

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

Диссертация Алексева Ильи Владимировича посвящена построению математических моделей для расчета вязких неравновесных высокоэнталийных течений углекислого газа, разработке расчетной программы и проведению численного исследования течений вязкого углекислого газа в релаксационной зоне плоской ударной волны.

Углекислый газ в различных концентрациях содержится в атмосферах Земли и планет, в выхлопных газах двигателей внутреннего сгорания, используется в пневматическом оружии и пр. Безусловно, построение математической модели высокоскоростных течений углекислого газа является крайне актуальным для разработки аэродинамической формы и систем теплозащиты спускаемых космических аппаратов, а также при проектировании различных технических устройств.

Молекула углекислого газа обладает рядом специфических свойств по отношению к двухатомным молекулам типа азота. Данные свойства проявляются при нагреве потока углекислого газа при прохождении ударной волны. Построение математической модели и последующий расчет высокоэнталийных течений углекислого газа в виду данного обстоятельства сопряжен с рядом трудностей. В основном расчеты таких течений проводились с рядом упрощений, например, в однотемпературном приближении. Представленная в диссертации модель наиболее полно учитывает свойства молекулы углекислого газа при описании колебательного состояния молекулы и позволяет корректно рассчитать как транспортные свойства газа, так и газодинамические параметры течения при наличии ударных волн. С указанной точки зрения диссертационная работа отличается безусловной новизной.

Научная ценность диссертации состоит в построении оригинальных математических моделей вязкого, теплопроводного углекислого газа для описания ударных волн и получении новых результатов о влиянии объемной вязкости, переменного показателя адиабаты и переменного числа Прандтля в углекислом газе на параметры течения углекислого газа с ударными волнами.

Практическая ценность состоит в возможности использования корректных моделей высокоэнталийных течений углекислого газа при проектировании различных технических устройств, а также в создании собственного программного продукта для расчета таких течений.

Достоверность результатов обеспечивается использованием строгого аппарата кинетической теории газов для построения математических моделей неравновесных течений, сравнением с экспериментальными данными и данными других авторов.

Целями диссертационного исследования являются разработка математических моделей для описания ударных волн в углекислом газе, точный расчет транспортных коэффициентов для углекислого газа, разработка и валидация программного кода для моделирования плоской ударной волны в различных приближениях с учетом эффектов реального газа, численное исследование течений вязкого углекислого газа в релаксационной зоне плоской ударной волны.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Во введении обсуждается актуальность представленного исследования, требования, предъявляемые как к математическим моделям течений углекислого газа с ударными волнами, так и к вычислительным методам, необходимым для расчета таких течений. Представлен обзор литературы по теме диссертации. Дана общая характеристика работы, сформулированы основные цели диссертационного исследования и положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются особенности молекулы углекислого газа и основные процессы, происходящие в CO_2 при столкновениях молекул. На основе модифицированного метода Чепмена–Энскога рассмотрен общий подход к построению замкнутого описания течения углекислого газа при сильных отклонениях от равновесия. Метод применен для получения соотношений характерных времен релаксационных процессов, включая поступательную, вращательную и различные каналы колебательной релаксации. Получены замкнутые системы уравнений различной сложности: однотемпературная для слабых отклонений от равновесия, двухтемпературная с общей колебательной температурой, а также более реалистичная трехтемпературная модель, корректно учитывающая VT и межмодовый обмен колебательной энергией. Для всех моделей выведены замыкающие соотношения для тензора напряжений, потоков поступательно-вращательной и колебательной энергии, а также скорости изменения колебательной энергии различных мод молекул углекислого газа. В одномерной постановке записаны расширенные системы уравнений гидродинамики в консервативных переменных.

Вторая глава диссертации посвящена обоснованию выбора численного метода для моделирования структуры ударной волны в вязком углекислом газе в рамках однотемпературного и многотемпературных приближений. Таким методом является метод конечных объемов. Особенностью реализации метода в диссертационной работе является использование строгих алгоритмов кинетической теории неравновесных процессов для расчета компонентов тензора напряжений, тепловых потоков и релаксационных членов. Проведена валидация математической модели и кода для ее реализации путем сравнения с экспериментом в аргоне и азоте. Разработан программный комплекс SW-NSF-Solver для моделирования структуры ударной волны в вязком многоатомном газе в различных приближениях. Данный комплекс позволяет исследовать сильнонеравновесные течения многоатомных газов в рамках расширенных уравнений гидродинамики.

