



МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственный научный центр Российской Федерации
Федеральное государственное унитарное предприятие
**«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени профессора Н.Е.Жуковского»
ФГУП «ЦАГИ»**

140180 Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1
тел.: (495)556-4205, факс: (495)777-6332
E-mail: <http://www.tsagi.ru>
ОКПО 07542112, ОГРН 1025001624471
ИНН / КПП 5013009056/504001001

14.01.2019 № АМ 40/08-10-116

На № _____

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Кадочникова Ильи Николаевича** «Исследование термически неравновесных физико-химических процессов в азотной и воздушной плазме с использованием детальных уровневых и модовых кинетических моделей», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Работа Кадочникова И.Н посвящена разработке новых термически-неравновесных кинетических моделей на базе уровневого и модового приближения для описания механики азотной и воздушной плазмы, а также численному исследованию протекающих в неравновесном газе физико-химических процессов.

Актуальность данной работы обусловлена тем, что разработка и совершенствование физико-химических моделей для описания неравновесных течений газа и плазмы в последние годы вызывает большой интерес как в России, так и за рубежом в связи с задачами входа космических аппаратов в атмосферу и гиперзвуковой авиации. При этом растущая мощность компьютеров делает возможным всё более подробное описание протекающих в газе физико-химических процессов и позволяет рассматривать динамику заселённости отдельных электронно-колебательных уровней молекул. Применение таких детальных моделей ограничено высокой вычислительной сложностью, но позволяет получить наиболее полное представление о кинетике протекающих в неравновесном газе физико-химических процессов. С другой стороны, для проведения

«УТВЕРЖДАЮ»:

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

доктор физико-математических
наук, профессор РАН



А.Л. Мельвельский

« / » 2019 г.

017625

многомерных расчётов необходимо создание более простых термически неравновесных моделей на базе модового приближения. Создание модовых моделей для азотной и воздушной плазмы и повышение их точности имеет большое практическое значение.

Краткий анализ содержания работы.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель и кратко изложена структура диссертации.

Первая глава представляет из себя обзор литературы по тематике диссертации. Приводится краткое описание уровневых и модовых моделей, представленных в работах различных авторов. Отмечено, что при построении уровневых моделей как правило не учитывается неравновесное колебательное возбуждение молекул в электронно-возбуждённых состояниях, а в существующих уровневых моделях для воздуха не учитываются плазмохимические реакции. Отмечено также, что точность модового приближения существенно ограничена в связи с погрешностью моделей, используемых для определения факторов неравновесности.

Во второй главе приводится описание разработанной автором детальной уровневой модели для азотной плазмы, в которой система уравнений поуровневой кинетики решается для молекул азота в основном и возбуждённых электронных состояниях. С использованием данной модели проведены расчёты параметров неравновесного газа за фронтом сильной ударной волны в азоте. Показано, что результаты моделирования хорошо согласуются с существующими экспериментальными данными. Приводится сравнение результатов уровневой модели и модовой модели для азотной плазмы с факторами неравновесности, определяемыми по модели Н.М.Кузнецова. Показан рост погрешности результатов модовой модели при увеличении интенсивности ударной волны. Из рассмотрения заселённости электронно-колебательных уровней молекул в релаксационной зоне делается вывод, что соответствие результатов уровневой и модовой моделей может быть существенно улучшено уточнением методологии расчёта факторов неравновесности.

С использованием уровневой модели исследованы физико-химические процессы, протекающие в расширяющемся потоке смеси N_2 -IF-He. Показано, что при охлаждении потока в сопле на электронно-колебательных уровнях молекул IF вследствие быстрого электронно-электронного обмена с возбуждёнными молекулами азота формируется инверсная заселённость, но полученный коэффициент усиления является недостаточным для создания газодинамического лазера.

В третьей главе представлена детальная уровневая модель для воздушной плазмы, позволяющая рассматривать неравновесное колебательное возбуждение молекул N_2 , O_2 и NO в основном и возбуждённых электронных состояниях, а также учитывающая широкий набор химических и плазмохимических реакций. Проведено сравнение результатов модели с экспериментальными данными по определению излучения полос $NO(\gamma)$ и $N_2^+(1-)$ в неравновесном воздухе за фронтом сильной ударной волны. Исследована кинетика образования электронно-возбуждённых молекул, определяющих радиационные свойства высокотемпературного воздуха. Рассмотрено влияние на состав смеси и газодинамические параметры потока в релаксационной зоне плазмохимических реакций; отмечено, что их учёт необходим при скорости ударной волны $u_0 > 5$ км/с. Приводятся формирующиеся в релаксационной зоне неравновесные функции распределения молекул N_2 , O_2 и NO по электронно-колебательным уровням. Показано, что заселённости колебательных уровней могут заметно отличаться от локальных распределений Больцмана только для молекул N_2 и O_2 в основном электронных состояниях и лишь при чрезвычайной интенсивности ударной волны ($u_0 \geq 8$ км/с).

