

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора Кузнецова Михаила Михайловича на диссертационную работу Прутько Кирилла Александровича **«Неравновесное излучение воздуха при больших скоростях полёта спускаемых аппаратов»**, представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Работа Прутько К.А. посвящена разработке поуровневой модели высокотемпературного воздуха для описания структуры релаксационной зоны за сильными ударными волнами ( $V > 9$  км/с) и расчёта лучистых тепловых потоков к космическим аппаратам (КА), входящим в атмосферу Земли со второй космической скоростью.

### Актуальность работы

Космические аппараты, после планируемых экспедиций к Луне и Марсу, возвращаясь на Землю, входят в её атмосферу со второй космической скоростью ( $V = 11.2$  км/с). При таких скоростях полёта воздух за ударной волной практически полностью диссоциирован, и протекающие в релаксационной зоне процессы возбуждения электронных состояний атомов, ионизация и излучение являются взаимосвязанными. Интенсивность излучения газа при этом сильно возрастает и лучистые тепловые потоки к поверхности КА сравниваются или даже превышают конвективные. Задачи, решаемые в диссертации, имеют как фундаментальные, так и прикладные весьма актуальные аспекты. К фундаментальным аспектам относится разработка радиационно-столкновительной модели высокотемпературного воздуха, а к прикладным – её использование для расчёта лучистых тепловых потоков к КА и интерпретация результатов экспериментов в ударных трубах.

## Краткий анализ содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Полный объём диссертации составляет 158 страницы, включая 60 рисунков и 17 таблиц. Список литературы содержит 93 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель, выделены основные задачи исследования, обоснована научная новизна работы и достоверность полученных результатов и выводов. **Первая глава** посвящена определению границ применимости равновесных физико-химической и радиационной моделей. Показано, что для рассматриваемых условий полёта в равновесной области ударного слоя воздух практически полностью диссоциирован и состоит из атомов азота и кислорода, их ионов и электронов. Данные допущения и предположения значительно упрощают решение задачи по переносу лучистого потока. Для аппаратов, чьи размеры  $R < 1$  м (например, зонд STARDUST) на участке траектории с наибольшим лучистым тепловым потоком релаксационная область за фронтом ударной волны занимает значительную часть ударного слоя и задачу нужно решать в неравновесной постановке.

Во **второй главе** формулируются основные положения, и приводится модель для расчета равновесного излучения полностью диссоциированного воздуха. Основной вклад в излучение воздуха в этих условиях даёт излучение атомов в линиях, фоторекомбинационное излучение при рекомбинации положительных ионов атомов с электронами и тормозное излучение электронов в электрическом поле ионов. Для расчета линейчатого излучения рассчитывается профиль Фойгта линии, с учётом уширения Доплера и Штарка. Разработан алгоритм построения

сетки для расчёта профилей спектральных линий с учётом их уширения и возможного переналожения.

В третьей главе содержится описание радиационно-столкновительной модели, используемой для определения неравновесных концентраций частиц, присутствующих в высокотемпературном воздухе. Учитываются нейтральные молекулы  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $NO$ , атомы  $O$  и  $N$ , ионы и электроны. Совместно с системой дифференциальных уравнений для кинетики различных частиц решаются уравнения газодинамики в одномерной постановке. В уравнении энергии учитываются радиационные потери. При расчёте излучения в зоне релаксации используется итерационный процесс.

В четвертой главе решается одномерная задача о структуре невязкой релаксационной зоны за сильной ударной волной в воздухе с использованием разработанной радиационно-столкновительной модели и переноса излучения. Проводится валидация предложенной модели, основанная на сравнении результатов расчётов параметров газа в релаксационной зоне (концентрации электронов, интенсивности излучения, заселённости возбуждённых состояний атомов) и длины зоны релаксации с данными экспериментов и расчётами других авторов

В заключении перечислены основные результаты и выводы по проделанной работе.

### **Основные результаты диссертационной работы, полученные лично соискателем и обладающие новизной**

1. Разработаны равновесная и неравновесная поуровневые радиационно-столкновительные модели высокотемпературного воздуха для расчета параметров газа и излучения в релаксационной зоне за сильными ударными волнами ( $V > 9 \text{ км/с}$ ) и в ударном слое перед космическими аппаратами, входящими в атмосферу со второй космической скоростью.

