

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 15.05.2019 г., протокол № 8

О присуждении Прутько Кириллу Александровичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Неравновесное излучение воздуха при больших скоростях полета спускаемых аппаратов» в виде рукописи по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 04.03. 2019 г., протокол № 4, диссертационным советом Д 002.110.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, jiht.ru, (495) 485-8345), утвержденным Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 15.02.2013 г. № 75/нк.

Соискатель Прутько Кирилл Александрович 1989 года рождения, в 2012 году окончил Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер. 9).

В 2016 году окончил очную аспирантуру Центрального научно-исследовательского института машиностроения (141070, Московская область, г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4).

Диссертация выполнена в Центре Теплообмена и аэрогазодинамики Федерального государственного унитарного предприятия «Центрального научно-исследовательского института машиностроения».

Работает инженером 1-й категории Центра Теплообмена и аэрогазодинамики Федерального государственного унитарного предприятия «Центрального научно-исследовательского института машиностроения».

Научный руководитель – доктор технических наук, старший научный сотрудник Залогин Георгий Николаевич, главный научный сотрудник Центра Теплообмена и аэрогазодинамики Федерального государственного унитарного предприятия «Центрального научно-исследовательского института машиностроения».

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, доцент Кузнецов Михаил Михайлович, профессор кафедры теоретической физики Московского государственного областного университета;

- доктор физико-математических наук, профессор Уваров Александр Викторович, профессор кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского (140180 Россия г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского 1), в своем положительном заключении, составленном главным научным сотрудником, доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН Егоровым И.В. и ведущим научным сотрудником, кандидатом физико-математических наук

Киреевым А.Ю. (утвержденном Первым заместителем Генерального директора д.ф.-м.н., профессором РАН Медведским А.Л.), указала что:

1. 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.

2. 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.

Соискатель имеет 7 статей в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, 8 тезисов в сборниках трудов конференций:

Основные работы:

1. Прутько К.А., Власов В.И., Залогин Г.Н., Чураков Д.А. Влияние излучения атомов на лучистый теплообмен аппаратов при входе их в атмосферу со второй космической скоростью // 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 // Труды Московского Физико-Технического Института. — 2014. — Т. 6, 2 (22). — С. 75—79.

3. Прутько К.А., Власов В.И., Залогин Г.Н. Возбуждение электронных состояний и ионизация атомов за сильными ударными волнами в воздухе //

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 // 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 // Космонавтика и ракетостроение. — 2016. — 3 (88). — С. 115—121.

6. Прутько К.А. Излучение газа за сильными ударными волнами с учетом неравновесных процессов ионизации // 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 // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. — 2017. — Т. 18, № 2. — <http://chemphys.edu.ru/issues/2017-18-2/articles/715/>.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Исследовательский центр имени М.В. Келдыша (г.н.с., д.т.н. И.И. Юрченко, с.н.с., к.т.н. Н.Н. Ушаков) – отзыв положительный, с замечаниями:

- в автореферате не представлены характерные времена диссоциации/рекомбинации основных составляющих воздуха, хотя уделено несколько слов диссоциации молекулы азота и ее влиянию на поступательную и электронную температуру;

- недостаточно четко изложены основные предположения газодинамической модели, их правомерность использования для данного класса задач и

возможное влияние их на точность расчетов для разных (больших и малых) спускаемых аппаратов, например, использование предположений о невязком, нетеплопроводном газе, одномерной постановке;

- имеет место неточность некоторых формулировок, например, при разделении спектрального диапазона на УФ-диапазон < 200 нм и ИК-диапазон > 200 нм без упоминания видимого диапазона спектра;

- в уравнении для полной энергии имеет место неточность при пояснении величины h , как полной удельной энтальпии вместо удельной энтальпии.

2. Санкт-Петербургский государственный университет (профессор, зав. кафедрой гидроаэромеханики, д.ф.-м.н. Е.В. Кустова, с.н.с., к.ф.-м.н. В.А. Истомина) – отзыв положительный, с замечаниями:

- из текста автореферата неясно, учитываются ли внутренние степени свободы молекул. Если учитываются, как тогда моделируется колебательная и колебательно-электронная кинетика? Если нет, то необходимо привести обоснование;

- есть некоторые вопросы по формулировке математической модели (1) - (4). Следовало бы пояснить, почему уравнения кинетики записываются для производных по времени, а уравнение энергии – для производной по x . В уравнении для полной энергии (3) отсутствует поток излучения. Или он «спрятан» в правой части? Если нет, то задача не полностью самосогласована, т.е. влияние излучения на газодинамику не учитывается. Хорошо бы прокомментировать этот момент;

- есть недочеты редакционного характера, например, в тексте часто не уточняется, о нейтральных или ионизованных атомах идет речь.

