

ОТЗЫВ

Официального оппонента д.ф.-м.н., профессора Зарипова Ш. Х.

о диссертации Сограби Тимура Вагидовича «Роль взаимодействия газа с поверхностью аэрозольной частицы в ее движении при больших числах Кнудсена» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертация Сограби Тимура Вагидовича посвящена теоретическому исследованию характеристик движения малой аэрозольной частицы в газовой среде с подробным учетом характера взаимодействия окружающего газа с поверхностью частицы. **Актуальность темы диссертации** обусловлена значением, которое оказывает характер взаимодействия молекул окружающего газа с поверхностью аэрозольных частиц на теплофизические процессы и явления переноса в аэродисперсных системах и малой их изученностью. Существующие модели движения малых аэрозольных частиц включают выражения для действующих на аэрозольную частицу сил, которые обычно базируются на приближении полной аккомодации молекул газа на поверхности частицы или максвелловской модели зеркально-диффузного отражения. В то же время характер взаимодействия молекул с твердой поверхностью может быть сложнее, чем в упомянутых моделях. Поэтому, развитые модели не всегда хорошо описывают экспериментальные данные и требуют дальнейшего улучшения. В первую очередь, это касается систематического исследования роли взаимодействия молекул газа с поверхностью, а именно, развития теории движения аэрозольных частиц, в которой функция распределения скоростей отраженных частиц молекул вычисляется из общих положений кинетической теории газов через ядро рассеяния и функцию распределения скоростей налетающих молекул.

Цель диссертационной работы заключается в построении физико-математических моделей для теоретического описания сил, действующих на аэрозольную частицу в неоднородном газе в условиях почти свободномолекулярного и свободномолекулярного режимов для произвольного ядра рассеяния и количественной оценке этих сил с использованием нескольких известных моделей ядра.

Диссертация Сограби Т.В. состоит из введения, 5 глав, заключения и 1 приложения. Полный объем диссертации составляет 123 страницы, включая 37 рисунков и 14 таблиц. Список литературы содержит 105 наименований. Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее

разработанности, определяются цели и задачи, осуществляется выбор предмета и объекта исследования. Формулируются положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** описаны определяющие безразмерные критерии движения макроскопических тел в газах, закономерности движения аэрозольной частицы и свойства аэродисперсных систем. Приведено кинетическое уравнение с аппроксимирующим интегралом столкновений третьего порядка. Граничное условие, устанавливающее связь между функциями распределения налетающих на поверхность и отраженных молекул, представляет собой интеграл по скоростям налетающих на поверхность молекул, подынтегральное выражение которого включает ядро рассеяния. Ядро рассеяния зависит от типов газа и структуры поверхности на макро- и микроуровнях. В диссертации для исследований выбраны следующие наиболее известные модели ядра рассеяния: максвелловская модель зеркально-диффузного отражения; модели Эпштейна и Бормана, учитывающие зависимости коэффициента диффузного отражения от скорости молекул; модель Черчиньяни — Лэмпис (CL-модель) с двумя параметрами - коэффициентами аккомодации тангенциального и нормального импульса. Кинетическое уравнение для сферической частицы, записанное в интегральной форме, решается итерационным методом для больших чисел Кнудсена.

Во **второй главе** изложены постановка задачи и результаты расчета силы сопротивления при движении макроскопической частицы в газе в условиях почти свободномолекулярного режима при произвольном ядре рассеяния при малых числах Маха. Получено выражение для силы сопротивления, приведенной к ее значению при полной аккомодации в свободномолекулярном режиме: Представлено сравнение теории с классическими экспериментальными данными Милликена для капель часового масла в воздухе и получены оптимальные значения параметров моделей ядра рассеяния, обеспечивающие лучшее согласие с экспериментом.

В **третьей главе** изложены постановка и решение задачи о термофореze аэрозольной частицы в почти свободномолекулярном режиме. В газе поддерживается постоянный градиент температуры. Функция распределения налетающих молекул близка к функции Чепмена — Энскога. Линеаризованное кинетическое уравнение учитывает только возмущения в газе, обусловленные наличием в нем частицы. Распределение температуры внутри и на поверхности частицы определяется из решения уравнения теплопроводности с граничным условием непрерывности радиального потока тепла. Получены выражения для термофоретической силы и скорости движения частицы при различных ядрах рассеяния. В **четвертой главе** представлены постановка и решение задачи об определении силы,

