



МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственный научный центр Российской Федерации

Федеральное государственное унитарное предприятие:

**«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ  
АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени профессора Н.Е.Жуковского»  
ФГУП «ЦАГИ»**

140180 Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1

тел.: (495)556-4205, факс: (495)777-6332

E-mail: <http://www.tsagi.ru>

ОКПО 07542112, ОГРН 1025001624471

ИНН / КПП 5013009056/504001001

**«УТВЕРЖДАЮ»:**

**Первый заместитель  
Генерального директора  
ФГУП «Центральный  
аэрогидродинамический  
институт им. проф. Н.Е.  
Жуковского»**

**доктор физико-  
математических наук,  
профессор РАН**

**А.Л. Медведский**

11.04.2019 № АМ-40/ос-10-2765

На № \_\_\_\_\_

2019 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации 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 новой радиационно-столкновительной поуровневой модели высокотемпературного воздуха для описания механики азотной и воздушной плазмы за сильными ударными волнами и расчёта лучистых тепловых потоков к космическим аппаратам, входящим в атмосферу Земли со второй космической скоростью.

**Актуальность** данной работы обусловлена тем, что разработка моделей для расчёта высокотемпературных неравновесных течений и лучистых тепловых потоков вызывает большой интерес как в России, так и за рубежом в связи с планируемыми полётами к Луне и Марсу и возвращению на Землю со второй космической скоростью. При полетах космических

017703

аппаратов в атмосфере со сверхорбитальной скоростью ( $V \sim 10-12$  км/с), протекает большое количество сложных и взаимосвязанных физических и химических процессов, которые происходят в высокотемпературном воздухе, нагретом ударной волной. Эти процессы существенно влияют на параметры газа в ударном слое, определяющие аэродинамические характеристики, тепло- и массоперенос, образование плазмы и характер излучения. Кроме того, при таких скоростях лучистые потоки значительно увеличиваются и становятся сравнимыми с конвективными, что влечет за собой влияние этих потоков на параметры течения в целом. Разработанные к настоящему времени достаточно многочисленные физико-химические и радиационные модели высокотемпературного воздуха при расчетах лучистого теплообмена спускаемых аппаратов дают очень большой разброс по величинам лучистых тепловых потоков. Таким образом, построение и тестирование моделей для описания излучения воздуха, нагретых ударной волной, является актуальной фундаментальной и прикладной задачей.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель, выделены основные задачи исследования, обоснована научная новизна работы и достоверность полученных результатов и выводов. Приводится краткое содержание глав. Во введении также приводится история вопроса относительно излучения газа около спускаемых аппаратов и расчетов лучистых потоков к их поверхностям.

**Первая глава** посвящена определению границ применимости равновесных физико-химической и радиационной моделей. Показано, что на участке траектории с наибольшим лучистым тепловым потоком ( $9.4$  км/с  $< V < 10.6$  км/с и  $56$  км  $< H < 79$  км) для спускаемых аппаратов, чьи размеры  $R > 1$  м (Орион, США или Федерация, Россия) при входе в атмосферу Земли со второй космической скоростью, реализуется ударный слой, основная часть которого состоит из равновесной области, что дает основание применять равновесные физико-химическую и радиационную модель. При этом 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. Данная модель применима при следующих условиях:  $9000 < T < 13000$  К,  $0.01 < p < 2$  атм, которые соответствуют параметрам ударного слоя около СА при входе в атмосферу Земли со сверхорбитальной скоростью. 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. Рассчитанные коэффициенты поглощения сравниваются с данными, полученными Ю.А. Пластининым и С.Т. Суржиковым. Проведенное сравнение лучистых потоков, рассчитанных с использованием разработанной модели и измеренных в летных экспериментах на аппаратах Аполлон-4 и FIRE-II показывают их хорошее согласование.

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. У атомов азота и кислорода учитывается 62 и 84 энергетических состояния соответственно. В разработанной радиационно-столкновительной модели атомы с разными электронными состояниями рассматриваются как отдельные сорта частиц, для которых решаются уравнения релаксации. В данной модели предусмотрено решение системы дифференциальных уравнений баланса для всех сортов частиц в совокупности с термодинамическими уравнениями газа. Учитывается широкий спектр физико-химических и излучательных процессов протекающих в такой смеси. Совместно с системой дифференциальных уравнений для кинетики различных частиц решаются уравнения газодинамики в одномерной постановке. В уравнении энергии учитываются радиационные потери. Автором проделана большая работа по выбору кинетических характеристик учитываемых процессов. Для связанно-связанных переходов использовалась база данных NIST, а для реакций фотоионизации и фоторекомбинации база данных TOPBase. Представленная система обыкновенных дифференциальных уравнений (общим числом более 150) решалась с



помощью кода LSODE, который хорошо подходит для решения «жестких» систем ОДУ. Трудность решения задачи обусловлена тем, что для определения концентраций возбужденных состояний атомов в каждой точке необходимо знать интенсивность приходящего в эту точку излучения. При этом алгоритм решения задачи усложняется за счёт введения итерационного процесса.