Третья глава диссертации посвящена численному моделированию неравновесных течений вязкого углекислого газа во фронте плоской ударной волны при различных условиях в набегающем потоке в рамках однотемпературного и многотемпературных приближений. Исследован ряд эффектов: влияние переменного показателя адиабаты, числа Прандтля,

учета объемной вязкости на распределения гидродинамических переменных и процессы переноса импульса и энергии при разных отклонениях от равновесия. Изучены особенности переноса импульса и энергии при различных подходах. Проанализировано влияние начальных условий и расчетного приближения на коэффициенты переноса, вязкие напряжения и тепловой поток в релаксационной зоне. Для понимания особенностей переноса тепла в многотемпературных приближениях сделана оценка вклада различных энергетических мод в общий тепловой поток.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В целом диссертация производит очень хорошее впечатление.

Однако по работе имеется ряд замечаний.

1) В диссертации представлена математическая модель для расчета сверхзвуковых неравновесных течений углекислого газа. К сожалению, не ясен диапазон ее применимости. С учетом данных о энергиях диссоциации молекулы углекислого газа и потенциалах ионизации было бы полезным выделить диапазон применимости модели с точки зрения параметров набегающего потока.

2) Известно, что расчет задачи о структуре ударной волны для одноатомного газа на основе решения уравнений Навье-Стокса при $M \gg 2$ зачастую приводит к большим погрешностям при определении толщины ударной волны. В разделе 2.2 диссертации с целью валидации метода представлено сравнение безразмерных профилей плотности для аргона для одного значения числа Маха равного 3.8, а также зависимость обратной толщины ударной волны для азота в широком диапазоне чисел Маха. Однако, экспериментальные данные для азота при $M > 4$ являются фрагментарными и сильно расходятся в разных источниках. В то время, как данных для аргона в широком диапазоне чисел Маха достаточно много. Для всесторонней верификации модели и метода имело смысл построить график зависимости обратной толщины ударной волны от числа Маха для аргона и сравнить результаты с имеющимися экспериментальными данными.

3) В разделе 2 автором представлено краткое описание разных численных методов и программных продуктов. При этом, на мой взгляд, допущен ряд неточностей, например,

А) Стр.55. “Среди неявных схем можно отметить схему ... метод предиктор-корректор....” В схеме расщепления предиктор-корректор возможно использование неявной схемы на этапе предиктора и явной на этапе корректора.

Б) Стр.55. “Существует множество численных методов решения стационарных задач: метод прогонки...” Классический метод прогонки или алгоритм Томаса используется для решения ленточных систем алгебраических уравнений, к которым можно свести путем дискретизации дифференциальное уравнение, в том числе, описывающее нестационарный процесс.

В) Раздел 2.1.2 начинается с предложений “... метод конечных объемов. Этот метод применяется в широко известных программных комплексах для моделирования течений жидкости и газа: OpenFOAM, ANSYS, Comsol, FlowVision.” Следует заметить, что в среде Comsol Multiphysics реализован метод конечных элементов.

4) Перед уравнением (2.18), по-видимому, пропущено предложение.

5) В разделе 2 приводится описание программного комплекса SW-NSF-Solver. С одной стороны, приведенное описание комплекса представляется избыточным. С другой стороны, отсутствует подробное описание важных деталей, таких как особенности имплементированного параллельного алгоритма и механизм его реализации в коде или описание опций компилятора.

6) Стр.71-72. “Из рисунка 2.6 видно, что чем мельче сетка, тем ближе результаты к экспериментальным данным.” Однако из рис.2.6 следует, что, исходя из критерия близости к экспериментальным данным оптимальный шаг сетки – половина длины среднего пробега молекул в набегающем потоке. А с уменьшением шага решение стремится к решению, получаемому методом пристрелки. Полезным было бы пояснить данное обстоятельство.

Указанные замечания не влияют на общую сугубо положительную оценку диссертационной работы. Рассмотренные в диссертации вопросы построения модели неравновесных течений углекислого газа с ударными волнами и результаты представленного численного исследования демонстрируют высокую компетенцию исследователя в области физики, химии, математики и компьютерных наук. Алексей Илья Владимирович является заслуженным представителем школы гидроаэромеханики Санкт-Петербургского государственного университета, безусловно, школы мирового уровня. К защите представлена сильная теоретическая работа, результаты которой окажутся крайне востребованы как для нужд современной промышленности, так и для подготовки новых космических миссий. Диссертация И.В. Алексева является законченной научно-квалификационной работой.

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 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

Д.ф.м.н., в.н.с. НИО вычислительной физики сложных систем,

проф. каф. физики СПбПУ Петра Великого

03.12.2022

Быков Николай Юрьевич