Четвёртая глава посвящена построению модифицированных модовых моделей для азотной и воздушной плазмы, в которых скорости химических реакций и релаксационных процессов определяются суммированием вкладов отдельных элементарных каналов данных процессов. Показано, что при одинаковом наборе учитываемых реакций и констант скорости такие модели, несмотря на относительную простоту, позволяют описывать параметры азотной и воздушной плазмы за фронтом сильной ударной волны с точностью, аналогичной точности детальных уровневых моделей. Также был проведён расчёт параметров азотной плазмы в расширяющемся сверхзвуком потоке и показано, что, в связи с существенным отклонением заселённостей колебательных уровней молекул от больцмановских распределений, в результатах модифицированной модовой и уровневой моделей имеют место заметные отличия при определении концентраций и колебательных температур электронно-возбуждённых молекул азота.

В заключении кратко перечислены основные выводы и результаты, полученные в диссертационной работе.

Новизна исследования и полученных результатов

В диссертационной работе получен ряд новых результатов:

- 1) Разработаны детальные уровневые модели для азотной и воздушной плазмы, особенностью которых является возможность описывать динамику заселённости

отдельных колебательных уровней молекул не только в основном, но и в возбуждённых электронных состояниях, а также наиболее полный учёт химических и плазмохимических реакций с участием реагентов в различных энергетических состояниях.

2) С использованием уровневых моделей проведены расчёты параметров азотной и воздушной плазмы за фронтом сильной ударной волны и проанализированы протекающие в неравновесном газе физико-химические процессы. Полученные результаты были применены для анализа точности более простых кинетических моделей на базе модового приближения.

3) Показано, что распределения по колебательным уровням молекул N_2 , O_2 и NO в различных электронных состояниях в релаксационной зоне за фронтом сильной ударной волны в азоте и воздухе отличаются от распределений Больцмана незначительно, что делает целесообразным использование более простых модовых моделей.

4) Предложен метод построения модифицированных модовых моделей, позволяющих описывать параметры неравновесного газа за фронтом ударной волны и в расширяющемся сверхзвуковом потоке с точностью, близкой к точности уровневого приближения.

5) Построена уровневая кинетическая модель для смеси N_2 -IF-He, проведено численное исследование возможности создания газодинамического лазера в молекулярной системе $N_2(A^3\Sigma^+_u)$ -IF, показано формирование инверсной заселённости электронно-колебательных уровней молекул IF при охлаждении термически возбуждённой смеси N_2 -IF-He в расширяющемся потоке, проведена оценка коэффициента усиления.

Полученные результаты и сделанные выводы можно считать достоверными и обоснованными вследствие корректности использованных моделей, а также сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными и результатами других авторов.

Значимость полученных результатов для науки и практики

Построены детальные уровневые модели для азотной и воздушной плазмы, а также смеси N_2 -IF-He, учитывающие сотни физико-химических процессов с участием молекул в различных электронно-колебательных состояниях, являются результатом кропотливой работы и безусловно представляют интерес для специалистов, работающих в данной области. Выполненные с использованием данных моделей численные эксперименты вносят вклад в понимание кинетики элементарных физико-химических процессов, протекающих в термически неравновесном газе за фронтом сильной ударной волны и в расширяющемся потоке. Рекомендации по построению модифицированных модовых

моделей, обладающих точностью, близкой к точности уровневых моделей, имеют большое практическое значение и могут быть использованы для решения многомерных задач механики неравновесного газа и плазмы.

Результаты работы могут быть использованы в организациях аэрокосмической отрасли (ФГУП «ЦАГИ», ЦНИИМаш., НПО Машиностроения и др.), в институтах РАН и научных центрах (МГУ, МАИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИПМех. им.А.Ю. Ишлинского, и др.)

Соответствие автореферата диссертации

Основные выводы и результаты работы представлены в автореферате. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Замечания

Работа не лишена недостатков:

1. Из текста работы непонятно, как учитывалось радиационное обеднение возбужденных электронно-колебательных состояний молекул и электронных уровней атомов.
2. Приведенная кинетическая схема принята как аксиома, несмотря на наличие большого их количества. Здесь можно было провести сравнение данных, полученных с использованием различных моделей физико-химических процессов.
3. На рис.4.6 показаны данные по колебательным температурам вдоль оси сопла при условиях в форкамере $P_0=10$ атм., $T_0=12000$ К. В этих условиях азот и в основном, и в возбужденных состояниях полностью диссоциирован и анализировать поведение колебательных температур отсутствующих молекул не актуально.

Приведенные замечания не снижают значимость проведенной автором работы. Они являются пожеланиями к дальнейшим исследованиям.

Доклад по теме диссертации заслушан и проект настоящего отзыва обсужден на семинаре отдела физической аэродинамики НИО-8 ЦАГИ 25.12.2018 г.

Заключение

Диссертация Кадочникова Ильи Николаевича является законченной научно-квалификационной работой, посвящена актуальной теме, выполнена на высоком уровне и обладает как научной новизной, так и практической значимостью. Результаты работы

докладывались на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах. Таким образом, считаем, что диссертационная работа соответствует критериям п.9-11, 13, 14 постановлений «Положение о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842) и «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Кадочников Илья Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Главный научный сотрудник

Член- корреспондент РАН

Доктор физико- математических наук

И.В. Егоров

Ведущий научный сотрудник

Кандидат физико- математических наук

А.Ю. Киреев