

На правах рукописи



Прутько Кирилл Александрович

**Неравновесное излучение воздуха при больших
скоростях полёта спускаемых аппаратов**

Специальность 01.02.05 —
механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Королёв — 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения».

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Залогин Георгий Николаевич

Официальные оппоненты: **Уваров Александр Викторович**,
доктор физико-математических наук,
Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова,
профессор

Кузнецов Михаил Михайлович,
доктор физико-математических наук,
Московский государственный областной уни-
верситет,
профессор

Ведущая организация: Центральный аэрогидродинамический инсти-
тут имени профессора Н. Е. Жуковского

Защита состоится 15 мая 2019 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертаци-
онного совета Д002.110.03 при Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Объединенном институте высоких температур Россий-
ской академии наук по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13,
стр. 2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН и на сай-
те <http://jiht.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учре-
ждения, просьба направлять по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская,
д. 13, стр. 2, ученому секретарю диссертационного совета Д002.110.03.

Автореферат разослан "___" _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного
совета
Д002.110.03,
д-р тех. наук



Директор Леонид Бенцианович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. При полетах аппаратов в атмосфере со сверхорбитальной скоростью ($V \sim 9\text{--}12$ 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, даже при входе с орбиты искусственного спутника Земли (ИСЗ) (С. Т. Суржиков, 2011). Таким образом, построение и тестирование моделей для описания излучения газов, нагретых ударной волной, является актуальной, фундаментальной и прикладной задачей.

Помимо моделирования излучения за ударной волной при возвращении спускаемого аппарата существует необходимость в интерпретации экспериментов в ударных трубах, которые способствуют изучению низкотемпературной плазмы и процессов, протекающих в ней.

Целью данной работы является разработка и валидация физико-химической модели для описания радиационных процессов в воздухе за сильными ударными волнами (радиационно-столкновительной модели) и при входе спускаемых аппаратов в атмосферу путем сравнения с трубными и летными экспериментами.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Выбрать физико-химические реакции и компоненты газа, учитываемые при создании радиационно-столкновительной модели высокотемпературного воздуха, для расчета интенсивности и спектрального состава излучения атомарных компонентов.
2. Разработать метод и программу для численного моделирования процессов ионизации, излучения, переноса излучения и определения лучистых тепловых потоков за сильными ударными волнами и около возвращаемых аппаратов нового поколения.
3. Разработать базы данных химических реакций, реакций ионизации, протекающих в высокотемпературном воздухе, и констант скоростей возбуждения электронных состояний атомов.

4. Провести валидацию разработанных методик путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными, включая данные летных экспериментов.

Научная новизна:

1. Разработана новая поуровневая радиационно-столкновительная модель полностью диссоциированного высокотемпературного воздуха ($T \approx 9000\text{--}15000\text{ K}$), 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 гиперзвуковым летательным аппаратом (ГЛА) при скоростях $V \approx 8\text{--}13\text{ км/с}$ на высотах с режимом максимальных лучистых потоков, причем при расчете интенсивности для обеспечения точности более 90 % учитываются 176 и 307 переходов между уровнями для атомов O и N, соответственно.
2. С использованием разработанной вычислительной программы получены зависимости вклада различных механизмов излучения атомов в лучистый поток от высоты по траектории движения ГЛА при его спуске в атмосфере со скоростью входа равной 2-й космической ($V = 11.2\text{ км/с}$). Полученные результаты согласуются с данными лётных экспериментов на аппаратах Аполлон-4 и лётном демонстраторе FIRE-II. В частности показано, что вклад линейчатого излучения в лучистый поток превышает 50 % на высотах с максимальными лучистыми потоками.
3. Впервые разработан и внедрен итерационный алгоритм решения жесткой системы нелинейных дифференциальных уравнений с числом переменных равным 156 (концентрации – 151, газодинамические параметры – 5: плотность, скорость, давление, поступательная и электронная температуры), соответствующий физической постановке задачи и отвечающий реальным условиям взаимного влияния излучения на газодинамические процессы и наоборот в зоне за сильной ударной волной (скорости более 9 км/с).
4. Показано, что для аппаратов большого размера ($R > 1\text{ м}$, типа Союз, Федерация, Орион, Dragon) в зоне максимального лучистого теплообмена применима разработанная модель излучения атомов в равновесной постановке. Это подтверждено хорошим согласием расчетных значений лучистых потоков к спускаемому аппарату Аполлон-4 и летному демонстратору FIRE-II с данными летных измерений. Для анализа летных данных зонда Stardust, имеющего малый радиус носовой части, или расчета лучистого теплообмена для СА, перечисленных выше, на больших высотах, необходимо применение неравновесной модели.

Практическая значимость:

1. На основе анализа результатов экспериментов в ударных трубах и данных, использующих квантово-механические расчёты, получен набор констант скоростей физико-химических и излучательных процессов, позволяющий определять рассчитываемые параметры (степень ионизации, интенсивность излучения отдельных компонентов, спектральный состав) и уточняющий ранее предложенные другими авторами наборы. Для вычисления констант скоростей реакций использовались базы данных NIST и TOPbase.
2. Для расчёта спектрального распределения и переноса излучения в плоском слое предложен новый способ построения адаптивной сетки. Причем для точного учёта спектрального состава и переноса излучения в линиях принимаются во внимание эффекты уширения линий (Доплера, Штарка), пересечение профилей линий, оптическая толщина газа в пределах подслоя и распределение температуры в слое. Разработан алгоритм выбора ширины линии и количества расчётных узлов (точек) для получения результатов с заданной точностью при приемлемых затратах машинного времени.
3. 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Для рассмотренных СА больших размеров в области максимального лучистого нагрева ($9.4 \text{ км/с} < V < 10.6 \text{ км/с}$ и $56 \text{ км} < H < 79 \text{ км}$) применима модель равновесного излучения. Достаточную точность расчета интенсивности излучения ударного слоя СА, входящего в атмосферу со 2-й космической скоростью, дает аппроксимационная групповая модель.
2. Интенсивность излучения атомарных компонентов равновесного воздуха при высоких температурах обусловлено тремя основными процессами: торможением электронов в поле ионов, рекомбинацией электронов с ионами, связанно-связанными переходами.
3. При отсутствии равновесия за УВ необходимо рассчитывать поуровневую кинетику заселения возбужденных состояний и ионизацию атомов. В этом случае константа скорости ступенчатой ионизации атомов определяется в процессе решения задачи.

