

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**СТЕНОГРАММА**

заседания диссертационного совета 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)  
от 15 мая 2019 г. (протокол № 8)

**Защита диссертации Прутько Кирилла Александровича  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
«Неравновесное излучение воздуха при больших скоростях полета  
спускаемых аппаратов»**

Специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 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)  
Протокол № 8 от 15 мая 2019 г.

Диссертационный совет Д 002.110.03 утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 15.02.2013 г. № 75/нк в составе 25 человек. На заседании присутствуют 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. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

**Председатель** – председатель диссертационного совета Д 002.110.03

д.ф.-м.н., профессор, член-корреспондент РАН Вараксин А.Ю.

**Ученый секретарь** – ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.03

д.т.н. Директор Л.Б.

|    |                   |                                     |          |              |
|----|-------------------|-------------------------------------|----------|--------------|
| 1  | Вараксин А.Ю.     | Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор | 01.02.05 | Присутствует |
| 2  | Батенин В.М.      | Чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор    | 05.14.01 | Отсутствует  |
| 3  | Директор Л.Б.     | д.т.н.                              | 05.14.01 | Присутствует |
| 4  | Алхасов А.Б.      | д.т.н., профессор                   | 05.14.01 | Отсутствует  |
| 5  | Аминов Р.З.       | д.т.н., профессор                   | 05.14.01 | Отсутствует  |
| 6  | Баженова Т.В.     | д.ф.-м.н., профессор                | 01.02.05 | Присутствует |
| 7  | Битюрин В.А.      | д.ф.-м.н., с.н.с.                   | 01.02.05 | Отсутствует  |
| 8  | Воробьев В.С.     | д.ф.-м.н., профессор                | 01.02.05 | Присутствует |
| 9  | Зайченко В.М.     | д.т.н., с.н.с.                      | 05.14.01 | Присутствует |
| 10 | Зейгарник В.А.    | д.т.н., с.н.с.                      | 05.14.01 | Присутствует |
| 11 | Климов А.И.       | д.ф.-м.н., с.н.с.                   | 01.02.05 | Присутствует |
| 12 | Кобзев Г.А.       | д.ф.-м.н., профессор                | 01.02.05 | Присутствует |
| 13 | Красильников А.В. | д.т.н., с.н.с.                      | 01.02.05 | Присутствует |
| 14 | Леонов С.Б.       | д.ф.-м.н.                           | 01.02.05 | Отсутствует  |
| 15 | Масленников В.М.  | д.т.н., профессор                   | 05.14.01 | Отсутствует  |
| 16 | Медин С.А.        | д.т.н., профессор                   | 01.02.05 | Присутствует |
| 17 | Недоспасов А.В.   | д.ф.-м.н., профессор                | 01.02.05 | Отсутствует  |
| 18 | Поляков А.Ф.      | д.т.н., с.н.с.                      | 01.02.05 | Присутствует |
| 19 | Попель О.С.       | д.т.н., доцент                      | 05.14.01 | Присутствует |
| 20 | Пятницкий Л.Н.    | д.ф.-м.н., профессор                | 01.02.05 | Присутствует |
| 21 | Седлов А.С.       | д.т.н., профессор                   | 05.14.01 | Отсутствует  |
| 22 | Синкевич О.А.     | д.ф.-м.н., профессор                | 01.02.05 | Присутствует |
| 23 | Томаров Г.В.      | д.т.н., профессор                   | 05.14.01 | Присутствует |
| 24 | Чиннов В.Ф.       | д.ф.-м.н., с.н.с.                   | 01.02.05 | Присутствует |
| 25 | Шугаев Ф.В.       | д.ф.-м.н., доцент                   | 01.02.05 | Присутствует |

## ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации инженера 1-й категории Центра Теплообмена и аэрогазодинамики Федерального государственного унитарного предприятия «Центрального научно-исследовательского института машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш) **Прутько Кирилла Александровича** на тему «Неравновесное излучение воздуха при больших скоростях полета спускаемых аппаратов». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы. Диссертация выполнена в Центре Теплообмена и аэрогазодинамики ФГУП ЦНИИмаш (141070, Московская область, г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4, tsniimash.ru).

### **Научный руководитель:**

**Залогин Георгий Николаевич** – д.т.н., с.н.с., главный научный сотрудник Центра Теплообмена и аэрогазодинамики Федерального государственного унитарного предприятия «Центрального научно-исследовательского института машиностроения», Московская область, г. Королёв.

### **Официальные оппоненты:**

**Кузнецов Михаил Михайлович** - гражданин РФ, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры теоретической физики Государственного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного областного университета (МГОУ; Россия, 141014, Московская обл., г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24).

**Уваров Александр Викторович** – гражданин РФ, д.ф.-м.н., профессор кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ им. М.В. Ломоносова; Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1).

### **Ведущая организация:**

**Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»** (ФГУП ЦАГИ; 140180, Россия, Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского 1).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., доцент Кузнецов М.М. и д.ф.-м.н., профессор Уваров А.В., научный руководитель Прутько К.А. д.т.н. Залогин Г.Н.

## СТЕНОГРАММА

### Председатель

Сегодня на повестке дня защита диссертации Прутько Кирилла Александровича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по теме «Неравновесное излучение воздуха при больших скоростях полёта спускаемых аппаратов», по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы. Я должен предоставить слово ученому секретарю Леониду Бенциановичу для того, чтобы он доложил содержание всех необходимых для проведения сегодняшней защиты документов.

### Ученый секретарь

*(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).*

### Председатель

Спасибо Леонид Бенцианович. Тогда, Кирилл Александрович, вам предоставляется слово для изложения основных положений диссертации, в 20 минут просьба уложиться. Пожалуйста.

### Прутько К.А.

*Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Прутько К.А. прилагается).*

### Председатель

Спасибо, Кирилл Александрович. Уложились в отведенное время. Пожалуйста, есть возможность задать вопросы к соискателю. Олег Сергеевич.

### Попель О.С.

Можно вопрос, скажите пожалуйста, вы так монотонно всё рассказали о проведенной работе, но как-то не выделили того самого главного, что вам удалось сделать впервые, что нового. Какое принципиальное отличие от того, чем другие авторы занимались? Можете как-то концентрированного сказать, в чем новизна, какая фишка вашей диссертационной работы?

### Прутько К.А.

Главный результат заключается в том, что была применена довольно-таки полная модель по возбужденным состоянием атомов и было рассчитано много линейчатых переходов, излучение учитывалось довольно подробно.

### Попель О.С.

Ну раньше этого никто не учитывал?

### Прутько К.А.

Учитывалось.

### Кобзев Г.А.

В 1966-м году.

### Попель О.С.

Каком?

**Кобзев Г.А.**

66-м.

**Прутько К.А.**

Поскольку данный на момент расчётная мощность компьютеров позволяет более подробно описывать данные процессы для излучения и поглощения, то излучение рассчитывалась с помощью спектральных коэффициентов, учитывая профиль излучений.

