

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Кадочникова Ильи Николаевича «Исследование термически неравновесных физико-химических процессов в азотной и воздушной плазме с использованием детальных уровневых и модовых кинетических моделей», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Важность учета кинетических процессов в моделях физико-химической газодинамики не вызывает сомнений. Кинетические уравнения с многочисленными константами, которые определяются опытным и теоретическим путем, необходимы для правильного учета энергообмена в неравновесном газе, однако они существенно усложняют задачу и вопрос о том, с какой степенью подробности их нужно учитывать в расчетах, остается актуальным, несмотря на все успехи численного моделирования. Простейший вариант учета, связанный с введением некоторой средней интегральной энергии внутренних степеней свободы, в большинстве случаев описывает гидродинамические задачи очень неточно, но требует знания только одного времени релаксации и добавления только одного релаксационного уравнения. При расчетах с помощью уровневой кинетики многократно увеличивается количество необходимых констант и, соответственно, к системе газодинамических уравнений добавляются десятки и сотни кинетических. Очевидно, что современный подход должен состоять в разумном сочетании уровневой кинетики в тех случаях, когда без этого обойтись невозможно и модового приближения. Поисками именно такого компромисса при решении определенного класса гидродинамических задач и посвящена данная работа. Очень важным вопросом является учет колебательной неравновесности не только для основного, но и для возбужденных электронных состояний молекул.

Рассматриваются две классические задачи газодинамики с противоположным соотношением энергий поступательных и внутренних степеней свободы – релаксационная зона за фронтом сильных ударных волн и течения в соплах на примере релаксации в двух средах – чисто азотной плазме и воздушной плазме с определенными ограничениями на рассматриваемый состав.

Рассмотрим теперь более подробно текст диссертации.

В первой главе дан обзор имеющихся уровневых и модовых моделей и рассматриваются преимущества и недостатки различных приближений при анализе

релаксационных процессов. Данная глава позволяет определить место рассматриваемых в диссертационной работе задач среди подобных исследований.

Во второй главе рассматриваются несколько задач, связанных с азотной плазмой. Прежде всего, это классическая задача расчета релаксационной зоны за фронтом сильной ударной волны в азоте. Сравняются уровневые модели с учетом и без учета плазмохимических реакций с экспериментами по измерению изменения плотности в релаксационной зоне. Показано, что при увеличении числа Маха влияние плазмохимических реакций становится существенным, что вполне понятно. Кроме того, продемонстрировано, что используемая уровневая модель хорошо описывает экспериментальные профили плотности. Также для проверки модели рассматривалась задача определения эволюции населенности электронно-возбужденных уровней азота в разряде. В этом случае продемонстрировано качественное соответствие. Наибольший интерес представляет в этой части сравнительный анализ расчетов по модовым и уровневым моделям, демонстрирующий существенное различие рассчитываемых параметров азотной плазмы, при использовании для определения факторов неравновесности модели Кузнецова. При этом показано, что в релаксационной зоне заселённости колебательных уровней молекул азота в основном и возбуждённых электронных состояниях отличаются от распределений Больцмана незначительно.

Рассмотренная модель азотной плазмы используется во второй части данной главы для анализа возможности создания газодинамического лазера на фторида иода, поскольку электронно-возбуждённые молекулы азота в смеси фторида иода с азотом и гелием могут эффективно служить «энергетическим резервуаром» для накачки. Наиболее важный результат этой части – получение в расчетах инверсной заселенности IF, что позволяет в дальнейшем продолжить исследования этой системы.

Третья глава посвящена анализу применимости различных моделей для описания структуры релаксационной зоны за фронтом ударной волны в смеси азота, кислорода и аргона с учетом всех основных компонентов, которые образуются этими тремя атомами, ионами этих атомов и молекул, а также с учетом неравновесного электронного и колебательного возбуждения компонентов. Основное внимание уделено анализу неравновесной населённости возбуждённых состояний молекул, возникающей при переходе энергии из поступательных степеней свободы во внутренние в течениях за фронтом сильных ударных волн. Основное отличие данной системы от рассмотренной в предыдущей главе состоит в появлении атомов кислорода и молекул с их участием. Автор честно признает существенные отличия в результатах расчетов с экспериментальными данными по определению скорости диссоциации и VT

релаксации молекулярного кислорода (НИИ механики МГУ, группа О.П.Шаталова). Такие расхождения не являются удивительными, прежде всего, из-за резкого усложнения механизмов энергообмена. По тексту работы видно, что на стандартную проблему описания кинетики молекул NO с из вырожденными состояниями и неадиабатическими переходами были потрачены значительные усилия, и удалось добиться качественного соответствия с экспериментом.