3. Московский физико-математический институт (профессор, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией импульсных плазменных систем Н.Л. Александров) – отзыв положительный, с замечаниями:

- при вычислении плотности заряженных частиц учитывается тройная электрон-ионная рекомбинация. В этом процессе энергия, выделяемая при

рекомбинации, в значительной степени передается электронам, что приводит к их нагреву. Данный эффект не учитывался автором в уравнении для энергии электронов (уравнение (3) в автореферате). Имеет смысл оценить значимость этого эффекта в рассматриваемых условиях;

- константы скорости диссоциативной рекомбинации электронов с молекулярными ионами и обратного процесса при расчетах были взяты из кинетической схемы Парка. В литературе имеются и другие наборы этих констант, которые существенно (до порядка величины) отличаются от указанных выше. Поэтому было бы интересно изучить вопрос о том, насколько результаты расчета чувствительны к вариации этих данных.

4. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» (г.н.с., д.ф.-м.н. А.К. Алексеев, ведущий инженер-математик М.П. Шувалов) – отзыв положительный, с замечанием:

- из текста автореферата не ясно, чему соответствуют кривые Рис. 6, обозначенные как "Больцман".

5. Научно-исследовательский институт механики МГУ (Заведующий Лабораторией кинетических процессов, к.т.н. В.Ю. Левашов) – отзыв положительный, с замечаниями:

- в разделе "Научная новизна" отмечается, что "Впервые разработан и внедрен итерационный алгоритм решения жесткой системы нелинейных дифференциальных уравнений". В то же время, как следует из описания главы 3 (стр. 14 текста автореферата), для решения системы жестких дифференциальных уравнений использовался стандартный код LSODE. Из текста автореферата неясно, в чем состоит новизна предлагаемого автором работы алгоритма;

- из текста затруднительно понять, что такое аппроксимационная групповая модель, используемая при расчете интенсивности излучения ударного слоя;

- требуется более детальное пояснение положения о том, что интенсивность излучения атомарных компонентов равновесного воздуха при высоких

температурах обусловлена (в том числе) процессами торможения электронов в поле ионов;

- в некоторых местах автореферата наблюдается небольшая несогласованность в тексте. Так, например, в разделе "Достоверность полученных результатов" отмечается, что достоверность обеспечивается выбранными реакциями и их константами скоростей. В то же время в разделе "Основные положения, выносимые на защиту" говорится, что при отсутствии равновесия за ударной волной константа скорости ступенчатой ионизации атомов определяется в процессе решения задачи. Таким образом, константа скорости в данном случае является параметром задачи;

- на стр. 15-16 автореферата отмечается: "разброс в расчете интенсивности излучения составляет $\pm 50\%$ ". Данный факт автор работы связывает с использованием в расчетах упрощенной модели диссоциации. Было бы полезным прокомментировать данную упрощенную модель, а также привести ссылки на литературу с описанием данной модели;

- не вполне понятно, каким образом одномерная расчетная модель, предложенная в работе, использовалась для анализа трехмерных летных экспериментов американского спускаемого аппарата Аполлон-4 и летного демонстратора FIRE-II;

- в работе обнаружены опечатки.

Выбор оппонентов обосновывается тем, что:

- д.ф.-м.н., профессор Кузнецов М.М. является признанным специалистом в области кинетической теории неравновесных процессов, прекрасно знаком с проблематикой исследуемого вопроса, является автором более 30 научных публикаций, близких к тематике диссертации.

1. Кузнецов М.М., Кулешова Ю.Д., Смотрова Л.В., Решетникова Ю.Г. «О максимуме эффекта высокоскоростной поступательной неравновесности в ударной волне» // Вестник МГОУ. Сер. «Физика-математика», 2016. №3. С. 84-95.

2. Кузнецов М.М., Кулешова Ю.Д., Решетникова Ю.Г., Смотров Л.В. «Условия возникновения и величина эффекта высокоскоростного перехлёста в ударно-сжатой смеси газов» // Труды МАИ №95 2017 г. "Механика жидкости и газа".

3. Kuznetsov M.M., Kuleshova Yu.D., Reshetnikova Yu.G. and Smotrova L.V. «Analytical properties of nonequilibrium threshold in shock waves» // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 996 (2018) 012006 doi: 10.1088/1742-6596/996/1/012006.