**Председатель**

Так, спасибо, ещё вопрос. Да, Федор Васильевич.

**Шугаев Ф.В.**

Скажите пожалуйста, газ предполагался невязким, так?

**Прутько К.А.**

Да невязким.

**Шугаев Ф.В.**

И влиянием пограничного слоя вы пренебрегаете?

**Прутько К.А.**

Да.

**Председатель**

Спасибо. Владимир Сергеевич, пожалуйста.

**Воробьев В.С.**

Какой диапазон температур и давлений у вас рассматривается?

**Прутько К.А.**

Давления от 0.1 торр перед ударной волной, соответственно, от  $10^{-4}$  атмосфер и выше.

**Кобзев Г.А.**

И выше - до каких давлений в атмосферах, например? 10 атмосфер, 100?

**Прутько К.А.**

Поскольку при входе в атмосферу Земли в верхних слоях получается от  $10^{-4}$  атмосферы и до  $10^{-2}$  атмосферы.

**Кобзев Г.А.**

Ну как же так, у вас в таблице приведено здесь для 10 атмосфер, и картинка у Вас для 1 атмосферы.

**Прутько К.А.**

Я имел в виду перед ударной волной.

**Кобзев Г.А.**

Нет, нет, не в 4-й главе, а во всей предыдущей диссертации. Когда речь идёт не о процессах за ударной волной, а когда речь идёт о равновесном излучении и создании равновесной модели, приводятся данные для больших давлений.

**Прутько К.А.**

По крайней мере до 10 атмосфер.

**Воробьев В.С.**

По температурам?

**Прутько К.А.**

10000 Кельвинов и до 14.

**Кобзев Г.А.**

Здесь было сказано чуть более точно.

**Воробьев В.С.**

Мой вопрос сводится к тому, что в ранних работах учитывались молекулярные полосы излучения. А вы почему-то их, хотя более современный подход, вы решили ими пренебречь. Они с 8000 начинают давать существенный вклад. Ниже.

**Прутько К.А.**

Поскольку диссоциация при данных условиях довольно быстро протекает, и излучение в молекулярных полосах сравнительно небольшое, то было решено не учитывать.

**Воробьев В.С.**

Но были же работы, где показано, что дает заметный вклад. Мнацаканян занимался в свое время.

**Прутько К.А.**

По крайней мере, для рассмотренных аппаратов.

**Воробьев В.С.**

Вслед за этим, почему нет сравнения с данными в чёрной книжке «Оптические свойства горячего воздуха». Там подробнейшая таблица, эта книга вышла в 70-м году.

**Председатель**

Ещё вопросы? Валерий Федорович, пожалуйста, слово.

**Чиннов В.Ф.**

Спектры излучения плазмы, которые вы исследуете, важнейшую роль играют переходы, лежащие в вакуумной ультрафиолетовой области спектра. Большое количество сильных линий - оптически не тонкие. Подробнее расскажите, как вы учитывали перенос излучения и учёт поглощения оптически толстых линий.

**Прутько К.А.**

Для каждой линии строился свой профиль и выбиралось определенное количество точек для спектральной сетки. При этом при оптически непрозрачных газах, поскольку линии очень уширены, они могут накладываться друг на друга и, соответственно, складывались коэффициенты поглощения и коэффициенты излучения, и уже из данных коэффициентов рассчитывалась интенсивность излучения, выходящая из ударного слоя. Производился расчет переноса излучения интегрируя вдоль луча или в приближении плоского слоя.

**Чиннов В.Ф.**

Перенос излучение в приближении плоского слоя был бы ошибочным, линии реабсорбированы и перенос осуществляется в крыльях.

**Прутько К.А.**

Крылья учитываются. Выбиралась необходимая ширина крыла, чтобы погрешность была небольшая - около 5% для излучения от линии.

**Председатель**

Спасибо, Валерий Федорович. Пожалуйста, Георгий Анатольевич.

**Кобзев Г.А.**

Мне неудобно задавать вопрос, так как читал диссертацию и беседовал с диссертантом, поэтому на большинство из них знаю ответы диссертанта. Но тем не менее, некоторые вопросы совершенно частные. Вы учитывали большое количество спектральных линий, которые содержатся в таблицах Уиза, таблицах NIST. И вопрос такой: другие авторы, которые ранее считали эту же задачу, помимо этих сильных спектральных линий учитывали ещё и, так называемые, спектральные серии. То есть верхние уровни, сходящиеся к порогу фотоионизации, верхние члены спектральных линий. Вы это учитывали?

**Прутько К.А.**

Нет, это я не учитывал.

**Кобзев Г.А.**

Почему?

**Прутько К.А.**

В проведённых расчетах, зная заселенность возбужденных состояний я варьировал количество учитываемых линий.

**Кобзев Г.А.**

У вас получается следующее: 1-я, 2-я, 3-я линия, потом дырка, потом порог фотоионизации. То есть некоторый интервал энергии, в нем нет линий. Это же не так.

**Прутько К.А.**

Это не так в общем случае. Но поскольку, когда я, не учитывая переходы с верхних состояний, проводил расчеты по переносу излучения, я получал небольшую погрешность в оценке лучистого потока.

**Кобзев Г.А.**

А можно понять какие погрешности вы получали и какие погрешности вами были заданы в качестве приемлемых?

**Прутько К.А.**

Когда в итоге я учитывал все линии, которые у меня были перечислены с тем, когда я сокращал количество переходов, убирал переходы с верхних состояний, у меня получалось, примерно, на 10% ниже.

**Кобзев Г.А.**

Что вы называете верхними состояниями? Те, которые есть в таблице NIST? Или те, которых нет в таблице?

**Прутько К.А.**

Которые есть.

**Кобзев Г.А.**

Которые есть в таблице, там далеко не все состояния, которое примыкают к порогу фотоионизации. Почему я об этом спрашиваю, потому что цитируемый здесь автор Кристофер Джонстон из НАСА, очень популярный автор сейчас, по поводу каждого пренебрежения чем-либо делает оценки, и приводит в статьях, какой могло бы внести это вклад в поток лучистой энергии и какую, следовательно, погрешность мы вносим. Я хотел и от автора сегодня это услышать такой ответ, но пока его нет.

**Председатель**

Пожалуйста.

**Томаров Г.В.**

В основном у вас работа кинетического характера, но был и эксперимент, да? Вы как-то его затенили. А какой значимость вашего эксперимента?

**Прутько К.А.**

Нет, моего эксперимента нет. Я оговорился, когда я сказал мой – имел в виду на моем слайде. Моего эксперимента нет.

**Томаров Г.В.**

Снимаю вопрос.

**Из зала:**

Эксперимент Горелова в ЦАГИ?

**Прутько К.А.**

Да.

**Томаров Г.В.**

Ну хорошо, а его значимость какая?