4. Компьютерная реализация разработанных моделей излучения высокотемпературного воздуха в равновесном и неравновесном приближениях.
5. Применение радиационной модели для расчета интенсивности и спектрального состава излучения за ударными волнами в широком диапазоне скоростей УВ и давлений p_∞ . Анализ результатов и их сравнение с экспериментальными данными.

Достоверность полученных результатов обеспечивается физической обоснованностью постановок задач, выбранными реакциями и их константами скоростей, используемыми численными методами. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами, а также расчетными и экспериментальными данными, включая данные летных экспериментов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на профильных научных конференциях и семинарах:

1. Инновации в авиации и космонавтике (г. Москва, МАИ, 17–20 апреля 2012 г.).
2. 55-я научная конференция МФТИ (г. Королев, ЦНИИмаш, 19–25 ноября 2012 г.).
3. Видео семинар по аэромеханике ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбГТУ – НИИМ МГУ (г. Москва, НИИМ МГУ, 27 мая 2014 г.).
4. 8-я всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» (АФМ-2014) (г. Москва, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 2–3 декабря 2014 г.).
5. Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов ЦНИИмаш (г. Королев, ЦНИИмаш, 27 февраля 2015 г.).
6. 9-я всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» (АФМ-2015) (г. Москва, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 1–2 декабря 2015 г.).
7. Конференция, посвященная 70-летию ФГУП ЦНИИмаш. «Космонавтика и ракетостроение: взгляд в будущее» (г. Королёв, ЦНИИмаш, 12–13 мая 2016 г.).
8. Научный семинар профессоров В.В. Лунева и Ю.М. Липницкого в ЦНИИмаш. (г. Королев, ЦНИИмаш, 2016 г.).
9. 10-я всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» (АФМ-2016) (г. Москва, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 5–9 декабря 2016 г.).
10. Видео семинар по аэромеханике ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбГТУ – НИИМ МГУ (г. Москва, НИИМ МГУ, 16 мая 2017 г.).

11. XXI Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 60-летию со дня запуска первого искусственного спутника (г. Королёв, РКК «Энергия», 30.10.2017 – 3.11.2017).
12. 11-я всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» (АФМ-2017) (г. Москва, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 21–24 ноября 2017 г.).
13. Международная конференция «50 лет развития сеточно-характеристического метода» (г. Долгопрудный, МФТИ, 31.03.2018 – 3.04.2018).

Личный вклад. Лично автором разработана поуровневая радиационно-столкновительная модель высокотемпературного полностью диссоциированного воздуха, в которой учитываются процессы физико-химической кинетики, возбуждение электронных состояний атомов, неравновесное излучение из релаксационной зоны, перенос излучения и его влияние на газодинамические параметры, а также алгоритм расчета течений с её использованием и программная реализация.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 печатных изданиях, 7 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 8 — в тезисах докладов.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, четырёх глав, заключения, списка принятых обозначений и сокращений, списка литературы и приложения. Полный объём диссертации составляет 158 страниц, включая 60 рисунков и 17 таблиц. Список литературы содержит 93 наименований.

Содержание работы

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 приводится история вопроса относительно излучения газа, а также физико-химических процессов, протекающих в высокотемпературном воздухе. Фундаментальными исследованиями этих вопросов занимались Ю. П. Райзер и Я. Б. Зельдович (1966). Также большой вклад в решение проблемы лучисто-конвективного теплообмена спускаемых аппаратов и радиационной газовой динамики внёс С. Т. Суржиков (2004, 2006, 2011, 2013). Приведены работы ряда авторов, изучающих данный вопрос и результаты их сравнения. Описаны факторы, усложняющие расчет лучистого теплообмена при спуске СА, в том числе: большое количество излучающих компонентов, неравновесные физико-химические процессы, разнородность констант скоростей ионизации, рассчитанных по разным моделям.

Первая глава посвящена определению границ применимости равновесных физико-химической и радиационной моделей (К. А. Прутько и др., 2013; К. А. Прутько, 2014). Ударный слой перед аппаратом считается плоским, поскольку его толщина $\delta = 0.0468R$ намного меньше радиуса сферического сегмента R при $V \geq 8$ км/с (Б. А. Землянский, 2013). 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 рассмотренных спускаемых аппаратов, чьи размеры $R > 1$ 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 (К. А. Прутько и др., 2013). При этом для рассматриваемых условий полёта в равновесной области ударного слоя воздух практически полностью диссоциирован и считается атомарным. Данные допущения и предположения значительно упрощают решение задачи по переносу излучения. Для аппаратов, чьи размеры $R < 1$ м, на участке траектории с наибольшим лучистым тепловым потоком ударный слой неравновесный, поскольку релаксационная область за фронтом ударной волны занимает значительную часть ударного слоя. На рис. 1 видно, что для аппаратов большого размера (FIRE-II, ППТС) толщина пограничного слоя δ^* и релаксационной зоны $\delta_{\text{хим}}$ значительно меньше толщины ударного слоя δ , в то время как для аппарата малого размера (Stardust) релаксационная зона занимает большую часть ударного слоя.

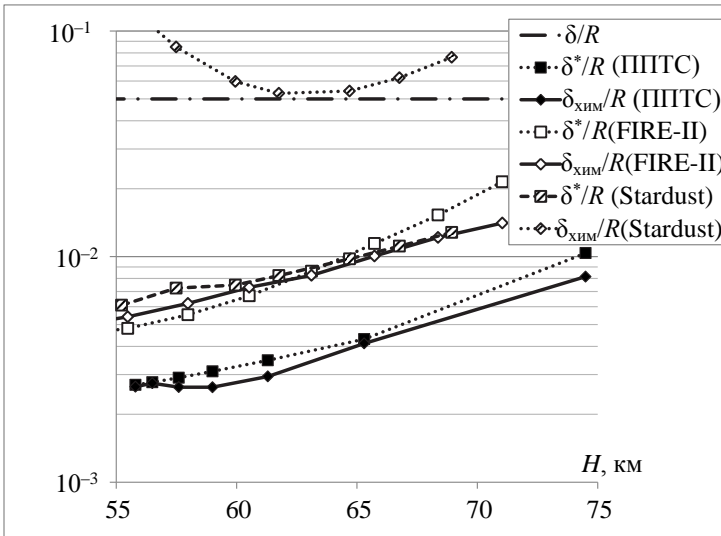


Рис. 1 — Изменение толщин ударного и пограничного слоев и релаксационной зоны от высоты полета для разных аппаратов