- д.ф.-м.н. Уваров А.В. является ведущим специалистом в области исследования релаксационных процессов и неравновесных течений газов, является руководителем семинара «Физико-химическая кинетика в газовой динамике» НИИ Механики МГУ, автор более 50 научных публикаций и учебно-методических работ, по теме диссертации..

1. Уваров А.В., Винниченко Н.А., Плаксина Ю.Ю., Пуштаев А.В. Horizontal convection driven by nonuniform radiative heating in liquids with different surface behavior // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 1 26. P. 400 - 410.

2. Уваров А.В., Винниченко Н.А., Плаксина Ю.Ю., Пуштаев А.В. Влияние малых примесей на формирование структур при конвекции Рэлея-Бенара-Марангони в плоском слое жидкости» // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2018. №5. С. 56 – 62.

3. Уваров А.В., Винниченко Н.А., Плаксина Ю.Ю., Якимчук О.С. «Air flow temperature measurements using infrared thermography» // Quantitative InfraRed Thermography Journal. 2017. Vol. 14. No. 1. P. 107-121.

Выбор Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского в качестве ведущей организации обусловлен тем, что ЦАГИ является крупнейшим в мире центром авиационной науки, в котором проводятся фундаментальные и прикладные теоретические

и экспериментальные исследования в области авиационной, ракетной и космической техники.

1. В.А. Горелов, А.Ю. Киреев. Особенности моделирования неравновесного излучения ударной волны в воздухе в области вакуумного ультрафиолета // ПМТФ. 2016. Т. 7. № 1. С. 176 - 186.
2. V.A. Gorelov, A.Yu. Kireev. Specific Feature of Modeling of Nonequilibrium Radiation Behind the Shock Wave in Air in the Vacuum Ultraviolet Spectral Range // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2016. Vol. 58, No. 4. P. 136-145,
3. Боровой В.Я., Егоров И.В., Мошаров В.Е., Скуратов А.С., Радченко В.Н. Экстремальный нагрев тел в гиперзвуковом потоке. Газодинамические явления и их характеристики. – М.: Наука, 2018. – 390 с. –ISBN 978-5-02-040074-0.

Диссертационный совет отмечает, что **на основании выполненных соискателем исследований:**

- 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);
- 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;
- 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;

- проведена валидация разработанной модели для условий равновесного протекания физико-химических процессов путем сравнения расчетных величин лучистых тепловых потоков с данными летных экспериментов американского спускаемого аппарата Аполлон-4 и летного демонстратора FIRE-II, а также с экспериментальными данными, полученными в ударных трубах;

- сравнение результатов численных расчетов лучистого теплообмена СА и интенсивности излучения за сильными ударными волнами с результатами, полученными другими авторами, показали их удовлетворительное согласие.

- 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 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 сильно нагретом атомарном газе по сравнению с заданием единственной константы скорости ступенчатой ионизации атомарного газа;

в) расчеты течения воздуха за сильными ударными волнами показывают, что в ударных трубах разных диаметров при одинаковых условиях проведения экспериментов могут быть получены различные результаты по концентрации электронов и интенсивности излучения. Это связано с различной оптической

толщиной пробки на гретого газа в УТ различного диаметра и различными потерями энергии газа за счет радиационного охлаждения.

Теоретическая значимость исследования.

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 расчетных значений лучистых потоков к спускаемому аппарату Аполлон-4 и летному демонстратору FIRE-II с данными летных измерений.

2. Разработанная поуровневая радиационно-столкновительная модель 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, не требует задания констант скоростей ионизации атомов, которые имеют очень большой разброс.

3. Учёт радиационного охлаждения газа в зоне релаксации позволил объяснить наблюдаемые различия параметров (интенсивности излучения, концентрации электронов) в ударных трубах различного диаметра.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что:

- построенная детальная поуровневая 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, может использоваться 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 диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования 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.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что 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.

Личный вклад соискателя состоит в разработке поуровневой радиационно-столкновительной модели высокотемпературного полностью диссоциированного воздуха, а также алгоритма расчета течений и их программной реализации, в проведении расчетов и валидации результатов по экспериментальным данным. Апробация результатов исследования проводилась на 13 российских и международных конференциях, в которых

соискатель принимал личное участие. Основные публикации по результатам работы также подготовлены лично автором.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствует критериям пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании от 15.05.2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Прутько К.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 12 докторов наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы и 5 докторов наук по специальности 05.14.01 – энергетические системы и комплексы, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 16, против 0, недействительных бюллетеней 1.

Председатель диссертационного совета Д 002.110.03
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор

Вараксин А.Ю.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.03

Д.Т.Н.



Директор Л.Б.

15.05.2019 г.