**Прутько К.А.**

В оптически прозрачной плазме может получиться случай, когда происходит сильное радиационное охлаждение, и параметры газа могут быть совершенно другие, нежели рассчитанные при равновесном состоянии, и, соответственно, также тепловые потоки к аппарату или в ударной трубе могут получиться совершенно другими по сравнению с равновесной моделью.

**Председатель**

Георгий Анатольевич, Вам слово.

**Кобзев Г.А.**

В изучаемом вами диапазоне давлений и температур в воздухе присутствуют процессы взаимодействия электрон-нейтралов, если взять фотопроцессы, то это рассеивание электрона на атоме, плюс рекомбинация с образованием отрицательных ионов. Про отрицательный ион кислорода, известно, что он стабильный, большой, и все его характеристики известны. По поводу отрицательного иона азота, есть какая-то дискуссия, но тем не менее его вклад в экспериментах зафиксирован, до последнего времени считался значительным. По каким-то причинам в работе я не увидел учета каких-либо процессов, связанных с электрон-нейтралом и с отрицательными ионами ни в равновесной главе, ни в кинетике. В кинетике все процессы, связанные с отрицательным ионом почему-то выброшены. Почему?

### **Прутько К.А.**

В рассматриваемых условиях входа аппарата, например, в модели Пака или модели Кана и Дана, данного процесса получения отрицательного иона нет, и основываясь на опыте ранее проведенных исследований, проведенными другими авторами, полагается, что вклад от этих ионов в излучение несущественен.

### **Кобзев Г.А.**

Но этого нет в диссертации. Вы берете чужую модель и не обосновываете все пренебрежения. Совсем маленький вопрос. Ничего не говорилось об эффектах неидеальности. Весь институт высоких температур с самого дня своего основания болел, так сказать, вопросами неидеальной плазмы, и занимался ею и экспериментально, и теоретически многие годы. Наш научный руководитель является мировым классиком в этой области, Владимир Евгеньевич Фортон. В те времена, когда он ещё не был классиком, мы тоже уже этим занимались и, в том числе, задачами такого рода. Ни слова про эффект неидеальности ни применительно к термодинамике, ни применительно к оптике, ни по составу. Почему?

### **Прутько К.А.**

Неидеальность в рассматриваемых параметрах оценена исходя из уравнения, приведенного в книжке Зельдовича. Она небольшая, её можно не учитывать. Я рассчитывал снижение порога ионизации, он получился несущественным.

### **Кобзев Г.А.**

Но она в экспоненте стоит.

### **Прутько К.А.**

Я полагаю, что она вносит небольшой вклад.

### **Председатель**

У меня такое мнение, что вопросов достаточно было задано. У нас есть ещё выступления оппонентов, которые, я надеюсь, прояснят своей квалификацией ситуацию, которая вызывает опасения. Всегда есть возможность потом вернуться к вопросам, так что я предлагаю пойти дальше по повестке, и предоставляется слово научному руководителю доктору технических наук Залогину Георгию Николаевичу.

### **Залогин Г.Н.**

Я скажу, что Кирилл Александрович работает в ЦНИИмаш начиная с 10-го года, когда он ещё учился на Физтехе и выполнял диплом на соответствующей кафедре Физтеха, на кафедре ЦНИИмаш, которая называлась «Космические летательные аппараты». Как раз в то время 10-12 год, начиналась новая кампания по проектированию полетов к Луне и Марсу, и анализ показал, что расчёты лучистых потоков до сих пор, несмотря на очень большое внимание, которое уделялось с шестидесятых годов, в общем-то, не дают достаточную точность. Поэтому ему была поручена такая задача.

Я считаю, что он, в общем-то, её достаточно хорошо выполнил, что показывает его тестирование его программы, а большое количество всяких процессов, которые одни учитывают, другие не учитывают.

### **Кобзев Г.А.**

Извините пожалуйста, по-моему, руководитель не должен говорить о содержании работы, он должен говорить о личности защищающегося диссертанта.

### Залогин Г.Н.

Во время работы над диссертацией проявил достаточные знания физики и в математических вопросах проявил достаточно хорошую эрудицию.

### Председатель

Спасибо Георгий Николаевич. Есть вопросы может быть, но они не должны касаться существа, как правильно было замечено. Вопросов нет, спасибо. Тогда значит предоставляю слово ученому секретарю для оглашения заключения организации, где выполнялась диссертация, заключение ЦНИИмаш, отзывы ведущей организации, коей являлся ЦАГИ имени Жуковского и других поступивших в совет отзывов на автореферат диссертации.

### Ученый секретарь

**Заключение ЦНИИмаш**, в общем-то, формально стандартное, отмечено личное участие, степень достоверности, научная новизна и практическая значимость. Специальность, которой соответствует диссертация пункта паспорта ВАКовского, который проявляет эту специальность и выводы. Основания для присвоения работе пометки «для служебного пользования» нет, диссертация «Неравновесное излучение воздуха при больших скоростях полета спускаемых аппаратов» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы. Заключение принято на заседание секции НТС ФГУП ЦНИИмаш, протокол №12 от 29 июня 2017 г.

### Из зала

17?

### Ученый секретарь

29 июня 2017 года. Подписано председателем секции доктором технических наук **Землянским**, утверждено исполняющим обязанности генерального директора ЦНИИмаш доктором наук профессором **Хартовым**.

### Ученый секретарь

**Отзыв ведущей организации ЦАГИ**. Также в отзыве отмечена актуальность работы, содержание, введение и вклад диссертации (достаточно подробно), отмечается новизна исследования полученных результатов и значимость результатов для науки и практики. **Замечания** зачитаю полностью. Работа не лишена недостатков.

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

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

- 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.

- 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.

Заключение. Диссертация Прутько Кирилла Александровича является законченной

научно-квалификационной работой, посвященной актуальной теме, и так далее. Результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах. Считаю, что диссертационная работа соответствует критериям пунктов «Положение о присуждении ученых степеней», а её автор Прутько Кирилл Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Подписано главным научным сотрудником, членом-корреспондентом РАН **Егоровым**, ведущим научным сотрудником **Киреевым**, утверждено Первым заместителем генерального директора ЦАГИ профессором **Медведским**.  
Я читаю все замечания?

### Председатель

В отзывах на авторефераты?

### Ученый секретарь

Да.

### Председатель

Все. Там много отзывов?

### Ученый секретарь

Отзывов пять всего.

*(Первый отзыв).* **Исследовательский центр Келдыша.** Отзыв главного научного сотрудника доктора наук **Юрченко** и кандидата наук **Ушакова**. Отзыв положительный. Отзывы я читаю все положительные, поэтому буду читать только замечания.

- 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.

*(Второй отзыв).* Следующий отзыв от **Санкт-Петербургского государственного университета**, подписано профессором, заведующей кафедрой гидроаэромеханики, доктором наук **Кустовой** и старшим научным сотрудником, кандидатом наук **Истоминим**.

- 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. Следовало бы пояснить, почему уравнения кинетики записываются для производных по времени, а уравнение энергии – для производной по  $x$ . В уравнении для полной энергии 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.