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, $1 < p < 200$ кПа. Данные параметры соответствуют параметрам ударного слоя около СА при входе в атмосферу Земли со сверхорбитальной скоростью. Ударный слой состоит из атомов азота (79 % от всего объема), атомов кислорода (21 %), их ионов и электронов. Зная распределение давления и температуры за фронтом ударной волны, определяются концентрации возбужденных состояний атомов из максвелловского распределения. Концентрации ионов и электронов определяются по программе расчета равновесного состава при заданных значениях давления и температуры. Основную вклад в излучение воздуха за сильными ударными волнами дают следующие три процесса (Н. Н. Пилюгин, Г. А. Тирский, 1989):

1. Линейчатые переходы между связанными возбужденными состояниями атомов.
2. Фоторекомбинационное излучение при рекомбинации положительных ионов атомов с электронами.
3. Тормозное излучение электронов в электрическом поле ионов.

Для расчета линейчатого излучения рассчитывается профиль Фойгта линии, учитывающий следующие уширения (Н. Н. Пилюгин, Г. А. Тирский, 1989):

1. Уширение Доплера, возникающее из-за хаотического теплового движения атомов.
2. Уширение вследствие эффекта Штарка, возникающее в результате столкновения атома с электронами и ионами.

Расчет профилей спектральных линий и построение сетки для расчета излучения играют важную роль, поскольку вклад линейчатого излучения в интегральный лучистый поток может составлять от 50 % и более. Для переноса излучения в плоском слое требуется построение сеток в каждом из подслоев, которое осложняется следующими аспектами:

1. Эффект уширения профиля линий.
2. Наложение профилей линий.
3. Разная оптическая толщина газа для линий в разных подслоях.
4. Распределение температур в разных подслоях.

Расчет переноса лучистого излучения определялся в приближении плоского слоя (Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер, 1966). На рис. 2 представлено сравнение коэффициентов поглощения атомарного воздуха при давлении $p = 100$ кПа, $T = 10000$ К с учетом вышеизложенных процессов излучения. Данные С.Т. Суржикова представлены линией из точек, Ю.А. Пластинина – пунктирной линией, точное распределение коэффициентов поглощения, вычисленное в данной работе – серой линией, это же

распределение, с усреднением по спектральным диапазоном – чёрной линией. Данные С.Т. Суржикова и Ю.А. Пластинина включают в себя как линейчатое, так и сплошное излучение, которые усреднены по спектральным диапазонам, и представляют из себя многоступенчатые групповые модели. На рисунке видно, как линии резко выделяются на фоне сплошного спектра и отличаются от многоступенчатых моделей. Это различие может сильно влиять на интегральное значение лучистого теплового потока.

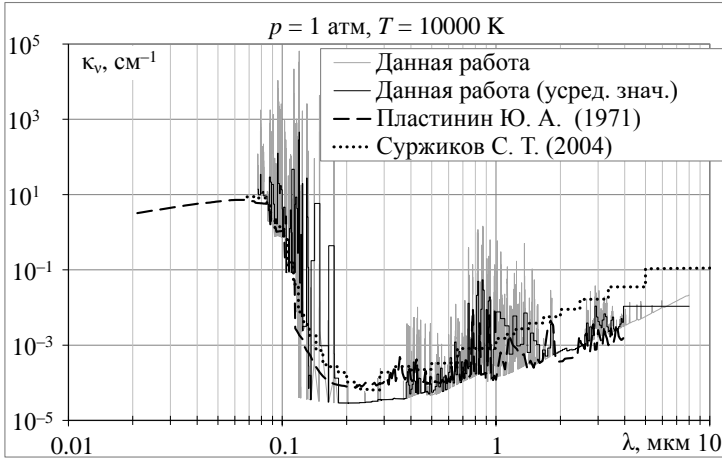


Рис. 2 — Сравнение коэффициентов поглощения

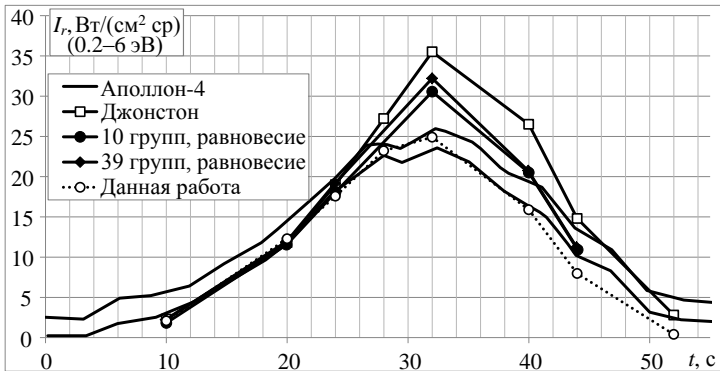


Рис. 3 — Сравнение рассчитанной и измеренной интенсивности излучения в критической точке СА Аполлон-4 в диапазоне $\lambda = 0.2-6$ мкм

На рис. 3 представлены результаты измеренной интенсивности излучения (две черные линии без маркеров представляют разброс летных данных в критической точке) аппарата Аполлон-4 (А. Balakrishnan, 1985),

линии со сплошными кругами и ромбами представляют расчеты по многоступенчатой модели (В. И. Власов, 2012), линия с полыми квадратами – результаты расчетов Джонстона (С. О. Johnston, 2006), пунктирная линия с полыми кругами – результаты данной работы (К. А. Прутько и др., 2013). Результаты расчетов по многоступенчатой модели и проведенных в данной работе хорошо совпадают с летными данными. В области с максимальными значениями лучистого потока многоступенчатая модель завышает значения интенсивности излучения. Также было получено хорошее согласие расчетных результатов с летными измерениями аппарата FIRE-II (D. L. Cauchon, 1967). Приведенные сравнения подтверждают справедливость предположения о малом вкладе молекулярного излучения в лучистый теплообмен. На рис. 4 представлено какой вклад в лучистый поток на поверхность FIRE-II дает каждый из механизмов излучения из ударного слоя в точке траектории с максимальным суммарным потоком (при $t = 1643$ с). Обозначение « $b-f$ » отвечает за связанно-свободные переходы, « $f-f$ » – свободно-свободные, « $b-b$ » – связанно-связанные. Из рисунка можно сделать вывод, что наибольший вклад в лучистый поток при рассматриваемых условиях дает линейчатое излучение (более 50 %). Причем в ультрафиолетовом диапазоне ($\lambda < 200$ нм) вклад фоторекомбинационного излучения сопоставим с линейчатым, а в инфракрасном диапазоне ($\lambda > 200$ нм) преобладает излучение при связанно-связанных переходах. Тормозное излучение во всем диапазоне составляет малую долю всего лучистого потока. В рассматриваемых случаях соотношение интегрального излучения от всех процессов в ультрафиолетовом диапазоне к излучению в инфракрасном диапазоне варьируется от 1 до 5.

