

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Алексева Ильи Владимировича на тему:

«Ударные волны в вязких неравновесных течениях углекислого газа», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

В диссертации численно исследуется структура ударной волны в неравновесном потоке углекислого газа. Для моделирования использованы теоретические модели различной степени сложности, построенные методами кинетической теории газов с учетом нескольких колебательных мод молекулы CO_2 , разных механизмов колебательной релаксации и обменов внутренней энергией. Особое внимание уделяется расчету коэффициентов переноса и изучению их влияния на структуру ударной волны, тепловые потоки, напряжения. Тема диссертационной работы является **актуальной** в связи с необходимостью моделирования входа космических аппаратов в атмосферу планет, состоящую из углекислого газа. В возникающей вблизи спускаемого аппарата ударной волне газ разогревается до высоких температур, разогрев сопровождается возбуждением различных степеней свободы, обменов внутренней энергией, химическими реакциями. В связи с этим разработка надежных теоретических моделей, а также их численная реализация и валидация необходимы для проектирования теплозащиты космического аппарата. Данное направление в настоящее время активно развивается в ведущих мировых научных центрах, при этом чаще всего исследования проводятся численными методами. Особенностью представленной диссертации является сочетание строгого теоретического подхода и авторского программного продукта для реализации моделей.

Перечислим **основные научные результаты**, полученные в диссертационной работе. В первой главе обсуждаются особенности молекулы углекислого газа, описываются основные процессы при столкновениях молекул. Приведен общий вывод математической модели для неравновесного газа. Построены модели для замкнутого описания течения углекислого газа в различных приближениях обобщенного метода Чепмена-Энскога. Модель включает алгоритмы расчета коэффициентов переноса, в том числе коэффициента объемной вязкости, а также расчет термодинамических функций без привлечения предположений о калорически совершенном газе и постоянном отношении удельных теплоемкостей.

Вторая глава посвящена развитию численных методов. Приводится обзор литературы по численным методам и программным комплексам. Описаны некоторые численные методы применительно к построенным математическим моделям. Проведена валидация и сравнение численных результатов с экспериментальными данными. Показано, что учет объемной вязкости в многоатомных молекулах значительно улучшает согласие расчетных и экспериментальных профилей плотности. Даны рекомендации по применимости численных

методов. Описан программный комплекс, разработанный автором для расчета структуры ударной волны.

Третья глава посвящена численному исследованию структуры фронта ударной волны в углекислом газе при различных условиях в набегающем потоке в различных приближениях (одно- и многотемпературных). Показано, что предположения о постоянном отношении удельных теплоемкостей и постоянном числе Прандтля ведут к заметному снижению точности расчета. Оценено влияние объемной вязкости на параметры течения, показана важная роль этого процесса в разреженном газе. Исследованы напряжения и тепловые потоки, обсуждается вклад различных процессов в перенос энергии.

Перечисленные результаты являются **новыми**. **Достоверность** представленных в диссертации результатов обеспечивается использованием методов строгой кинетической теории для построения замкнутых математических моделей, применением надежных численных методов, исследованием сходимости численных решений, сравнением полученных результатов с экспериментальными данными.

Теоретическая ценность результатов заключается в выявлении закономерностей неравновесного течения углекислого газа во фронте ударной волны, оценке влияния различных факторов на распределения газодинамических параметров и тепловые потоки, оценках пределов применимости моделей различной сложности. **Практическая значимость** состоит в создании программного комплекса, предназначенного для расчета термодинамических функций и коэффициентов переноса и моделирования структуры ударной волны в вязком теплопроводном многоатомном газе в различных приближениях. Разработка отечественного программного продукта для моделирования неравновесных течений важна в целях импортозамещения коммерческих пакетов прикладных программ.

По содержанию диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. В работе перечисляются методы расчеты структуры ударной волны на основе моделей БГК и Е.М. Шахова. Следовало бы упомянуть кинетические модели для двухатомного газа, например модель В.А Рыкова.

2. Схемы типа HLL/HLLE очень быстрые и простые и, безусловно, гораздо быстрее оригинальной схемы Годунова, основанной на точном распаде разрыва. Программная реализация метода HLL состоит из 5 строчек кода на языке Фортран. Поэтому утверждение соискателя о вдвое более высоких затратах на расчет потоков через грани по методу HLL/HLLE по сравнению со схемой Годунова (стр. 74) вызывает сомнения.

Сделанные замечания не снижают ценности диссертационной работы в целом. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, содержит новые результаты в области неравновесной физико-химической аэродинамики многоатомных газов. Результаты представляют научный и практический интерес. Результаты диссертационной работы опубликованы в 9 работах. Из них четыре публикации вышли в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus или Web of Science Core Collection, одна – в издании

первого квартала. Получены 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, что подтверждает практическую значимость исследования. Результаты прошли апробацию на 6 всероссийских и международных конференциях.

Диссертация Алексева Ильи Владимировича на тему: «Ударные волны в вязких неравновесных течениях углекислого газа» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Алексеев Илья Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не установлены.

Член диссертационного совета

доктор физико-математических наук,

ведущий научный сотрудник,

Федеральное государственное учреждение

"Федеральный исследовательский центр

"Информатика и управление" Российской академии наук"

Email: vladimir.titarev@frccsc.ru

В.А. Титарев

Титарев В.А.

Дата 02.12.2022