**(Третий отзыв).** Отзыв **Физтеха (МФТИ)**, подписан профессором, доктором наук, заведующим лабораторией импульсных плазменных систем **Александровым**.

- при вычислении плотности заряженных частиц учитывается тройная электронная 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.

**(Четвертый отзыв).** Отзыв **Ракетно-космической корпорации «Энергия»**. Подписано главным научным сотрудником, доктором наук **Алексеевым** и ведущим инженером-математиком **Шуваловым**.

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

**(Пятый отзыв).** И последний отзыв **Научно-исследовательского института механики МГУ**. Подписано заведующим лабораторией кинетических процессов **Левашовым**, отзыв положительный.

- 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 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.

Всё.

### **Председатель**

Спасибо, Леонид Бенцианович. Слово предоставляется Кириллу Александровичу для ответов на прозвучавшие замечания в отзыве ведущей организации и во всех отзывах, поступивших на автореферат. Призываю к максимальной лаконичности. Может быть, вопросы надо группировать, может быть, в автореферате эти материалы не были освещены, а в диссертации это было. Поэтому просьба лаконичнее.

### **Прутько К.А.**

Обобщая справедливо высказанные замечания в отзывах на автореферат, хотелось бы отметить, что ограниченный объём не позволил дать полную информацию по рассмотренным исследованиям, приведенным в диссертации.

Все замечания можно разбить на четыре направления: (*первое*) связанные с газодинамическими особенностями постановки задачи и используемыми математическими методами решения; (*второе*) по описанию процесса диссоциации молекул; (*третье*) третье - учет отдельных кинетических и радиационных процессов; (*четвертое*) а также редакционные замечания и связанные с терминологией.

(*Первое*). Целью работы была разработка кинетической модели для описания ионизации и переноса излучения высокотемпературного воздуха. Для этого была выбрана простейшая одномерная газодинамическая модель высокотемпературного воздуха. Это позволило провести расчеты, решая задачу Коши с начальными условиями. Такой подход является общепринятым при анализе экспериментов в ударной трубе. Учёт невязких процессов, которые в общем случае необходимо учитывать, привели бы к усложнению уравнений, а также к решению краевой задачи. Учет изучения проводился итерационным методом. Для расчета переноса излучения применялась модель тонкого плоского слоя к спускаемому аппарату, а также хотелось бы сказать, что поглощение излучения перед фронтом ударной волны не учитывалось.

(*Второе*). По поводу диссоциации. При скоростях ударной волны более 9 км в секунду время диссоциации мало. Изначально предполагалось выполнить работу при предложении их полной диссоциации, но поскольку было выявлено, что для адекватного учёта некоторых процессов нужно добавить диссоциацию, она была добавлена в простой однотемпературной постановке. Колебательная и колебательно-электронная кинетика не моделировалась.

(*Третье*). Также поскольку в данной работе учитываются большое количество процессов, некоторые были исключены из данной модели, поскольку, основываясь на опыте ранее проведенных исследований, и из большого количества данных параметров выбор наилучших является достаточно сложной работой, поскольку это связано с недостаточной изученностью отдельных процессов.

### **Председатель**

Спасибо, Кирилл Александрович. Слово предоставляется официальному оппоненту доктору физико-математических наук Уварову Александру Викторовичу Московского государственного университета имени Ломоносова.

### **Уваров А.В.**

Я должен сказать, что дискуссия прошла примерно так, как я ее и представлял себе. Думаю, что более или менее готов к призыву председателя прояснить, добавить и так далее.

Сначала об актуальности темы и диссертации. Здесь сложный вопрос потому, что с одной стороны это в 60-70 годы делалось. И безусловно, старшее поколение все это прекрасно знает и помнит. FIRE-II - это 60-е годы. И причем можно было сделать бериллиевые щиты, сейчас бы никто не дал бы делать. Все это было проведено. Но с

другой стороны, все мы смотрим телевизор нам показывают новые разработки, что нужно заниматься и входом в атмосферу, и различные другие режимы летательных аппаратов. И это требует от тех организаций, которые этим занимаются, соответствующих расчётов. Поэтому вот сейчас этим надо заниматься.

И вот тут возникал вопрос: а какая тут изюминка? А вот такая изюминка - что надо все собрать, что было, и что-то такое работоспособное сейчас предложить. Ну и кинули на это дело молодёжь. Количество процессов, которые тут каждый что-то отмечал и в отзывах на автореферат, и в ЦАГИ, и здесь в процессе дискуссии, молекулы как в процессе развала, что они успевают сделать, линии и так далее. Это очень широкая тема, у нас сильными ударными волнами непосредственно в нашей группе занимался Анатолий Петрович Рязин, неустойчивость и все такое. В Институте механики сейчас главный Павел Владимирович Козлов. Когда они переходят к более высоким скоростям, то сразу возникают все эти вопросы во всей своей красоте.

Поэтому всё-таки не надо забывать, что перед нами кандидатская диссертация. И ответы Кирилла Александровича показывают его квалификацию, не надо об этом забывать. Не всё учёл, возможно. Я могу сравнивать с той диссертацией, которую защищал 2 месяца назад в Институте проблем механики, Кадочников Илья, он из другой, не удержусь от гоночно-лошадного термина, конюшни Старика Александра Михайловича. И по многим параметрам эта диссертация лучше потому, что она всё время привязывается к эксперименту. Понятно, что человек работал в организации, которая занималась решением практических вопросов. Что-то он учел, что-то, конечно, не учел. Но он к этому привязывался, это делал. Что-то ему может не хватило.

Потом, все же как формулируют свои замечания, вот я сейчас почитал. Вот Пак сделал хорошо, но вот есть и другие работы, в которых тоже надо бы учесть, опять нам пересчитать ему и так, и так, и так. За 3 года аспирантуры ему надо всё это пересчитать и так далее. Я, признавая то, что эти вопросы возникают, я всё-таки не совсем согласен с тем, что на кандидатской диссертации надо так вот. Хотя может быть и надо, но не надо делать соответствующих выводов. Потому, что это молодёжь, измеряется она единицами. Сейчас у нас в Московском государственном университете всё гораздо хуже. Он всё-таки в каких-то вопросах разобрался, но ему пришлось решать очень глобальный вопрос переноса всех тех познаний, которые были получены до того на современность, когда все эти задачи возникла необходимость решать.

Председатель призвал внести ясность в позицию оппонентов по излагаемой проблеме, поэтому я её вношу.

Что касается содержания работы, оно вполне понятно, сначала рассматриваются равновесные модели, потом рассматриваются неравновесные модели. Предлагается некоторая своя радиационно-столкновительная модель. У нас так принято в России, что каждая организация разрабатывает свою радиационно-столкновительную модель, тоже с этим ничего не поделаешь. Так у нас эта жизнь устроена в этом вопросе. В четвертой главе решена довольно простая одномерная задача, по ней много было замечаний. Мои замечания по ней тоже, в общем, совпадают во всех своих вопросах с теми, которые были тут высказаны.