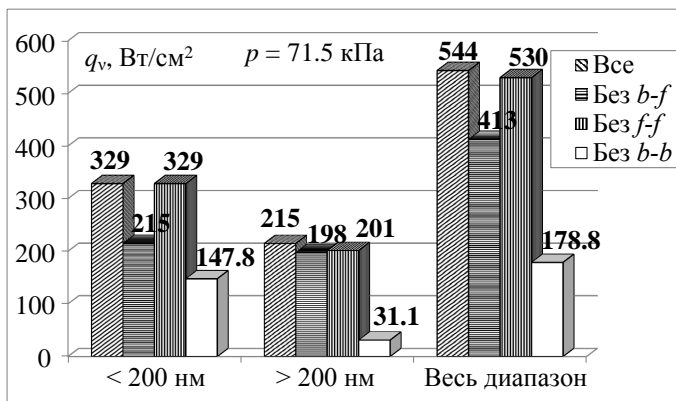


Рис. 4 – Вклад в лучистый поток различных механизмов излучения (FIRE-II, $t = 1643$ с)

В данной главе показано, что для 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, молекул, ионов и электронов, интенсивности и спектрального состава излучения, переноса излучения и его влияния на газодинамику. Учитываются следующие частицы:

1. Нейтральные атомы: N (62 энергетических состояния), O (84 энергетических состояния).
2. Заряженные частицы: NO^+ , N_2^+ , O_2^+ , N^+ , O^+ и e^- .
3. Нейтральные молекулы: N_2 , O_2 , NO.

В 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 уравнениями газодинамики. Учитываются следующие элементарные процессы:

1. Возбуждение и дезактивация электронных состояний за счет электронного удара.
2. Ионизация электронным ударом и трехчастичная рекомбинация.
3. Возбуждение и дезактивация электронных состояний ударом тяжелых частиц.
4. Ассоциативная ионизация и диссоциативная рекомбинация.
5. Диссоциация молекул и рекомбинация атомов в молекулы, обменные реакции.
6. Связанно-связанные переходы (линейчатое излучение).
7. Фотоионизация и рекомбинация с излучением фотона.

Дифференциальные уравнения для концентрации частицы определенного сорта N_s в общем виде записывается в виде:

$$\frac{\partial N_s}{\partial t} = \sum_{j=1}^m (k_{js} N_j [N_e] - k_{sj} N_s [N_e]), \quad (1)$$

где m – общее количество сортов частиц, k_{js} и k_{sj} – константы скорости заселения и обеднения частицы сорта s , соответственно. Квадратные скобки, выделяющие концентрации, означают возможность участия других частиц в реакции. Это зависит от того какие частицы участвуют в данной реакции. В реакции излучения, например, нет никакой другой частицы, кроме той, которая излучает. Для реакции возбуждения за счет электронного удара в

формуле в квадратных скобках будет записана концентрация электронов N_e . Для трехчастичной рекомбинации – N_e^2 .

Совместно с системой дифференциальных уравнений для кинетики различных частиц решаются уравнения газодинамики.

Закон сохранения массы:

$$\rho U = \text{const}$$

Закон сохранения импульса:

$$\rho U^2 + p = \text{const}$$

Уравнение для полной энергии

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho U \left[h + \frac{U^2}{2} \right] \right) = \dot{E}_{total},$$

$$\dot{E}_{total} = \left[\frac{dE_e}{dt} \right]^{ff} + \left[\frac{dE}{dt} \right]^{bb} + \left[\frac{dE}{dt} \right]^{bf}, \quad (2)$$

где ρ, U, p – плотность, скорость и давление газа, соответственно, h – полная удельная энтальпия газа, \dot{E}_{total} – член, отвечающий за уменьшение энергии в виде излучения фотонов возбужденными атомами при переходе на более низкие состояния (bb), а также в виде тормозного (ff) и фоторекомбинационного излучения (bf).

Уравнение для электронной энергии:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{3}{2} k_B T_e N_e U \right) + k_B T_e N_e \frac{\partial U}{\partial x} = \dot{E}_e, \quad (3)$$

$$\dot{E}_e = \left[\frac{dE_e}{dt} \right]^e + \left[\frac{dE_e}{dt} \right]^p + \left[\frac{dE_e}{dt} \right]^{ec}, \quad (4)$$

где k_B – константа Больцмана, \dot{E}_e – источниковый член, отвечающий за изменение энергии электронов, $\left[\frac{dE_e}{dt} \right]^e$ – член, отвечающий за изменение энергии электронов при возбуждении и дезактивации электронных состояний атомов, $\left[\frac{dE_e}{dt} \right]^{ff}$ – член, отвечающий за убыль энергии при тормозном излучении электронов, $\left[\frac{dE_e}{dt} \right]^{ec}$ – член, отвечающий за переход кинетической энергии от тяжелых частиц электронам и обратно за счет упругих соударений.

Уравнение состояния:

$$p = N_h k_B T_h + N_e k_B T_e,$$

где $N_h = \sum_{j=1}^m N_j$ – концентрация всех тяжелых частиц с поступательной температурой T_h , N_e – концентрация электронов с электронной температурой T_e .