В четвертой главе рассмотрен новый вариант модифицированной модовой модели, отличной от традиционных модовых моделей, использующих для определения фактора неравновесности такие модели как модель Кузнецова или модель Мэрроуна-Тринора, за счет несколько иного способа расчета фактора неравновесности и учёта колебательного энергообмена. Проведено сравнение расчетов течений за ударной волной и в сопле, выполненных по модифицированной модели и с помощью уровневой кинетики. Найдены соответствия и расхождения в этих двух подходах. При этом показано, что модифицированные модовые модели для азотной и воздушной плазмы позволяют рассчитывать параметры течения за ударной волной с точностью уровневых моделей, что является важным результатом с практической точки зрения, поскольку открывает перспективы дальнейшего применения данного подхода при разработке программных комплексов для моделирования многомерных течений.

Из рассмотрения содержания диссертации следует, что соискателем был получен ряд результатов, обладающих новизной и научной ценностью:

1. Разработаны новые уровневые модели, описывающие колебательную неравновесность молекул не только в основном, но и в возбуждённых электронных состояниях, и достаточно полно учитывающие химические и плазмохимические реакции в азоте и воздухе.
2. Рассмотрена населенность электронно-колебательных уровней молекул в течениях за ударной волной и в сопле и продемонстрировано, что за ударной волной колебательные уровни заселены близко к распределениям Больцмана, а в расширяющемся потоке смеси азота, фторида иода и гелия формируется инверсная заселённость уровней молекул IF.
3. Проведено сравнение описаний параметров неравновесного газа, полученных с помощью новых уровневых моделей и модовых моделей при различных способах определения факторов неравновесности.
4. Разработаны модифицированные модовые модели, результаты которых при описании течений за ударной волной и в сопле хорошо согласуются с результатами, полученными по моделям уровневой кинетики.

Выносимые на защиту положения можно считать обоснованными и достоверными вследствие полноты учёта физико-химических процессов при проведении численного моделирования, сопоставления результатов моделирования и экспериментальных данных и воспроизводимости результатов при использовании различных кинетических моделей. Также отметим, что результаты диссертации были опубликованы в 4-х статьях в рецензируемых научных журналах, докладывались на семинарах и на 14 конференциях, что является хорошей апробацией работы.

Автореферат правильно полно отражает содержание диссертации.

Отметим некоторые недостатки данной диссертационной работы.

1. В главе 2 рассматривается релаксационная зона за фронтом сильных ударных волн в азоте. Рассматриваются числа Маха $M=17$ и $M=24$ (рис.2.6, 2.7). Не совсем понятно, как ставятся условия за фронтом по степени ионизации и по температуре электронов. Это очень нетривиальный вопрос, и он никак не обсуждается. В разных приближениях начальные электронные температуры за фронтом оказываются разными, что тоже должно быть объяснено.
2. При наличии электронов электронная теплопроводность в релаксационной зоне велика, что не позволяет на отдельных участках релаксационной зоны использовать приближение Эйлера. Этот вопрос хорошо известен в литературе.
3. Анализ воздушной смеси позволяет проверить известные соотношения, связанные с VV' – обменом. Если он достаточно быстрый, то в модовом приближении поступательная температура и температуры мод связаны между собой простыми соотношениями. К сожалению, этот вопрос никак не обсуждается в работе.
4. При учете ангармонизма колебаний быстрота внутримодового VV обмена позволяет получить простые соотношения для перезаселенности или недозаселенности мод по сравнению с больцмановским распределением. Это так называемое триноровское распределение по колебательным уровням. К сожалению, это приближение в работе не рассматривается.

Однако отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы.

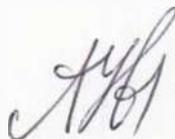
Таким образом, можно заключить, что рецензируемая работа представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, посвящённую актуальной теме, результаты которой обладают научной новизной и представляют интерес с научной и практической точки зрения.

Считаю, что диссертационная работа «Исследование термически неравновесных физико-химических процессов в азотной и воздушной плазме с использованием детальных уровневых и модовых кинетических моделей» удовлетворяет всем требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (в том числе и п.9 этого положения), а её автор И.Н.Кадочников, безусловно, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности «Механика жидкости, газа и плазмы» (01.02.05).

“28” января 2019 г.

Профессор кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова

Уваров Александр Викторович



А.В.Уваров

уч степень: д.ф.-м.н., уч. звание: профессор, адрес: 119191, ГСП-1, г.Москва, Ленинские горы, д.1., стр.2. физический факультет МГУ,
эл. почта: uvarov@phys.msu.ru

Декан физического факультета МГУ,
профессор



Н.Н.Сысоев