Да, ещё какой вопрос. Чем сложнее кинетика, тем должна быть проще газодинамика, и чем сложнее газодинамика, тем проще должна быть кинетика. Поэтому то, что он сделал, это вполне понятно: здесь - я могу применить равновесные модели, здесь - я не могу применить равновесные модели. Это именно то, что сейчас можно делать для таких расчетов. Чем сложнее газодинамический расчет, тем проще мне нужна кинетическая модель. Уровневая кинетика - все хорошо, но констант полно, уравнений полно, что с этим делать, когда мы начинаем что-то рассчитывать? А он эту уровневую модель, ему как-то надо свести к чему-то такому, чтобы можно предложить газодинамикам для расчёта для конкретных вещей. В этом смысле, с моей точки зрения

работа совершенно обоснована, ее постановка обоснована и то, как она построена тоже вполне обоснованно.

Теперь что касается моих **замечаний**.

*(Первое замечание)*. Я ещё раз повторяю, что они все уже на самом деле высказывались. Вопрос с электронными температурами - он не так прост. Это в отзыве ЦАГИ также было отмечено. Действительно, как тут отмечалось, вязкость, теплопроводность для не очень низких давлений может не учитываться в релаксационной зоне за фронтом ударной волны, но не может учитываться во всяких, если погран слои, то конечно все это возникает. Но когда появляются электроны, появляется электронная теплопроводность, тогда этот вопрос становится непростым. И с температурой электронов, и как она перераспределяется, электронно-теплопроводный член играет отдельную роль, его необходимо, конечно, по-хорошему учитывать. Кстати, как ни странно и в той диссертации, не странно, а понятно, в той диссертации, которая была 2 месяца назад это тоже не учитывалось. Там тоже была уровневая кинетика, и этого нет.

*(Второе замечание)*. Ну и второй – это учет излучения. Конечно, он сделан здесь совершенно простейшим способом. Если вспомнить работы в книжке всем известного Зельдовича и Райзера, то там сразу мощные волны, излучение вперед, нагревание. Эти вопросы требуют отдельного рассмотрения, какой прекурсор создается, что там впереди, какие условия пойдут на ударный фронт и так далее. Здесь это не учитывалось. Модель в этом смысле абсолютно простая, упрощенная. Кроме того, когда мы рассматриваем эксперименты в ударных трубах, это сейчас выяснилось и было и у Рязина, и в Институте механики, что излучение, которое там уже достаточно мощное, оно не совсем моделирует ту ситуацию, которая возникает в эксперименте. За ударными трубами другая пробка, другие условия, она по-другому наращивается. Поэтому моделирование этого излучения, которое декларируется в работе, требует учёта условий распространения излучения, граничных условий. Поэтому здесь чрезмерно упрощена четвёртая глава если её приводить к таким стандартным задачам.

С моей точки зрения отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы. Как в общем это было во всех отзывах, несмотря на все замечания, которые были сделаны.

Считаю, что диссертационная работа «Неравновесное излучение воздуха при больших скоростях полета спускаемых аппаратов» удовлетворяет всем требованиям положения ВАК о присуждении учёных степеней, ее автор Прутько заслуживает присуждения степени кандидата наук по специальности механика жидкости, газа и плазмы - 01.02.05.

### **Председатель**

Спасибо, Александр Викторович. Есть вопросы? Если вопросов к оппоненту нет, то Георгий Анатольевич, вопрос задайте. Слово предоставляется диссертанту для ответа оппоненту на прозвучавшие замечания.

### **Прутько К.А.**

*(Первое замечание)*. По поводу электронной теплопроводности я соглашусь, что данный вопрос в общем случае учитывать надо. Но в такой постановке, которая была сделана в невязкой задаче, это сделать нельзя, поэтому учесть, соответственно, тоже нельзя было.

*(Второе замечание)*. Насчет излучения перед ударной волной. Хочу сказать, что излучение, выходящее за пределы данного слоя, которое могло бы ионизовать молекулярные составляющие и дать дополнительную электронную концентрацию перед ударной волной, оно в данных рассматриваемых условиях может быть незначительным, как это рассматривал Леонид Михайлович Биберман.

### **Воробьев В.С.**

Нет такого человека – Леон Михайлович.

### **Прутько К.А.**

Леон Михайлович Биберман. Поскольку основную роль в образовании электронов имеет ассоциативная ионизация, поэтому концентрацию электронов перед ударной волной в данном случае можно не учитывать.

Насчет граничных условий по излучению. Особых граничных условий на фронте ударной волны не ставилось, излучение не входило извне ударного слоя, и поскольку излучение рассчитывалось уже по готовой кинетике, особых условий не требовалось ставить, перенос излучения проводился по данным, которые были получены при расчете газодинамики и кинетики. На этом все.

### **Председатель**

Спасибо. Слово предоставляется второму официальному оппоненту, доктору физико-математических наук Кузнецову Михаилу Михайловичу, Московский государственный областной университет.

### **Кузнецов М.М.**

Мне кажется, что работа Кирилла Александровича - это хорошая, добротная работа. Главное, что в ней есть - свежее перо. Конечно, используются некоторые накатанные подходы. Но это свежий взгляд на то, что происходит по планирующей траектории по которой движутся современные гиперзвуковые летательные аппараты. Направление усилий диссертанта находятся в рамках наиболее передовых поисков в такой сложной области газодинамики, связанной как с физикой, так и с излучением. Надо сказать, что эта работа безусловно относится к фундаментальным исследованиям. В целом ориентирована на приложение в силу того, чему она посвящена - спускаемые аппараты, их обтекание – весьма сверхактуальная задача.

Если мы посмотрим фундаментальные работы, связанные с квантово-механическими исследованиями, когда шел Буран, была проблема каталитичности, и есть физико-химическая абсорбция, что делать? Там такие методы, как аналитические разложения не годятся, надо эту сложную задачу считать численно. Здесь есть много параллелей, в том числе в излучении. Что биться лбом об стенку, взять аналитически эту крепость не зная констант, ведь эта работа связана с двумя главными проблемами, которые остаются и сейчас, всем хорошо известны – не знание констант. В излучении это супер-проблема. Замечание из Питерского института, там, конечно, все очень фундаментально, но и там проблема по колебаниям и диссоциации. Но излучение там почему-то не очень-то идет. Потому, что этот эксперимент и теория вычисления сечения взаимодействия – как никогда актуальны, а то, что есть – страшно ошибочно.