Для расчета констант скоростей реакции электронного удара использовались формулы по модели Дравина (H. Drawin, 1963). По этой модели переходы между возбужденными состояниями атомов делятся на оптически разрешенные, запрещенные по спину и запрещенные по четности. Также для переходов с участием нижних уровней кислорода и азота использовались таблицы Тайала (S. S. Tayal, 2003, 2006). Формулы Дравина использовались также для вычисления констант скоростей ионизации электронным ударом. Дравин оценил возбуждение электронных состояний атомов ударом тяжелых частиц. Константы скоростей ассоциативной диссоциации, диссоциативной рекомбинации, диссоциации и обменных реакций были взяты из (C. Park, 1993). Для связанно-связанных переходов использовалась база данных NIST (Y. Ralchenko, 1999). Для реакций фотоионизации и фоторекомбинации использовалась база данных TOPBase (W. Sunto, 1993).

Представленная система обыкновенных дифференциальных уравнений решалась с помощью кода LSODE (R. Krishnan, 1993), который хорошо подходит для решения жестких систем. Для того, чтобы решить систему дифференциальных уравнений необходимо записать уравнения в виде:

$$\dot{y} = \frac{dy}{d\xi} = f(y(\xi), \xi),$$

задать начальные условия:

$$y(\xi_0) = y_0,$$

где y, y_0, \dot{y} и f – векторные столбцы с $N \geq 1$ компонентами, а ξ – независимая переменная, например, время или расстояние. Для решения жестких систем применяется метод обратной дифференциальной формулы (C. W. Gear, 1971). При решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений код LSODE варьирует шаг интегрирования для обеспечения более быстрого решения задачи, причем на каждом шаге производится проверка точности решения, которая задается пользователем. Порядок численного неявного метода также изменяется от 1 до 5 внутри программы в зависимости от того насколько система оказывается жесткой в разные моменты решения. Кроме того Якобиан определяется численно внутри кода LSODE.

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 нахождении структуры невязкой релаксационной зоны за сильной ударной волной в воздухе с учетом неравновесной кинетики и переноса излучения.

Алгоритм задачи имеет следующий вид:

1. Задание условий в набегающем потоке.
2. Расчет начальных параметров газа.
3. Расчет параметров в слое без учета поглощения излучения.
4. Расчет излучения, переноса излучения в слое.
5. Проверка сходимости. Если сходимость достигнута – завершение расчета. В ином случае – дальнейшее вычисление.
6. Расчет параметров в слое с учетом поглощения излучения. Возвращение к пункту 4.

Аналогичный подход (в упрощенном рассмотрении) был использован В. П. Стуловым, Л. М. Биберманом (1967 г.). На рис. 5 представлен пример того, как изменяется концентрация электронов на различных итерациях в ходе решения задачи с учетом излучения. Параметры расчета близки к условиям входа аппарата в атмосферу Земли со второй космической скоростью ($p_\infty = 870$ Па, $V_\infty = 11975$ м/с, $T_\infty = 2800$ К). Квадратами, кругами, ромбами и крестами отмечены профили электронных концентраций на 1, 2, 3 и 4 итерациях, соответственно. Черная линия без маркеров показывает концентрацию для расчета без учёта излучения. Расчеты 3-й и 4-й итерации уже незначительно отличаются друг от друга, решение считается сошедшемся. Газ в рассматриваемом случае является достаточно оптически толстым и остывание газа заметно лишь в слое толщиной 2 мм ($L = 5-7$ мм). В заключение можно сказать, что газ во всем слое не находится в равновесном состоянии, так как оно нарушается за счет излучения).

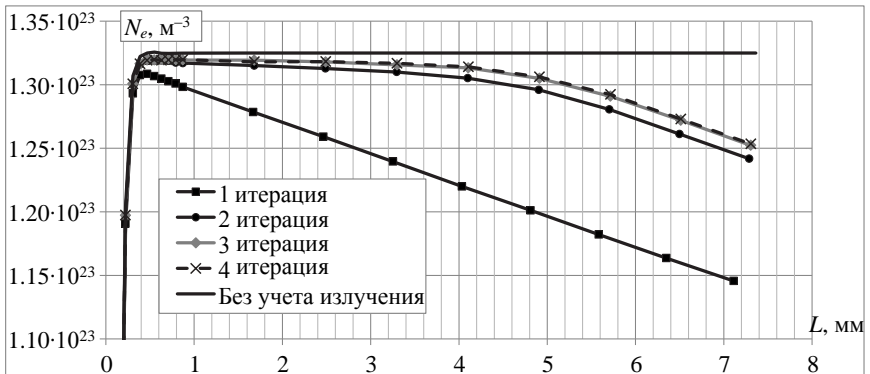


Рис. 5 — Электронная концентрация на различных итерациях

Проведено сравнение с экспериментом на электроразрядной трубе NASA Ames Electric Arc Shock Tube (EAST) (С. О. Johnston, 2008), диаметром 10.16 см. Скорость ударной волны составляла 9.165 км/с, измеряемая с погрешностью равной 1.5 %, начальное давление – 13.3 Па. Было получено хорошее согласие по заселенностям возбужденных состояний атомов азота, а также по интегральной интенсивности излучения воздуха в диапазоне длин волн $\lambda = 700-900$ нм с учетом погрешности измерения скорости,

которая даёт разброс в расчете интенсивности излучения равный $\pm 50\%$. Полученный в расчетах ход интенсивности излучения отличается от полученного в эксперименте в связи с тем, что была применена упрощенная модель диссоциации. Однако при удалении от фронта УВ $x > 0.75$ см наблюдается довольно хорошее согласие.

На рис. 6 представлены заселенности электронных состояний азота на расстоянии $x = 3.1$ см от фронта УВ. На рис. 7 представлена интегральная интенсивность излучения в пробке в диапазоне длин волн $\lambda = 800\text{--}830$ нм.