2. Показано, что для аппаратов большого размера ( $R > 1$  м, типа Аполлон, Федерация, Orion, Dragon) в зоне максимального лучистого теплообмена применима модель излучения атомов в равновесной постановке. Учитываются 176 и 307 переходов между 84 уровнями для атома кислорода кислорода и 62 уровня для атомов азота соответственно. Разработан алгоритм выбора ширины линии и количества расчётных узлов (точек) для получения результатов с заданной точностью при приемлемых затратах машинного времени. Валидация предложенной равновесной модели проведена путём сравнения расчётных значений лучистых потоков к аппаратам Аполлон-4 и FIRE-II с данными летных измерений.

3. В неравновесной модели дифференциальное уравнение для заселённости решается для каждого из возбуждённых уровней атомов O и N. Течение газа в релаксационной зоне за ударной волной рассчитывается с учётом потерь энергии на излучение. Валидация данной модели проводилась путём сравнения результатов расчётов с экспериментальными данными, полученными в ударных трубах, и расчётами других авторов. Учёт радиационного охлаждения газа в зоне релаксации за ударной волной позволил объяснить автору наблюдаемые различия параметров (интенсивности излучения, концентрации электронов) в ударных трубах различного диаметра.

4. Использование для расчёта структуры релаксационной зоны за ударной волной разработанной в диссертации радиационно-столкновительной модели, позволяет отказаться от задания констант скоростей ионизации атомов O и N электронным ударом, которые имеют большой разброс и вносят наибольшую погрешность в определение параметров (степени ионизации, интенсивности излучения).

## **Обоснованность и достоверность научных положений, выносимых на защиту**

Достоверность результатов диссертации подтверждается физической обоснованностью постановки задачи, применением современных теоретических моделей и математических средств решения задач физической и химической кинетики, использованием современных баз данных по термодинамическим и кинетическим характеристикам учитываемых процессов, сравнением полученных численных результатов с расчетами других авторов и экспериментальными данными, включая данные лётных экспериментов.

### **Замечания по диссертации**

1. В главе 3 желательно было бы сделать оценку вклада в интенсивность излучения возбуждённых состояний ионов  $O^+$  и  $N^+$ .
2. В главе 4 не достаточно полно представлены зависимости влияния радиационного остывания газа за ударной волной на энтальпию и скорость.
3. Предложенная автором радиационно-столкновительная модель учитывает большое количество процессов и содержит множество параметров. При решении двумерных, а тем более трехмерных задач обтекания космических аппаратов для удовлетворения требований по временным затратам может потребоваться введение упрощающих предположений. Правда, это, не должно сильно исказить основные интегральные характеристики – концентрацию электронов, интенсивность излучения и т.д. Однако комментарий автора по поводу допустимых упрощений его модели был бы желателен.

Все выше приведенные замечания не являются существенными и не снижают высокой положительной оценки его диссертационной работы.

### **Заключение**

Представленная к защите диссертация является законченной научно-квалификационной работой, посвященной актуальной теме и выполненной

на высоком уровне. Полученные в работе результаты обладают научной новизной и представляют интерес для использования в прикладных задачах, соответствуют пункту 8 паспорта специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Выносимые на защиту положения прошли апробацию в докладах на семинарах и конференциях и были опубликованы в 7 статьях в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что диссертационная работа соответствует критериям п.п. 9-11, 13, 14 постановлений «Положение о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842) и «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Прутько Кирилл Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент,  
Доктор физико-математических наук,  
Профессор кафедры теоретической физики МГОУ  Кузнецов М. М.

Государственное образовательное учреждение высшего образования Московской области  
«Московский государственный областной университет».

Почтовый адрес: 141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24.  
Телефон: (495) 780-09-43 Эл. почта: [kaf-tfiz@mgou.ru](mailto:kaf-tfiz@mgou.ru)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Подпись Кузнецова М.М. удостоверяю.  
Начальник отдела кадров  
научно-педагогического  
персонала МГОУ



Сайфуллина А.Ю.