В прикладных работах, связанных с аэродинамическим проектированием, поднималась проблема ошибок знания констант. Общий подход, связанный с сплошносредовым взаимодействием индивидуальных сред, большинство работ именно в этом плане сделано, взаимодействие в многотемпературной модели. Но и здесь, что сделано по делу? По делу он сделал то, что он убрал самую главную ошибку, которую вносила константа ионизация электронным ударом N и O. Эта самая константа при традиционных подходах и даже в экспериментальных данных к моменту написания работы она вносила, как теперь стало ясно после его работы, она и вносила главный вклад в ошибку уже радиационной ситуации, интенсивности радиации и самого радиационного потока. Он ее рассчитал с помощью уровневой кинетики. Я возвращаюсь к тому, что значит современная ориентировка. И это, конечно, поуровневая кинетика. Почему? При равновесии – Больцман, а тут-то не Больцман, а что тогда? А вообще говоря, никто не

знает, что. Для этого надо взять 100 уровней, а может быть не 100, а 300, как у него взято. Он написал, что в рамках разумного машинного времени он это провел. Критерий тут никто не ставит: хорошо это или не очень хорошо. Но единственный главный судья – эксперимент, и есть еще другие расчеты. Тут у него все в порядке, все работает. И более того, он решил проблему, которая до не него не была решена. Он убрал ошибку в константе через поуровневую кинетику. Получил, что главная ошибка содержится не столько в физике сечений, а ее неправильной статистике. У него статистика следует из, по-моему, 62 уровня в азоте и за 80 с чем-то в кислороде, плюс 300 переходов между уровнями. Это современный стиль.

Более того, эта работа умная, у него не взято что-то и напихано. Взять, что есть, напихать в программу и посчитать, современные мощности это позволяют. И такой стиль, таких работ не мало, между прочим. Здесь можно выделить их по-отдельности, все вопросы, которые ему ставились, некоторые недоработки, он может их решить, в принципе. У него все это программа позволяет. Выделять отдельно, как он выделял во второй главе, посвященной равновесному обтеканию. Все процессы выделены, то, что у него предложено в виде главной уникальной программы, позволяет исследовать, отвечать на эти вопросы совершенно конкретно.

Второе очень важное качество этой работы – самосогласованность, и приложение к трубному эксперименту. Потому, что в разных трубах при выполнении закона бинарного подобия получается такая картина. Он показал, что там разные пробки разного диаметра, и главную роль играет охлаждение. Впервые, как раз в группе Горелова обнаружилось влияние излучения в своем эксперименте. Не случайно он посвятил этому свою модель, проверял именно на этих экспериментах. И получил важный эффект охлаждения, который имел место при неравновесном излучении.

Во-первых, я полностью присоединяюсь к оценке Александра Викторовича во всем. А во-вторых, я хочу сказать, что ему было дано 20 минут, и он, зря этому последовал, ему, конечно, разрешили бы и больше сказать, хотя он очень хорошо рассказал. Обычно молодые люди плохо рассказывают диссертации и пишут не очень здорово. Работа написана замечательно, логично, простым настоящим русским языком, без всяких лишних паразитных слов, замечательно написано, все по делу. Но естественно, кандидатская диссертация, на все вопросы не ответишь. Известна поговорка: лучшее – враг хорошему. Это хорошая, добротная работа – вот моя итоговая оценка.

Замечания.

**(Первое замечание).** Программа диссертанта позволяет взять отдельные каналы, по которым можно прояснить ту или иную степень неточности. Желательно было бы провести оценку вклада в интенсивность излучения возбужденных состояний ионов положительного кислорода и положительного азота. Поскольку константы у вас обсуждаются как некое достижение, конечно же здесь нужно было подробнее на примерах это более ярко выделить достижение.

**(Второе замечание).** Второй главный момент, который тоже является достижением – обратное влияние. Не учтено обратное влияние излучения на газовую динамику, и нужно смотреть, как меняется энтальпия и скорость. Здесь тоже можно было бы и поподробней это изложить – это у вас была четвертая глава, насколько помню. Ему совет – не надо писать того, чего не сделано. Вы пишете в конце автореферата, что проведены в НИИ Механики МГУ опыты фундаментального плана. Поскольку вы не успели сравниться, то вы пишете, что это будет сделано после. Ну так, когда сделаете, тогда и пишете.

**(Третье замечание).** Еще одно замечание. У вас одномерная модель, поскольку упор был сделан на правой части балансовых уравнений, где именно поуровневая кинетика. Ясно, что в научной среде вы предполагаете в плане того, что все сложнее, как тут уже прозвучало, по-моему, про трехмерное обтекание. Но я хочу сказать, что и в

других областях физики вся эта атомная энергетика до сих пор на одномерной модели. Уж там настолько все непонятно, и все дергается, а работает прекрасно одномерная модель. Все технологии на ней и основаны. А напихать там все, что есть, посчитать – это не наука, между прочим. Здесь работает интуиция, которая, конечно же, набирается на многих синяках и шишках, нужно выдержать этот барьер науки. Я думаю, что это то поколение, которое сегодня нас сменяет, оно в его лице – достойное поколение.

*(Четвертое замечание).* У меня там было третье еще замечание, вот вы пишете, что если перейти к двухмеру и трехмеру, то надо было бы указать к каким последствиям это повлечет в смысле и машинного времени, и профилей, и так далее. Но как раз по профилям, по-видимому, не очень искажается. Не надо писать того, чего еще не сделано – это общее правило для всех научных работ и тем более диссертации.

### **Председатель**

Спасибо, Михаил Михайлович. Есть ли вопросы к оппоненту. Нет вопросов. Ещё раз спасибо. Слово предоставляется диссертанту для ответа на прозвучавшие в выступлении оппонента в отзыве замечаний.

### **Кузнецов М.М.**

Я забыл зачитать заключение. Ничего, да?

### **Председатель**

Ничего.

### **Прутько К.А.**

*(Первое замечание).* По поводу излучения положительных ионов хотелось бы сказать, что поскольку здесь степень ионизации относительно невелика – 10-20 %, концентрация возбужденных состояний этих ионов – еще меньше, поэтому излучение должно получаться сравнительно небольшое, точнее незначительным. Поэтому оно не учитывалось.

*(Четвертое замечание).* Насчет упрощения модели есть некоторые идеи, это будет проведено в последующих работах.

С замечаниями в отзыве я согласен. Спасибо.

### **Председатель**

Спасибо, Кирилл Александрович. Следующее у нас – дискуссия. Предваряя дискуссию, есть пожелание, как председательствующего, прозвучало очень много серьезных вопросов по существу во время первоначального обсуждения, много вопросов очень сложных прозвучало. Что-то прояснили оппоненты, безусловно, я надеюсь, для тех, кто задавал вопросы, активно вел среди членов совета. На часть вопросов ответы, наверное, получены, и сформировалось законченное представление о проделанной работе. Мое мнение такое, что, действительно, квалификация полностью соответствует предъявляемым требованиям к кандидатской диссертации, совершенно четко ясно. Поэтому предваряя дискуссию, призываю быть лаконичным, чтобы максимально по существу. Давайте, кто начнет?

