диффузиофореза. Необходимо отметить, что значения феноменологических параметров каждого ядра рассеяния, полученные из анализа разных физических эффектов существенно различаются. Данный факт свидетельствует о недостаточном соответствии выбранных автором простых моделей ядра рассеяния реальной физике процесса рассеяния газа на поверхности.

1. Актуальность.

Актуальность работы не вызывает сомнения, так как систематические исследования сил, действующих на аэрозольную частицу, в зависимости от характера взаимодействия молекул газа с ее поверхностью до настоящего времени не проводились. В большинстве теоретических работ используется либо приближение полной аккомодации молекул газа на поверхности частицы, либо другая конкретная эвристическая модель для функции распределения скоростей отраженных молекул. Однако в строгой кинетической теории газов функция распределения отраженных молекул должна не задаваться, а вычисляться через ядро рассеяния и функцию распределения падающих на поверхность молекул. Такой подход дает возможность выявить общие закономерности влияния взаимодействия молекул газа с поверхностью на микрофизику аэрозолей, несмотря на трудности разработки моделей ядра рассеяния из первых принципов.

2. Новизна полученных результатов.

Автором проведено строгое теоретическое исследование роли взаимодействия молекул газа с поверхностью одиночной аэрозольной частицы в ее движении в неравновесном разреженном газе под действием градиента температуры, градиента концентрации в бинарной газовой смеси, а также в поле оптического излучения. В результате получены аналитические выражения для макропараметров системы «аэрозольная частица-газ», позволяющие вычислить соответствующие значения при заданном ядре рассеяния.

Теоретические исследования позволили выявить ограничения некоторых моделей взаимодействия газа с поверхностью (ядер рассеяния) и новые физические эффекты при описании изученных явлений. Так, использованные модели ядра рассеяния, за исключением максвелловской, показали зависимость термофоретической силы в свободномолекулярном режиме от аккомодационных свойств частицы и газа. Помимо этого, при решении задачи о диффузиофорезе было установлено, что аккомодационные характеристики различных компонентов газовой смеси влияют как на величину, так и на знак

диффузионной силы и скорости. Получен количественный критерий инверсии знака диффузионной силы.

3. Ценность для науки и практики.

Научная ценность работы связана как с конкретными результатами теоретических исследований (аналитические выражения для сил, действующих на частицу и скоростей ее движения), так и с разработанной методикой исследования роли взаимодействия газа с поверхностью аэрозольных частиц в их движении.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования и оптимизации технологических процессов, протекающих в термопреципитаторах и диффузионных фильтрах, прогнозирования аэрозольных процессов, а также при разработке новых моделей ядра рассеяния.

Замечания.

- 1) Полнота выбранного автором списка моделей взаимодействия газа с поверхностью и обоснованность их отбора имеют ключевое значение для полноты и завершенности предпринятого исследования. В работе использованы всего четыре модели ядра рассеяния (гл.1, п.1.6) без глубокого физического обоснования такого выбора и анализа всех преимуществ и ограничений указанных моделей. Отсутствует упоминание известной монографии Ф.Гудмана (Гудман Ф., Вахман Г. Динамика рассеяния газа поверхностью. – М.: Мир, 1980. – 423с.), в которой излагаются классическая и квантовая теории рассеяния на кристаллической решетке, приводятся экспериментальные данные по рассеянию молекулярных пучков в почти свободно-молекулярном режиме. Какими критериями помимо простоты руководствовался автор при отборе моделей взаимодействия газа с поверхностью?
- 2) В соответствии с ф.(2.37) главы 2 макропараметры газа зависят как от расстояния r от поверхности аэрозольной частицы, так и от полярного угла θ точки наблюдения относительно направления набегающего на частицу потока. Однако из рис.2.3, 2.6, 2.9 (гл.2, п.2.3) не понятно, каким углам θ соответствуют представленные зависимости, которые отнесены к значениям макропараметров на поверхности частицы при полной аккомодации. Последние также зависят от угла и при некоторых θ обращаются в нуль.
- 3) В работе утверждается, что достоверность полученных результатов подтверждается согласием с результатами других авторов в случае полной аккомодации и количественным согласием теории с экспериментальными данными. В частности, на основе сравнения теории с экспериментальными данными подобраны значения феноменологических аккомодационных параметров моделей (гл.2, п.2.4). Насколько корректно сравнение расчета с экспериментом с учетом принятых в работе ограничений (почти свободно-молекулярный режим, макроскопическое описание микроскопической аэрозольной частицы, отсутствие у частиц газа внутренних степеней

