

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 работе рассматриваются вопросы численного моделирования сильной ударной волны в вязком теплопроводном углекислом газе. Задача решается в одно- двух- и трехтемпературном приближениях; при этом результаты, полученные в рамках этих моделей при различных параметрах набегающего потока, сравниваются между собой. Автором оценивается влияние возбуждения колебательных степеней свободы, коэффициентов переноса, термодинамических функций и коэффициентов релаксации на структуру ударной волны и параметры течения за её фронтом.

Актуальность темы работы связано с необходимостью быстрого и достаточно точного расчёта параметров высокоэнтальпийных течений многоатомных газов с сильными ударными волнами. Разработанные модели расчёта течений углекислого газа актуальны для расчёта движения летательных аппаратов в атмосфере Марса или Венеры, а также в задачах лазерной физики, экологии и, возможно, взрывозащиты (при условии, что углекислый газ преобладает в составе продуктов детонации, формирующей сильную взрывную волну, подлежащую подавлению).

Основные результаты.

В первой главе работы рассмотрены: общий подход к построению замкнутого описания неравновесного течения углекислого газа, а также упрощенные модели, основанные на трех-, двух и одготемпературном подходе. В одномерной постановке записаны системы уравнений движения вязкого теплопроводного углекислого газа, коэффициенты переноса и внутренняя энергия газа в которых определяются с использованием рассматриваемых трёх-, двух- и одготемпературного подхода. Системы уравнений записаны в консервативной форме и, с учетом приведенных соотношения для колебательной энергии, удельных теплоёмкостей всех колебательных мод, коэффициентов теплопроводности, сдвиговой и объемной вязкости, подготовлены для численного решения. Подходы, примененные при построении математических моделей, не включают предположений о постоянстве числа Прандтля или показателя адиабаты газа.

Во второй главе проведен обзор численных методов и наиболее распространенных программных пакетов, используемых для решения задач расчёта неравновесных течений газа с сильными ударными волнами. Обсуждаются численные методы (Годунова и HLLE),

выбранные автором для реализации математических моделей, построенных в первой главе. Описывается комплекс программ для ЭВМ, разработанный автором для расчёта неравновесных течений различных газов с сильными ударными волнами, приводятся детали верификации получаемых результатов, исследуется сеточная сходимость.

В третьей главе изложены результаты численного моделирования, полученные с помощью программных средств, описанных в главе 2, на основании математических моделей, приведенных в главе 1. Исследуется влияние показателя адиабаты (переменного в рамках используемых подходов), отношения коэффициентов объемной и сдвиговой вязкости (также существенно изменяющихся), обсуждается изменение числа Прандтля (относительно небольшое в приведенных примерах). Моделирование проводится в одно-, двух- и трехтемпературном приближениях, а также, ради сравнения, в рамках модели совершенного газа (с постоянным показателем адиабаты). Результаты численного моделирования подчеркивают неудовлетворительность моделей с с постоянным показателем адиабаты или числом Прандтля, в частности, для расчёта тепловых потоков. Влияние переменной объемной вязкости оказывается наиболее существенным для течений достаточно разреженных газов (например, в атмосфере Марса).

Основные научные результаты, полученные в главах 1-3, являются **новыми**. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечена использованием хорошо апробированного математического аппарата (математических моделей и алгоритмов расчёта), анализом сеточной сходимости решений, валидацией полученных результатов с доступными экспериментальными и численно полученными данными других авторов. Автором оценены пределы применимости разработанных моделей течения, в рамках которых обеспечивается достоверность результатов, полученных с использованием этих моделей.

Теоретическая значимость диссертационного исследования состоит в разработке новых, достаточно простых и достоверных математических моделей течений углекислого газа с учётом его вязкости и теплопроводности. Оценивается влияние объемной вязкости, изменения показателя адиабаты и числа Прандтля, а также влияние параметров набегающего потока на коэффициенты переноса и вязкие напряжения.

Практическая ценность проведенной работы заключается, в первую очередь, в возможности применения разработанных моделей и методов расчёта при расчёте высокоскоростных полётов в атмосфере Венеры и Марса, а также в практически важных задачах низкотемпературной плазмы, лазерной техники, экологии и обеспечения

взрывобезопасности. Автором получены достаточно легко реализуемые на ЭВМ математические модели и численные алгоритмы. Чтение диссертационной работы оставляет впечатление, что реализация этих методов и алгоритмов на ЭВМ вполне доступна достаточно квалифицированному специалисту. Автором действительно реализован соответствующий программный код, получено свидетельство о государственной регистрации трех программ для ЭВМ.

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

1. Из материалов диссертации неясно, по какой причине время расчета переменных потока методом HLLC оказывается много большим, чем время точного решения задачи Римана о распаде разрыва при реализации метода С.К. Годунова. Мне представляется, что время приближенного решения задачи о распаде разрыва на границах ячеек вычислительной сетки должно быть, наоборот, меньшим.

2. Широко используемое в данной диссертационной работе выражение «модель Навье – Стокса – Фурье» для обозначения системы уравнений движения вязкой теплопроводной среды представляется мне некоторым жаргонизмом.

3. В работе присутствуют некоторые небрежности оформления, в особенности касающиеся постановки тире и дефисов между фамилиями соавторов разного рода моделей и формул («модель Навье Стокса Фурье», «метод Чепмена Энскога», «формула Ландау Теллера» и т.д.

Указанные замечания носят достаточно частный характер или являются предложениями по направлениям работы, возможным в будущем. Они не влияют на общую положительную оценку диссертации. Работа И.В. Алексеева является законченной научно-квалификационной работой, содержит новые результаты, представляющие научный и практический интерес. Работа хорошо структурирована, обладает смысловой цельностью, а ее части находятся в логической взаимосвязи. Системы уравнений, многочисленные и порою громоздкие, воспринимаются как вполне доступные для реализации в виде программного кода. Краткие заключения по главам облегчают восприятие материала.

Основные результаты, выносимые на защиту, опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК и/или проиндексированных в международных базах цитирования SCOPUS и Web of Science, в том числе в журнале *Physics of Fluids*, относящемся к первому квартилю основных международных баз научного цитирования. Работа прошла успешную апробацию на всероссийских и международных научных конференциях.

Диссертация Алексева Ильи Владимировича на тему «Ударные волны в вязких неравновесных течениях совершенного газа», соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Алексей 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 технических наук,

кандидат физико-математических наук, доцент,

профессор кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника» (А9)

ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический

университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова»

М.В. Чернышов

07 декабря 2022 года

Подпись М.В. Чернышова удостоверяю.

Генеральный секретарь М.М. Охотничихин

