

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Прутько Кирилла Александровича «Неравновесное излучение воздуха при больших скоростях полёта спускаемых аппаратов», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Выбранная тема исследования, безусловно, представляет значительный интерес для практических приложений в связи с необходимостью моделирования новых режимов полетов космических аппаратов и их входа в атмосферу. Действительно, в случае входа в атмосферу с первой космической скоростью влияние излучения на общий энергетический баланс невелико по сравнению с конвективными составляющими, в то время как увеличение скорости до второй космической существенно меняет ситуацию. Такие исследования начались довольно давно, но в последние годы они получили важную практическую составляющую. Очевидно, что необходима разработка новых алгоритмов расчета течений, учитывающих роль излучения.

Рассмотрим теперь более подробно текст диссертации. Исследование излучения должно сопровождаться соответствующей кинетической моделью, которая позволила бы учесть как связанно-связанные переходы, так и излучение в сплошном спектре. Это и определяет структуру диссертации.

Первая глава посвящена определению границ применимости равновесных физико-химической и радиационной моделей. В ней описаны допущения и предположения, значительно упрощающие задачу по переносу лучистого потока, приведена характерная структура ударного слоя за фронтом ударной волны. Показано, что на участке траектории с наибольшим лучистым тепловым потоком ($9.4 \text{ км/с} < V < 10.6 \text{ км/с}$ и $56 \text{ км} < H < 79 \text{ км}$) для рассмотренных спускаемых аппаратов, чьи размеры $R > 1 \text{ м}$ при входе в атмосферу Земли со второй космической скоростью, реализуется ударный слой, основная часть которой состоит из равновесной области, что дает основание применять равновесные физико-химическую и радиационную модель. Произведена оценка применимости равновесных моделей. Для аппаратов, чьи размеры $R < 1 \text{ м}$, на участке траектории с наибольшим лучистым тепловым потоком ударный слой оказывается неравновесным.

Во второй главе формулируются основные положения, и приводится модель для расчета равновесного излучения полностью диссоциированного воздуха. Перечислены основные процессы, дающие основной вклад в излучение ударного слоя. Данная глава содержит механизмы, приводящие к уширению спектральных линий, а также в ней приведены уравнения для расчета коэффициентов поглощения и коэффициентов излучения для основных излучательных процессов. Приводится метод расчета лучистого потока от высоконагретого

плоского слоя воздуха, и в конце главы представлены результаты расчетов и сравнений с другими работами. Показано, что для спускаемых аппаратов (СА) больших размеров в области максимального лучистого нагрева применима модель равновесного излучения. Достаточную точность расчета интенсивности излучения ударного слоя СА, входящего в атмосферу со 2-й космической скоростью дает аппроксимационная групповая модель.

Третья глава содержит описание радиационно-столкновительной модели, используемой для определения неравновесных концентраций составляющих газа – возбужденных состояний атомов, ионов и электронов. В этой главе приведены процессы, учитываемые в данной модели и уравнения, определяющие константы скоростей прямых и обратных процессов. На основе анализа литературных данных выбраны кинетические характеристики учитываемых 17 неравновесных процессов. Также представлен метод решения системы дифференциальных уравнений для расчета неравновесной кинетики. Разработанный метод сводится к выбору количества учитываемых уровней атомов, решению системы дифференциальных уравнений для выбранных компонент воздуха (основные и возбужденные состояния атомов, их ионы и молекулярные ионы) в совокупности с уравнениями газовой динамики с течением времени. Полученное распределение заселенностей электронных состояний применяется для расчета лучистого теплового потока высоконагретого плоского слоя газа.

В **четвертой главе** решается одномерная задача о нахождении структуры невязкой релаксационной зоны за сильной ударной волной в воздухе с учетом неравновесной поуровневой кинетики и переноса излучения. Приведены результаты расчетов структуры релаксационной зоны, переноса излучения в релаксационной зоне за ударными волнами, их сравнение с экспериментальными данными, полученными в ударных трубах, и результатами расчетов других авторов.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации, отражающие её новизну и практическую значимость.

Из рассмотрения содержания диссертации следует, что соискателем был получен ряд результатов, обладающих новизной и научной ценностью:

1. Разработана новая поуровневая модель для полностью диссоциированного воздуха в области температур 9000-15000К, учитывающая возбуждение электронных состояний молекул кислорода (84 состояния) и азота (62 состояния).
2. Получен процентный вклад каждого из различных типов излучения при расчете спуска в атмосфере со скоростью входа, равной второй космической.
3. Разработан итерационный механизм решения задачи для жесткой системы нелинейных дифференциальных уравнений со 156 переменными.

4. Показано, что для аппаратов большого размера разработанная модель хорошо применима, в то время как при уменьшении радиуса носовой части (менее 1 метра) необходимо использование неравновесной модели.

Хотелось бы отметить два важных достоинства работы. Первое – это постоянная привязка к экспериментальным данным, сравнение с ними, критический анализ соответствия результатов и границ применимости используемой модели. Второе – очень широкий набор процессов, который потребовалось рассмотреть для получения окончательного результата, что указывает на хорошую квалификацию автора.

Выносимые на защиту положения можно считать обоснованными и достоверными вследствие полноты учёта физико-химических процессов при проведении численного моделирования, сопоставления результатов моделирования и экспериментальных данных и расчетов других авторов. Также отметим, что результаты диссертации были опубликованы в 7 статьях в рецензируемых научных журналах, докладывались на семинарах и на 13 конференциях, что является хорошей апробацией работы.

Автореферат правильно полно отражает содержание диссертации.

Отметим некоторые недостатки данной диссертационной работы.

1. Вопрос с электронными температурами не так прост, как представляется в работе. В релаксационной зоне за фронтом сильной ударной волны, как правило, можно пренебречь процессами теплопроводности, однако с появлением электронов ситуация меняется – из-за большой их скорости влияние электронной теплопроводности на распределение температур требует отдельного рассмотрения. Этот вопрос в литературе обсуждается (см. например, обзор в А.Л.Великович, М.А.Либерман. Физика ударных волн в газах и плазме, 1987).
2. Не совсем ясны условия расчета релаксационной зоны в 4 главе работы. Учет излучения требует дополнительных условий как на фронте ударной волны, так и в равновесной области, причем следует иметь в виду, что у эксперимента с ударными трубами размер пробки конечен. Какие условия ставятся для излучения на фронте ударной волны, учитывается ли нагрев излучением перед фронтом и т.д. Эти вопросы остаются неясными.

Однако отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы.

Таким образом, можно заключить, что рецензируемая работа представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, посвящённую актуальной теме,

результаты которой обладают научной новизной и представляют интерес с научной и практической точки зрения.

Считаю, что диссертационная работа «Неравновесное излучение воздуха при больших скоростях полёта спускаемых аппаратов» удовлетворяет всем требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (в том числе и п.9 этого положения), а её автор К.А.Прутько, безусловно, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности «Механика жидкости, газа и плазмы» (01.02.05).

“22” апреля 2019 г.

Профессор кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества
физического факультета Московского государственного университета им.
М.В.Ломоносова

Уваров Александр Викторович

А.В.Уваров

уч степень: д.ф.-м.н., уч. звание: профессор, адрес: 119191, ГСП-1, г.Москва,
Ленинские горы, д.1., стр.2. физический факультет МГУ,
эл. почта: uvarov@phys.msu.ru

Декан физического факультета МГУ,
профессор



Н.П.Сысоев