- свободы)? В какой степени полученные при указанных ограничениях результаты применимы к движению аэрозолей при нормальном атмосферном давлении в реальных технологических процессах?
- 4) В главе 2, п.2.3 указано, что в зеркально-диффузной модели Максвелла увеличение доли зеркально отраженных молекул (уменьшение аккомодации) ведет к уменьшению силы сопротивления и тепловой поляризации частицы (рис.2.2), поскольку при этом уменьшаются напряжения трения на её поверхности, а также обмен энергией между газом и частицей. Почему аналогичное уменьшение коэффициента аккомодации нормальной энергии в модели Черчиньяни-Лэмпис приводит к противоположному эффекту (рис.2.10)?
 - 5) В гл.3, п.3.3 показано, что сила термофореза увеличивается с увеличением доли зеркально отраженных молекул (с уменьшением аккомодации). Этот факт, как и в п.2.3, объясняется уменьшением напряжений трения на поверхности частицы и снижением обмена энергией между частицей и газовой средой. Почему в отличие от расчетов силы сопротивления (п.2.3) зеркально-диффузная модель Максвелла и модель Черчиньяни-Лэмпис в случае расчета силы термофореза приводят к одинаковым результатам?
 - 6) Есть некоторые шероховатости по тексту диссертации. Например, определение для функции ψ дается только через страницу после формулы (2.25) для силы сопротивления, где оно впервые используется. При некоторых численных значениях физических величин пропущена размерность. В гл.5 вместо термина «относительная концентрация» корректнее использовать либо «относительная числовая концентрация», либо «молярная доля».
 - 7) В выводах по диссертации указывается, что разработанная теория сил, действующих на аэрозольную частицу, и скоростей ее движения позволяет оценить эффективность той или иной модели ядра рассеяния. В то же время для выбранных автором простых моделей ядра рассеяния получен ряд противоречивых результатов. Скорее всего, аналогичные проблемы будут возникать и при моделировании любых других физических систем, в которых взаимодействие газа с поверхностью играет существенную роль. Каким образом в этих условиях может быть сделан однозначный вывод, какое ядро рассеяния является наиболее эффективным и почему?

4. Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом.

Диссертация Т.В. Сограби удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, является законченной фундаментальной работой, в которой исследована роль взаимодействия молекул газа с поверхностью аэрозольной частицы в её движении в условиях свободномолекулярного и почти свободномолекулярного режимов.

Основные результаты опубликованы в 9 работах, список которых представлен в автореферате.

Диссертация Т.В. Сограби соответствует паспорту специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника по части пунктов:

1. Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования молекулярных и макросвойств веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах.
2. Неоднородные аэродисперсные системы.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а именно, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи о влиянии особенностей взаимодействия газа с поверхностью аэрозольных частиц на макроскопические свойства аэродисперсных систем.

Тимур Вагидович Сограби заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 — Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент:

заведующий кафедрой технической физики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»,
доктор технических наук, доцент,

Токманцев Валерий Иванович  09.01.2023 г.

620002, Россия, г.Екатеринбург, ул.Мира, 21,
Тел. +7(343)3759350, E-mail: v.i.tokmantcev@urfu.ru

Подпись Токманцева В.И. заверяю:
Ученый секретарь УрФУ
Морозова Вера Анатольевна



Начальник УДМОБ
ГОНЧАРОВА Н.В.