

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента  
кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника  
Маркелова Юрия Ивановича  
на диссертационную работу Сограби Тимура Вагидовича  
«Роль взаимодействия газа с поверхностью аэрозольной частицы в её движении при  
больших числах Кнудсена», представленную на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая  
теплотехника»

### Актуальность темы исследования

Понимание роли взаимодействия молекул с поверхностью аэрозольной частицы, движущейся в неоднородном газе, описание механизма этого взаимодействия позволит более точно моделировать и предсказывать поведение аэрозолей как природного, так и антропогенного происхождения (вулканический аэрозоль, промышленные выбросы, выбросы при лесных пожарах, пыление почвы, пыльца растений). Учет этого механизма актуален в решении проблем контроля и очистки атмосферы от вредных аэрозольных примесей, проблем получения промышленных аэрозолей и контроля физико-химических свойств отдельных частиц, проблем оптимизации процессов горения и детонации топливных аэрозолей. Взаимодействие оптического излучения с аэродисперсными системами важно знать при лазерном зондировании атмосферы, а также при оценке их влияния на радиационный и тепловой баланс атмосферы Земли.

Теоретическое описание механизма взаимодействия молекул газа с поверхностью аэрозольной частицы стимулирует экспериментальные работы в области микрофизики аэрозолей, которые должны привести к разработке новых, более совершенных моделей ядра рассеяния.

### Оценка проведенного исследования и полученных результатов

Диссертационная работа носит теоретический характер. Объектом исследования является химически однородная сферическая частица, взвешенная в неоднородном по температуре и концентрации компонентов газе, а также находящаяся в поле оптического излучения. Работа направлена на оценку влияния взаимодействия газа с поверхностью аэрозольной частицы при её движении в близком к свободномолекулярному режиму.

В основе теории лежит кинетическое уравнение Больцмана с аппроксимирующим интегралом столкновений третьего порядка (S-модель Шахова). Граничные условия определялись интегральным соотношением через ядро рассеяния и функцию распределения налетающих на поверхность молекул. С использованием метода

характеристик кинетическое уравнение записано в интегральной форме для сферической частицы. Представлен итерационный метод решения этого уравнения при больших числах Кнудсена. Полученные выражения для сил и скоростей движения аэрозольных частиц позволяют провести вычисление этих величин для любой модели ядра рассеяния.

На основе аналитических и численных расчетов данный подход реализован для расчета силы сопротивления при движении макроскопической частицы в газе при малых числах Маха и Броуна, в решении задач о термофорезе, фотофорезе и диффузиофорезе аэрозольной частицы. Для решения применены известные модели ядра рассеяния: модель зеркально-диффузного отражения Максвелла, модель Эпштейна, модель Бормана, модель Черчиньяни - Лэмпис при различных значениях аккомодационных параметров. Выполнено сравнение теории с экспериментом получены численные значения аккомодационных параметров использованных моделей ядра рассеяния.

Разработанная теория сил, действующих на аэрозольную частицу, и скоростей ее движения позволила при сравнении с экспериментом оценить эффективность названных моделей ядра рассеяния, показать их возможности в интерпретации экспериментальных данных.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласием с результатами других авторов в случае полной аккомодации и количественным согласием теории с экспериментальными данными.

Представленная работа имеет перспективы дальнейшего развития в направлении разработки теории движения аэрозольной частицы в неоднородном газе для более широкого диапазона значений числа Кнудсена при произвольном ядре рассеяния и в направлении разработки моделей движения аэрозольной частицы в ограниченном неоднородном газе с целью проведения более полного сравнения теории с имеющимися экспериментальными данными.

Структура работы выстроена логично и последовательно.

#### Научная новизна и практическая значимость работы

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработаны физико-математические модели силы сопротивления, термофоретической силы и скорости движения аэрозольной частицы в почти свободномолекулярном режиме, фотофореза и диффузиофореза в свободномолекулярном режиме при произвольном ядре рассеяния.

2. Проведены аналитические и численные расчеты сил, действующих на частицу в неоднородных газах, и скоростей ее движения в зависимости от аккомодационных



параметров четырех моделей ядра рассеяния: модели Максвелла зеркально-диффузного отражения, модели Эпштейна, модели Бормана с соавторами и модели Черчиньяни-Лэмпис. Сделан сравнительный анализ полученных результатов.

3. На основе сравнения теории с экспериментальными данными проведена оценка эффективности использованных моделей ядра рассеяния и извлечены численные значения аккомодационных параметров моделей. Показано, что изучение сил и скоростей движения частиц в неоднородных газах является источником достоверной информации о взаимодействии газа с поверхностью.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в четырёх статьях в рецензируемом зарубежном научном журнале из списка, рекомендованного ВАК РФ, и представлялись для обсуждения на трёх научных конференциях в России и двух зарубежных конференциях.

Полученные результаты могут быть использованы для моделирования распространения аэрозолей в атмосфере, для анализа результатов лазерного зондирования атмосферы, для оценки влияния аэрозоля на радиационный и тепловой баланс земной атмосферы, для оптимизации процессов сепарации и осаждения аэрозольных частиц в диффузионных фильтрах.

Полученные выражения для сил и скоростей движения аэрозольных частиц позволяют провести вычисление этих величин для любой модели ядра рассеяния, как известной, так и той, которая будет разработана в будущем.

Разработанные теоретические модели будут полезны при планировании новых экспериментальных исследований в области физики аэрозолей и в области взаимодействия газа с поверхностью.

#### Замечания по диссертации

1. В рукописи отсутствует список использованных обозначений.
2. На мой взгляд, некорректно сравнивать величины разной размерности. Так при оценке среднего угла поворота сферической частицы (формула 1.2) сопоставляются её объем  $r^3$  и время температурной релаксации  $\tau$ . Достаточно было бы привести их числовые значения, характерные для рассматриваемой ситуации, и соответствующую оценку угла поворота сферической частицы. Кроме того, в знаменателе должен стоять куб радиуса. При этом в расчетах не приводится значение вязкости  $\eta$ .
3. В работе нет обоснования выбора для решения поставленных задач модели кинетического уравнения Больцмана – S модели Шахова.

4. В обзоре известных моделей ядра рассеяния можно было бы дать более развернутый список моделей ядра рассеяния, включая, например, ядро рассеяния, приведенное в работе: Balakhonov N.F., Porodnov B.T., Seleznev V.D., Tokmantsev V.I. Scattering kernel of gas particles on the surface of a nonequilibrium solid // Journal of Engineering Physics. 1987. - Т. - 51. - № 3. - С. 1059-1061. DOI: 10.1007/BF00870897

#### Заключение

Диссертация Сограби Т.В. представляет собой завершённое научное исследование, выполненное в рамках поставленных задач. Автореферат диссертации полностью отражает содержание работы. По актуальности выбранной темы, объёму проведенных исследований, новизне, обоснованности и практической значимости полученных результатов, представленная работа соответствует критериям, изложенным в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ. Сограби Т.В. заслуживает присвоения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Заведующий лабораторией  
эколого-климатических проблем Арктики  
Института промышленной экологии УрО РАН,  
к.ф.-м.н.

Ю.И. Маркелов

Адрес:  
620108, г. Екатеринбург,  
ул. С. Ковалевской, 20

1 21.02.2023



Юдшисев Мар

заверяю

Вед. спец. по кафе

Д. Инженкина О.С.

21.02.2023