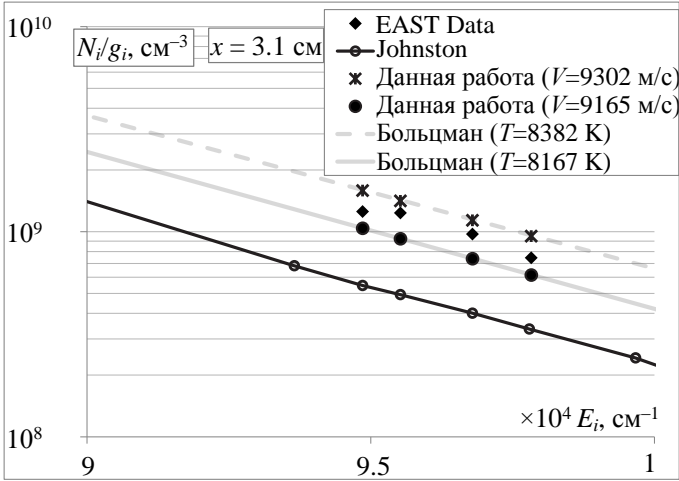


Рис. 6 — Заселенность электронных состояний азота N_i/g_i на расстоянии $x = 3.1$ см от фронта УВ

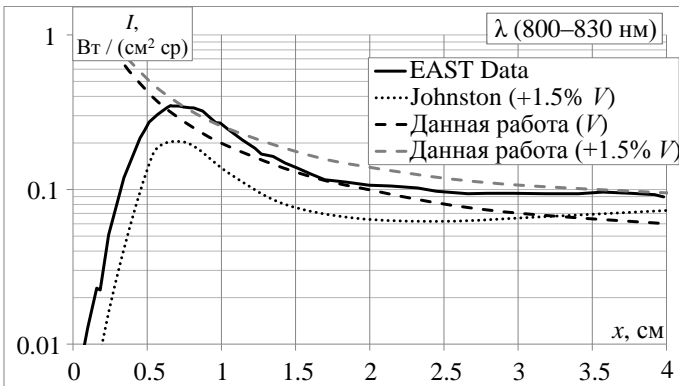


Рис. 7 — Интегральная интенсивность излучения в зависимости от расстояния x фронта УВ ($\lambda = 800\text{--}830$ нм)

Далее приводится сравнение расчетного времени релаксации ионизации за сильными ударными волнами ($V = 11\text{--}14$ км/с) в приближении оптически толстого газа с экспериментальными данными и расчетами других авторов. На рис. 8 квадратными маркерами и пунктирной кривой отмечены параметры $p \cdot \tau$ (p – начальное давление, τ – время релаксации) для воздуха с учетом диссоциации и полностью диссоциированного воздуха, соответственно. Давление p равнялось 26.6 Па. Чем сильнее ударная волна, тем меньше различие между квадратными маркерами и пунктирной кривой, поскольку диссоциация протекает быстрее при больших скоростях УВ. Эксперименты Уилсона (J. Wilson, 1966), а также расчетные результаты Бибермана (Л. М. Биберман, 1965) и Железняк (М. Б. Железняк, 1968), хорошо согласуются с полученными результатами.

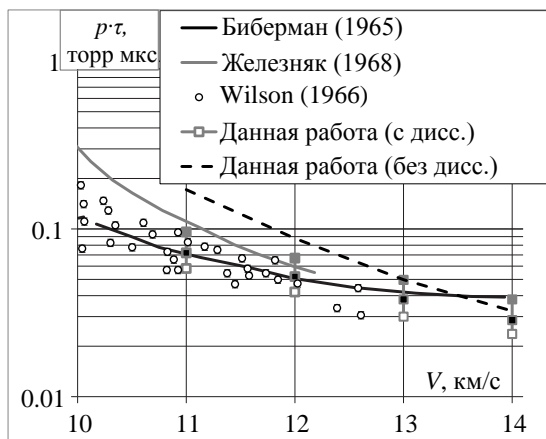


Рис. 8 — $p \cdot \tau$ в зависимости от скорости ударной волны V

Также были рассчитаны электронные концентрации, достигаемые в пробке за фронтом ударной волны со скоростями $V = 11\text{--}14$ км/с. Ранее эта задача решалась Г. Н. Залогиним, В. В. Лунёвым и Ю. А. Пластининым (1980 г.) и В. А. Гореловым и др. (2007 г.). Расчетные и экспериментальные данные представлены на рис. 9. Для случая оптически прозрачного воздуха электронная концентрация принимает значения намного ниже равновесных. В данной работе это объясняется тем, что за счет радиационного охлаждения воздух остывает, и при местных давлениях и температуре концентрация электронов принимает практически равновесные значения, естественно, меньшие, чем равновесные значения концентраций без учета радиационного охлаждения воздуха. Такое поведение электронных концентраций наблюдается в экспериментах Горелова (В. А. Горелов, 1994) и Счарфмана (W. E. Scharfman, 1970). В экспериментах Крудена (В. А. Cruden, 2011) и Уилсона (J. Wilson, 1966) концентрация электронов, наоборот, превышает равновесные значения. В данной работе

делается предположение, что такое поведение может наблюдаться из-за неполной диссоциации азота. По-видимому, реальная диссоциация азота протекает более длительное время, а это влечет за собой более высокую поступательную температуру газа и электронную температуру. При этом, поскольку, лавинная ионизация уже успела произойти, то электронная концентрация при местных давлении и температуре принимает более высокие значения, по сравнению с расчетами с равновесной диссоциацией. Крестами отмечены максимальные относительные величины электронной концентрации, которые были получены при учете простой модели диссоциации. Данные результаты хорошо согласуются с результатами Уилсона.

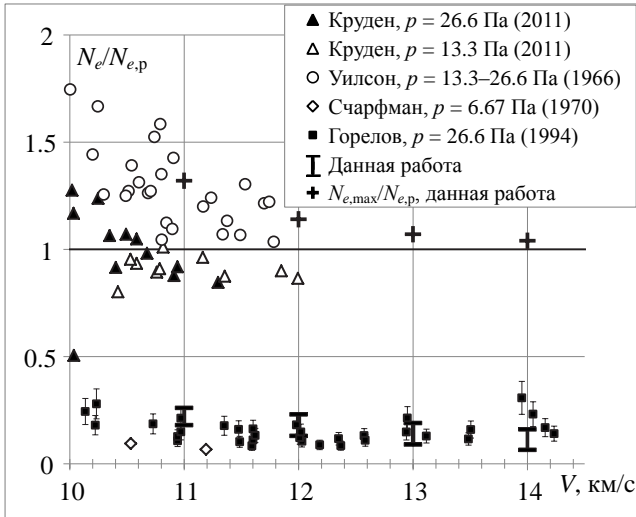


Рис. 9 — Относительная электронная концентрация $N_e/N_{e,p}$

Проводятся сравнения с результатами измерения интенсивности излучения, температур и концентраций при обтекании пластины потоком воздуха со скоростью $V \approx 12$ км/с в наземной экспериментальной установке X2 Центра Гиперзвука Университета Квинсленд в Австралии (L. Nermann, 2017). Плотность воздуха составляет $\rho_\infty \approx 10^{-3}$ кг/м³, давление $p_\infty \approx 870$ Па, энтальпия потока $h = 74.5$ МДж/кг. На рис. 10 приведен рассчитанный в данной работе спектр и интегральная интенсивность излучения, накапливающая свое значение в интервале длин волн $\lambda = 118-185$ нм, измеренная экспериментально (серая линия), и рассчитанная в данной работе (черная линия). Рассчитанная интегральная интенсивность получилась на 26 % ниже измеренной, что представляет хорошее согласие данных.