действующей на частицу в поле монохроматического оптического излучения (фотофорез) в условиях свободномолекулярного режима. Рассматривается одиночная частица, взвешенная в газе и облучаемая с одной стороны плоской волной монохроматического неполяризованного света. Газ вдали от частицы находится в состоянии равновесия и описывается максвелловской функцией распределения молекулярных скоростей. Распределение температуры внутри однородной частицы определяется из решения стационарного уравнения теплопроводности с учетом объемной плотности внутренних источников тепла. Предполагалось, что температура поверхности частицы незначительно отличается от температуры газа. Ядро рассеяния, зависящее от температуры поверхности частицы, разлагалось в ряд Тейлора по малому параметру возмущения равновесной температуры и учитывался только линейный член разложения. В результате было определено граничное условие для функции распределения, содержащее производную от ядра рассеяния по температуре поверхности частицы. Для неподвижной частицы в условиях свободномолекулярного режима было получено выражение для фотофоретической силы.

В пятой главе изложены постановка и решение задачи о диффузиофорезе аэрозольной частицы в бинарной газовой смеси в условиях свободномолекулярного режима. Состояние газовой смеси возмущено постоянными градиентами относительных молярных концентраций. Предполагалось, что функция распределения вдали от частицы соответствует первому приближению Чепмена — Энскога и не искажается вблизи частицы за счет столкновений с отраженными молекулами. В условиях свободномолекулярного режима были получены выражения для диффузионной силы и скорости диффузиофореза относительно центра масс газовой смеси для различных моделей ядра рассеяния.

В заключении подведены итоги диссертационного исследования, изложены его основные выводы и обобщающие результаты.

К основным результатам диссертации, обладающим **научной новизной**, относятся следующие:

Разработаны физико-математические модели для описания силы сопротивления, силы и скорости термофореза аэрозольной частицы в почти свободномолекулярном режиме, фотофоретической и диффузионной сил в свободномолекулярном режиме для произвольного ядра рассеяния. С использованием четырех известных моделей ядра рассеяния получены аналитические формулы и проведены численные расчеты сил, действующих на частицу в неоднородных газах, и скоростей ее движения в зависимости от аккомодационных параметров моделей ядра рассеяния. Проведен сравнительный анализ полученных результатов. В результате сравнения с экспериментальными данными получены опти-

мальные значения аккомодационных параметров моделей ядра рассеяния. Полученные зависимости позволяют существенно уточнить существующие модели движения малых аэрозольных частиц в неоднородных полях температур и концентраций.

Достоверность полученных результатов гарантируется обоснованностью основных положений теории, строгостью математических преобразований и согласием с экспериментальными данными.

Замечания.

1. Из текста работы, непонятно какая из полученных в работе формул использована для кривой, приведенной на рис.2.13 для сравнения с экспериментальными данными. В работе получены выражения для силы сопротивления для нескольких ядер рассеяния со своими аккомодационными параметрами, приведенными в Таблице 4. Какая из них показана на рисунке?
2. Для всех рассмотренных в работе задач получены формулы для сил и скоростей для различных моделей ядра рассеяния и оптимальные параметры. Вместе с тем, эти найденные оптимальные параметры отличаются в каждой задаче, так как ориентируются на свой эксперимент. Вместе с тем, возникает вопрос – какая модель ядра рассеяния была бы наилучшей для описания процесса движения малой аэрозольной частицы под действием нескольких сил одновременно, что и происходит в реальной ситуации. Соответствующее исследование или дискуссия были бы уместны в работе.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом.

Диссертационная работа Сограби Тимура Вагидовича представляет собой законченное фундаментальное исследование, в котором на молекулярно-статистическом уровне описания изучена влияние характера взаимодействия молекул газа с поверхностью аэрозольной частицы на действующие на нее в неравновесном газе силы и ее движение при больших числах Кнудсена. Диссертация написана хорошим научным языком.

Основные результаты опубликованы в 9 работах, список которых представлен в автореферате. Следует отметить, что все статьи по результатам работы опубликованы в высокоуровневом журнале по аэрозольной тематике “Journal of Aerosol Science”. Результаты прошли также апробацию на соответствующих профильных конференциях. Автореферат полностью соответствует основным положениям диссертации.

Диссертация Т. В. Сограби соответствует паспорту специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника и требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ.

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

Зарипов Шамиль Хузеевич

Доктор физико-математических наук

Профессор

Заведующий кафедрой моделирования экосистем

Института экологии и природопользования

Казанского федерального университета.

Адрес: 420008, Россия, Республика Татарстан,

г. Казань, ул. Кремлевская, д.18, корп.1

Адрес электронной почты: shamil.zaripov@kpfu.ru

«1» 02 2023 г.

Подпись (заверяется по месту работы)