**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. Для сравнения использованы экспериментальные данные, полученные в электроразрядной УТ EAST исследовательского центра Эймса (США), экспериментах, описанных J. Wilson, W. E. Scharfman и W. C. Taylor, ТЭР ЦАГИ (В.А. Горелов, А.Ю. Киреев), в установке X2 Университета Квинсленд в Австралии (L. Hermann, 2017). Для сравнения расчётных результатов использовались работы Бибермана Л.М., Железняк М.Б., Мнацаканяна А.Х., Якубова И.Т., Johnston С.О. и др.

**В заключении** перечислены основные результаты и выводы по проделанной работе.

#### **Новизна исследования и полученных результатов**

В диссертационной работе получен ряд результатов, обладающих научной новизной. К ним относятся:

1. Показано, что для аппаратов большого размера ( $R > 1$  м, типа Союз, Федерация, Orion, Dragon) в зоне максимального лучистого теплообмена применима модель излучения атомов в равновесной постановке. Разработан алгоритм выбора ширины линии и количества расчётных узлов (точек) для получения результатов с заданной точностью при приемлемых затратах машинного времени. Работоспособность такого подхода подтверждается хорошим согласием расчётных значений лучистых потоков к спускаемому аппарату Аполлон-4 и летному демонстратору FIRE-II с данными летных измерений.
2. Разработка новой поуровневой радиационно-столкновительной модели полностью диссоциированного высокотемпературного воздуха ( $T \approx 9000 - 15000$  К), учитывающая неравновесные процессы физико-химической



кинетики, возбуждение многочисленных (84 для кислорода, 62 для азота) электронных состояний атомов и неравновесное излучение из релаксационной зоны за скачком уплотнения перед ГЛА при скоростях  $V \approx 8-13$  км/с на высотах с режимом максимальных лучистых потоков. При таком подходе нет необходимости задавать константы скоростей ионизации атомов, которые имеют очень большой разброс.

3. Проведенные сравнения результатов расчётов с использованием разработанной модели с экспериментальными данными, полученными в ударных трубах, показывают их достаточно хорошее согласование. Учёт радиационного охлаждения газа в зоне релаксации позволил объяснить автору наблюдаемые различия параметров (интенсивности излучения, концентрации электронов) в ударных трубах различного диаметра.

Полученные результаты и выводы являются достоверными и обоснованными за счёт использования корректных физико-химических моделей, сравнения с экспериментальными данными, включая данные лётных экспериментов, и результатами других авторов.

#### **Значимость полученных результатов для науки и практики**

Построенная детальная уровневая радиационно-столкновительная модель высокотемпературного воздуха применительно к условиям входа космических аппаратов в атмосферу Земли со второй космической скоростью, содержит большой объём информации по кинетике протекания физико-химических и радиационных процессов, и безусловно представляет интерес для специалистов, работающих в данной области.

Предложенная модель, включая выбранные кинетические характеристики процессов возбуждения и ионизации атомарных составляющих воздуха, используется для расчетов излучения воздуха за сильными ударными волнами. Это важно как при интерпретации экспериментальных данных в ударных трубах, так и при определении радиационных тепловых потоков к поверхности спускаемых аппаратов, входящих в атмосферу Земли со второй космической скоростью, когда лучистый теплообмен сравним с конвективным.

Результаты работы могут быть использованы в организациях аэрокосмической отрасли (ФГУП «ЦАГИ», НПО Машиностроения, ОАО «Энергия» им. С.П. Королёва, НПО им. С.А. Лавочкина и др.) в институтах РАН и научных центрах (МГУ, МФТИ, МАИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИПМех. им. А.Ю. Ишлинского РАН, и др.), а также в профильных институтах МО РФ.

### **Соответствие автореферата диссертации**

Основные выводы и результаты работы представлены в автореферате. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

### **Замечания**

Работе не лишена недостатков:

1. В схеме обменных реакций Я.Б.Зельдовича, автором используется в расчетах устаревшая модель, не учитывающая протекание реакции с участием колебательно- возбужденной молекулы азота (см. работы G. Candler).

2. При построении уровневой кинетики формирования атомарного излучения из работы не понятно, учитывался ли обмен энергией между резонансными состояниями атомов, атомарных ионов, молекул и их ионов.

3. При описании моделей расчета излучения нет ссылок на используемую автором базу данных спектроскопических величин. Эти данные в литературе сильно разнятся, что может привести к значительным расхождениям в конечном результате.

4. Спорным остается вопрос о начальных условиях для температуры электронов за фронтом ударной волны. Его можно было решить, проварьировав различные модели и оценив их возможную реакцию на кинетику процессов с участием электронов.

Приведенные замечания не снижают значимость проведенных автором исследований. Они являются пожеланиями к продолжению работ в данном крайне сложном и востребованном направлении.

Доклад автора по теме диссертации заслушан на видеосеминаре по аэромеханике ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбГТУ– НИИМ МГУ (16.05. 2017). Проект настоящего отзыва обсужден на научном семинаре отдела физической аэродинамики НИО-8 ЦАГИ 02.04.2019 г.

### **Заключение**

Диссертация Прутько Кирилла Александровича является законченной научно-квалификационной работой, посвященной актуальной теме, выполнена на высоком уровне и обладает как научной новизной, так и практической значимостью. Результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в



рецензируемых научных журналах. Таким образом, считаем, 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».

Главный научный сотрудник

Член- корреспондент РАН

Доктор физико- математических наук



И.В. Егоров

Ведущий научный сотрудник

Кандидат физико- математических наук



А.Ю. Киреев