### **Воробьев С.В.**

Тема данной работы имеет довольно длинную историю. И впервые о роли излучения, которое образуется в ударной волне перед движущимся космическим аппаратом, помимо конвективного нагрева, радиационный – заговорил Леон Михайлович Биберман в 58 году. Тогда Сергей Павлович Королев заключил с ним договор, и была образована теор. группа, которая последовательно стала разрабатывать вот это, роль излучения, которое может оказаться соизмеримым с конвективным и иногда превышает

его – 60-80%. Но в то время еще сама теория радиационных процессов была недостаточно развита. Поэтому в группе, параллельно с расчетом излучательных характеристик, которые падают на тело, разрабатывалась теория самих радиационных процессов, где было все ясно. В частности, был введен существенный, так называемый, фактор Бибермана-Нормана при расчете фотоизлучения, связанный со спецификой сложных атомов. Эта работа довольно интенсивно велась на протяжении многих лет. Как итог была опубликована монография «Оптические свойства горячего воздуха», 70-й год.

Дальше группа перестала этим заниматься, кончилось финансирование. А дальше Сергей Тимофеевич Суржиков подхватил и занимался до последнего времени на очень высоком уровне. Но он всегда очень корректно ссылался на эти первые работы.

Мы с интересом узнали, что нового сейчас появилось, столько времени прошло, что нового было сделано. Казалось бы, сейчас, можно было учесть то, что раньше учитывалось, плюс что-то еще. Здесь уже прозвучало, что почему-то отброшены молекулы. А что стоило их учесть, вообще говоря, не понимаю. Когда сложности связаны с решением жесткой системой уравнений, чем добавить молекулы. И целый ряд процессов, роль которых была выяснена ранее, тоже отброшены по непонятным причинам. Это сразу снижает, раз у вас без молекул, что мы будем рассматривать это? Или надо обосновывать, где молекулы дают вклад, где не дают вклад. Специальный человек был, всем известный наш сотрудник Артем Хачатурович Мнацаканян, он тогда отвечал за молекулярные вклады.

Дальше я хочу сказать, что, конечно, здесь есть положительные моменты в этой работе – появились новые экспериментальные данные, которых тогда не было, можно что-то было сравнить. Но это сравнение тут по порядку величины, качественно что-то похоже получается или нет. Дальше я хочу сказать, что во всяком случае в реферате совершенно неверно расставлены акценты на приоритеты и ссылки. Для примера, я открываю страницу 9, здесь сказано: «основной вклад в излучение воздуха за сильными ударными волнами дают линейчатые переходы, фоторекомбинационное излучение, тормозное излучение». Но простите, что в этом нового, это все было известно давно, это было вынесено в положения, выносимые на защиту. Это все известно, и тут ничего нового нет, почему это надо выносить. И самое главное, здесь идет ссылка, кто это сделал: Николай Николаевич Пилюгин и Георгий Александрович Тирский. Они этим не занимались, это ошибка, причем тут Пилюгин и Тирский? И дальше ниже идет: «для расчета линейчатого излучения рассчитывался профиль Фойгхта, учитывающий уширение (Пилюгин, Тирский)». Да это не Пилюгин и Тирский, это сам Фойгхт это придумал, и это применялось еще до войны, Фойгхтовские профили. И таких небрежностей, в смысле расстановки приоритетов, достаточно много, что снижает, на мой взгляд, ценность этой работы. Недостаточная номенклатура радиационных процессов, роль которых была в более ранних работах показана и неправильная расстановка приоритетов по ходу реферата. Я считаю, что эти недостатки существенны.

### **Председатель**

Спасибо. Виктор Михайлович, пожалуйста.

### **Зайченко В.М.**

Мы сейчас сталкиваемся очень редко иногда с такой ситуацией. Был какой-то коллектив, они в силу каких-то причин собрались вместе, во главе стоял достаточно крепкий человек. И они что-то сделали в науке. Причем это может быть чисто научное, научно-техническое, это может быть конструкция чего-то. Они это сделали, это было все хорошо. Потом прошло много лет. Мы возвращаемся к решению вот этой задачи. И мы не способны понять и охватить то, что было сделано раньше. Мы начинаем развивать все это раньше. Таких примеров, кстати говоря, в энергетике очень много. Люди сделали, люди

утвердили, люди показали. А дальше начинается повторение, потому что нет вот этой какой-то силы, которая была у того коллектива, решить эти задачи.

**Воробьев С.В.**

Литературу читать надо.

**Зайченко В.М.**

Да, наша наука делится на две части: те, которые читают, и те, которые пишут. Это глобальное различие. Про что я хотел сказать, я с большим пиететом отношусь к людям, которые вот здесь сидят и представляют вот эту группу, этот коллектив, который Леон Михайлович Биберман, про Вас я не буду говорить, я скажу про тех, которых здесь нет. Упоминалось две фамилии: Артем Хачатурович Мнацаканян и Норман. Хорошо, и Лагарьков. Но требовать, да, смотри – три фамилии! И требовать с парня, который сделал кандидатскую диссертацию, чтобы он это все освоил, Артем бы крепко обиделся, если бы все это было понятно. Это длительный процесс.

**Воробьев С.В.**

Сделать правильные ссылки можно было.

**Зайченко В.М.**

Да, надо пожелать успехов, но на уровне кандидатской работы вот это все освоить, на мой взгляд, невозможно.

**Воробьев С.В.**

Правильные ссылки.

**Зайченко В.М.**

Ну хорошо, есть какие-то ошибки в ссылках, я согласен. Но у кого нет ошибок, правда? Но освоить вот это то, что было сделано вот этой, не помню, как комната называлась, где вы все сидели.

**Кобзев Г.А.**

То есть ты хочешь сказать, что ты бы не освоил?

**Зайченко В.М.**

Точно, я не освоил. Я тебе уже говорю прямо. Я пас. Все, спасибо.

**Председатель**

Спасибо, Виктор Михайлович. Так, пожалуйста еще. Да, Артур Владимирович.

**Красильников А.В.**

Так получилось, что мы с ним работаем в одном отделе, поэтому я хорошо представляю его, как научного работника. ЦНИИмаш – это прикладной институт, и там фактически задачи возникают, как говорят, не из-за пальца, а из потребностей развития соответствующей техники. Появились новые летальные аппараты: Федерация и другие. Надо, действительно, все это пересчитать и так далее. У нас были специалисты в области лучистого теплообмена, я назову фамилии.

**Из зала:**

Пластинин.

**Красильников А.В.**

Пластинин, ну и я. Назову тех, которых уже нету. Пластинин – действующий

работник. Каменщиков, другие, соответственно. Румынский, Старченко, вот такие, соответственно, которые внесли свой вклад в создание летательных аппаратов первого поколения, 60-е, 70-е годы. Они, уже их нет. Фактически у нас идет смена поколения. И вот, представитель этого нового поколения, который поднимает то знамя, или как назвать, как хотите, чтобы продолжать все это дело. Я считаю, что очень правильно было решение прийти на защиту именно сюда в ИВТАН в силу того, что здесь, действительно, школа Бибермана, она известная, всеми уважаемая и так далее. И я считаю, что это смелый, правильный научный шаг прийти сюда на защиту, чтобы выслушать все правильные замечания, которые здесь были сделаны.