На рис. 11 представлены температуры возбуждения электронных состояний T_{exc} атомов азота, полученные из эксперимента различными

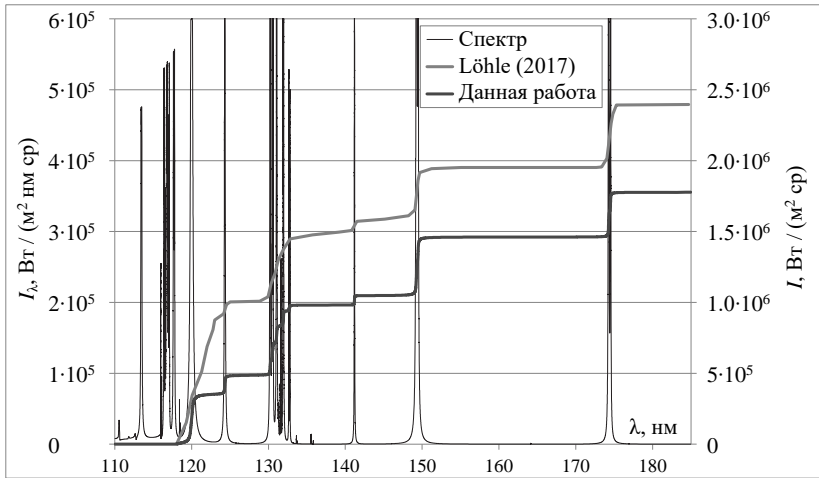


Рис. 10 — Сравнение интегрального лучистого потока

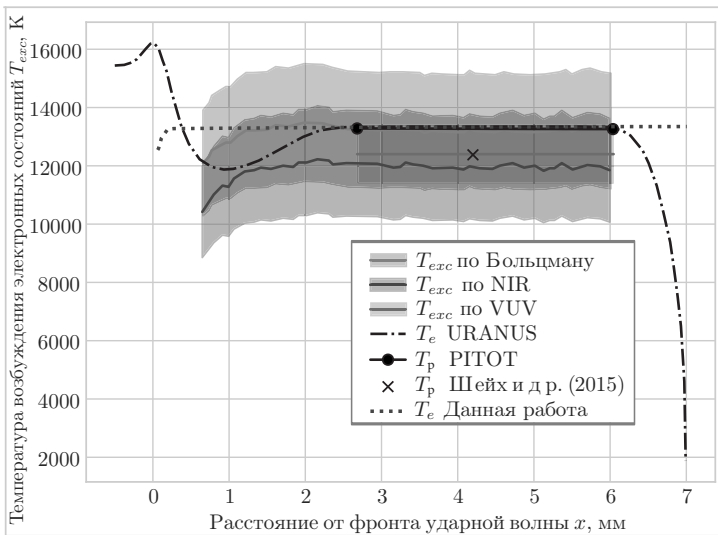


Рис. 11 — Температура возбуждения T_{exc} атомов азота вдоль критической линии тока

способами, а также расчетные данные электронной температуры полученные в данной работе. Температура возбуждения T_{exc} определялась из измеренных данных в ближнем инфракрасном (NIR) и вакуумном ультрафиолетовом (VUV) спектре с помощью определения излучения абсолютно черного тела (АЧТ). Помимо определения T_{exc} по излучению АЧТ, температура возбуждения была определена по концентрации возбужденных состояний из предположения заселенности по распределению Больцмана

относительно концентраций атомов азота N_N . Полученная в данной работе электронная температура хорошо согласуется с экспериментальными измерениями и не выходит за рамки погрешностей для всех способов измерений.

В последнее время в НИИ Механики МГУ проводятся экспериментальные исследования в ударных трубах при высоких скоростях УВ (П. В. Козлов, 2013, 2014, 2016; С. Т. Суржиков, А. С. Дикалюк и др., 2013). Сравнение с этими данными будет проведено позднее.

В **заклучении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработана поуровневая радиационно-столкновительная модель высокотемпературного воздуха для расчета кинетики заселения возбужденных электронных состояний атомов и расчета интенсивности и спектрального состава излучения за сильными ударными волнами ($V > 9$ км/с).
2. Выбраны физико-химические реакции и компоненты газа для радиационно-столкновительной модели высокотемпературного воздуха используемой при расчете интенсивности и спектрального состава излучения атомарных компонентов за сильными ударными волнами ($V > 9$ км/с) и лучистых тепловых потоков к спускаемым аппаратам, входящим в атмосферу Земли со второй космической скоростью. Модель основана на рассмотрении поуровневой кинетики возбуждения электронных состояний атомов.
3. С использованием радиационно-столкновительной модели разработаны метод, алгоритм и компьютерный код для численного моделирования процессов ионизации, излучения, переноса излучения и определения лучистых тепловых потоков за сильными ударными волнами и около спускаемых аппаратов при неравновесном протекании рассматриваемых процессов с учетом радиационного охлаждения ударного слоя или высокотемпературной пробки в ударной трубе.
4. Валидация вновь разработанной поуровневой радиационной модели высокотемпературного воздуха для условий равновесного протекания физико-химических процессов проводилась путем сравнения расчетных величин лучистых тепловых потоков с данными летных экспериментов американского спускаемого аппарата Аполлон-4 и летного демонстратора FIRE-II. В случае неравновесного протекания физико-химических процессов за фронтом ударной волны для валидации использовались экспериментальные данные, полученные в ударных трубах. Проведенные численные расчеты хорошо согласуются с экспериментальными данными.
5. Сравнение результатов численных расчетов лучистого теплообмена СА и интенсивности излучения за сильными ударными волнами

с результатами, полученными другими авторами, показали их удовлетворительное согласие.