Я считаю, что мы рассматриваем квалификационную работу. По квалификации диссертант вполне соответствует тем требованиям, предъявляемой к кандидатской работе. Я буду голосовать за присуждение ему степени, призываю и других. Правильный учет тех замечаний великолепной биберманской школы – это будет ему на пользу. Я считаю, что для науки это тоже будет большая польза.

### **Председатель**

Спасибо, Артур Владимирович. Я думаю вопрос ясный.

### **Кобзев Г.А.**

Я имею право настаивать. Поскольку получилось так, что выступающие, кроме нас с Владимиром Сергеевичем, как бы заняты тем, что защищают от нас, хищников, бедного воробья, то я считаю необходимым сказать следующее. Вообще, получилось так, что я большую часть своей активной научной жизни занимался оптическими свойствами разных плазм, прежде всего воздуха. Кандидатская диссертация – это воздух до 20000, а докторская диссертация – это разные газы до трех миллионов градусов. Поэтому Владимир Сергеевич правильно говорит, что мы занимались тем, что разрабатывали, придумывали, я бы сказал так, радиационные процессы, разрабатывали их теорию и так далее. Но, как говорится, на склоне лет, обидно видеть, что то, что тобой сделано плохо идет в дело. Хотя ссылок литературных на наши работы много по-прежнему, они продолжают. И прежде всего, даже, во-первых, американцы, тот же Кристофер Джонстон с командой полны почтения и обсуждают все, о чем я тут спрашивал.

Есть вторая ветка в мире – это метеоритчики. В России – это Институт динамики геосферы, бывший спецсектор Институт химфизики Земли, который занимается, их любимый предмет исследования – Тунгусский метеорит, который был уже очень давно, и теперь уже Челябинский. И там куча работ, использующих оптические свойства, и в том числе были бы крайне полезны молодым людям, которые в ЦНИИмаше сейчас начинают заниматься неравновесным излучением при входе в разного рода атмосферы, Земли и всего прочего.

Это не просто обидно, на самом деле, это отражает ситуацию со всеми вами механиками, те, кто чувствуют себя механиками. Механики, к сожалению, работы последних лет редко кто пытается взглянуть внутрь того программного блока, который описывает оптические свойства, или термодинамику, или что-то такое. Например, Кириллом Александровичем взята в качестве высшего достижения, так называемая, TOPbase по сечению фотоионизации, мне хорошо известная потому, что я знаю тех людей, которые создавали, знаю. Без разбора все, что там есть засовывается, а это ну уж точно не нужно. Второе, когда говорится про спектральные линии, берется база NIST, и все засовывается по двум атомам. А это не просто не нужно, это смешно потому, что там среди линий, которые приведены в этой базе, куча линий, которые являются дипольно неразрешенными. То есть, они соответствуют переходам между термами с разной мультиплетностью. И они проявляются, в принципе, либо в сильных электрических полях, в каких-то особых условиях. То есть там делается огромное количество абсолютно глупой

лишней вычислительной работы.

То, что делал диссертант в части с вычислительной математики заслуживает, с моей точки зрения неспециалиста, всякого уважения. Создать такой программный комплекс, который все бы это переваривал, заложенный, в том числе, в огромном количестве лишнего – это здорово.

Второе, что я хотел бы сказать в самом конце, что, когда я ехал сюда, поехал не на своей машине, а на такси, и на МКАДе попал в аварию. То есть, мне был какой-то сигнал о том, что – будь осторожен. Про это, как про причину того, что я сейчас скажу, я говорю это в шутку. Но буду тоже выступать в поддержку присвоения ученой степени.

Я бы сказал так, как профессор, я бы так по предмету, который он защищает – за физику поставил бы тройку с плюсом, за механику – пятерку, за вычислительную математику – тоже пятерку. В итоге, что-то вроде четверки с маленьким плюсиком. Поэтому я буду голосовать за.

### Председатель

Спасибо, Георгий Анатольевич. Наверное, сложилась ясная картина. Поэтому заключительное слово соискателю.

### Прутько К.А.

Хотелось бы выразить благодарность своим оппонентам, которые изучили мою работу, прочитали диссертацию, также присутствующим членам диссертационного совета и остальным, слушающим мою работу. Также большое спасибо тем специалистам, которые написали отзывы на автореферат. И спасибо моему научному руководителю Залогину Георгию Николаевичу, Власову Вячеславу Ивановичу за огромную помощь в изучении данного вопроса, и моим коллегам также спасибо.

### Председатель

Спасибо.

Для проведения процедуры тайного голосования нам нужно выбрать счетную комиссию, которая предлагается в следующем практически стандартном для нашего совета составе: Виктор Михайлович Зайченко, Олег Сергеевич Попель (*председатель счетной комиссии*) и Валерий Федорович Чиннов. Надо проголосовать за состав. Кто за состав в озвученном? Спасибо. Кто против, воздержался? (*Счётная комиссия выбирается единогласно*). Тогда прошу всех произвести голосование и ни в коем случае не расходится, потому что еще проект как можно быстрее принять, и уже время подпирает для того, чтобы нам закрыть первое заседание и открыть второе заседание. (*Проводится процедура тайного голосования*).

### Председатель

Внимание, заключение комиссии!

### Попель О.С.

Результаты голосования. Было роздано **17** бюллетеней, и в урне оказалось **17**. Результаты голосования: **за – 16, против – 0, 1 – недействительный, воздержавшийся**. Так что можно поздравить диссертанта.

### Председатель

Спасибо, Олег Сергеевич. Нам надо утвердить протокол счетной комиссии. Кто за то, чтобы утвердить? Кто против? Нет? Воздержался? Единогласно утверждаем. (*Протокол счетной комиссии утвержден единогласно*).

И поздравляем диссертанта со состоявшейся защитой!

Теперь проект заключения надо обсудить. Он на руках у всех? Есть ли замечания?

*(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения).* Там, где обосновывается выбор оппонентов, область интересов.

**Из зала:**

Оппоненты оказались энергетиками из другой сферы, ошибка из примера проекта.

**Председатель**

Тогда по рабочей процедуре есть предложение, без замечаний. Если что возникнет. По существу, ничего такого, все соответствует требованиям ВАК, поэтому предлагаю принять проект заключения. Кто за это? Спасибо, кто против? Нет. Воздержавшиеся? *(Проект заключения принят единогласно).*

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](http://jiht.ru), (495) 485-8345), утвержденного 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 объем 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 неравно весным 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. Истомин) – 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 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.

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., Смотрова 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., профессор Уваров А.В. является ведущим специалистом в области исследования релаксационных процессов и неравновесных течений газов, является руководителем семинара «Физико-химическая кинетика в газовой динамике», проводимого в НИИ Механики МГУ, автором 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.

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.

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,

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 нагретого 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, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту \_\_ 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.