6. Проведенные исследования показали:

- а) для СА больших размеров (американский Орион или перспективный российский Федерация) в области максимального лучистого нагрева применима модель равновесного излучения. Достаточную точность расчета интенсивности излучения ударного слоя таких СА, входящих в атмосферу со 2-й космической скоростью, дает аппроксимационная групповая модель;
- б) важным преимуществом разработанной модели, основанной на рассмотрении поуровневой кинетики возбуждения электронных состояний атомов, является совместное рассмотрение процессов возбуждения, ионизации и излучения. При этом задание констант скоростей ионизации электронным ударом для каждого отдельного возбужденного уровня атомов более детально моделирует механизм ионизации в сильнонагретом атомарном газе по сравнению с заданием единственной константы скорости ступенчатой ионизации атомарного газа;
- в) разработанная модель и программный код в данной работе затрачивают значительные вычислительные мощности. Необходимы упрощения модели, в том числе: сокращения количества возбужденных состояний (группировка их в некоторые эффективные состояния), сокращения количества излучательных линий до наиболее значимых, а также сокращения точек для спектральной сетки. Дальнейшее развитие модели позволит использовать радиационно-столкновительную модель в задачах двух- и трехмерного обтекания аппаратов, входящих в атмосферу Земли со второй космической скоростью;
- г) расчеты течения воздуха за сильными ударными волнами показывают, что в ударных трубах разных диаметров при одинаковых условиях проведения экспериментов (V и p) могут быть получены различные результаты по концентрации электронов и интенсивности излучения. Это связано с различной оптической толщиной пробки нагретого газа в УТ различного диаметра и различными потерями энергии газа за счет радиационного охлаждения.

Публикации по теме диссертационной работы
Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. *Прутько, К. А.* Влияние излучения атомов на лучистый теплообмен аппаратов при входе их в атмосферу со второй космической скоростью / К. А. Прутько, В. И. Власов, Г. Н. Залогин, Д. А. Чураков // Космонавтика и ракетостроение. — 2013. — 1 (70). — С. 29–36.
2. *Прутько, К. А.* Моделирование излучения высокотемпературного воздуха при входе спускаемых аппаратов со второй космической скоростью / К. А. Прутько // Труды Московского Физико-Технического Института. — 2014. — Т. 6, 2 (22). — С. 75–79.
3. *Прутько, К. А.* Возбуждение электронных состояний и ионизация атомов за сильными ударными волнами в воздухе / К. А. Прутько, В. И. Власов, Г. Н. Залогин // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. — 2014. — Т. 15, № 4. — <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-4/articles/236/>.
4. *Прутько, К. А.* Влияние неравновесного заселения электронных состояний на радиационный поток высокотемпературного воздуха при сверхорбитальных скоростях СА / Прутько, К. А. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. — 2015. — Т. 16, № 3. — <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-3/articles/540/>.
5. *Прутько, К. А.* Излучение высокотемпературного воздуха с неравновесным заселением электронных состояний при больших скоростях полета спускаемых аппаратов / К. А. Прутько // Космонавтика и ракетостроение. — 2016. — 3 (88). — С. 115–121.
6. *Прутько, К. А.* Излучение газа за сильными ударными волнами с учетом неравновесных процессов ионизации / Прутько, К. А. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. — 2016. — Т. 17, № 3. — <http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-3/articles/659/>.
7. *Прутько, К. А.* Влияние констант скоростей ионизации атомов электронным ударом на структуру релаксационной зоны за ударной волной / Прутько, К. А. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. — 2017. — Т. 18, № 2. — <http://chemphys.edu.ru/issues/2017-18-2/articles/715/>.

Статьи в научных журналах, сборниках научных трудов и конференций:

8. *Прутько, К. А.* Вклад излучения атомов в радиационный теплообмен спускаемых аппаратов / К. А. Прутько // Сборник тезисов докладов «Инновации в авиации и космонавтике – 2012». — 2012. — С. 250–251.
9. *Прутько, К. А.* Моделирование излучения высокотемпературного воздуха при входе спускаемых аппаратов со второй космической скоростью / К. А. Прутько // Труды 55-й научной конференции МФТИ. Т. 1. — 2012. — С. 62–63.
10. *Прутько, К. А.* Радиационная модель воздуха в условиях полной диссоциации молекул / К. А. Прутько // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2013». — 2013.
11. *Прутько, К. А.* Лучисто-конвективный теплообмен при входе ВА со второй космической скоростью / К. А. Прутько, В. И. Власов, Р. В. Ковалев, Д. А. Чураков, Г. Н. Залогин // Тезисы доклада на видео семинар по аэромеханике ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбГТУ – НИИМ МГУ. — 2014. — <http://www.tsagi.ru/pressroom/events/seminars/videoseminar-aeromekh/27.05.2014/>.
12. *Прутько, К. А.* Радиационно-столкновительная модель для расчёта неравновесного излучения высокотемпературного воздуха / К. А. Прутько // Тезисы докладов научно-практической конференции «Космонавтика и ракетостроение: взгляд в будущее». — 2016. — С. 80–81.
13. *Прутько, К. А.* Неравновесное излучение воздуха за сильными ударными волнами / К. А. Прутько // Тезисы доклада на видео семинар по аэромеханике ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбГТУ – НИИМ МГУ. — 2017. — <http://www.tsagi.ru/pressroom/events/seminars/videoseminar-aeromekh/16.05.2017/>.
14. *Прутько, К. А.* Решение задачи о структуре релаксационной зоны за сильной ударной волной с учетом излучения / К. А. Прутько // Тезисы докладов XXI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. Т. 2. — 2017. — С. 286–287.
15. *Прутько, К. А.* Структура неравновесной релаксационной зоны за сильной ударной волной в воздухе с учетом излучения / К. А. Прутько // Тезисы докладов международной конференции «50 лет развития сеточно-характеристического метода». — 2018. — <http://gsm50.vdi.mipt.ru/talks.html>.

Прутъко Кирилл Александрович

Неравновесное излучение воздуха при больших скоростях полёта спускаемых аппаратов

Автореферат

Подписано в печать		Формат 60×84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л.	Усл. печ. л. 1
Тираж 100 экз.	Заказ №	Бесплатно
