

## Отзыв

председателя диссертационного совета на диссертацию Савеловой Марины Эдуардовны на тему «Регулярное и маховское отражение газодинамических разрывов с энерговыделением», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Сверхзвуковые течения газа, реализующиеся при полетах высокоскоростных летательных аппаратов и во многих технических устройствах, сопровождаются образованием газодинамических разрывов. Теория одиночных скачков уплотнения, в том числе с учетом физико-химических процессов, достаточно хорошо развита. Однако в устройствах сложной формы обычно образуются системы газодинамических разрывов различных конфигураций. Кроме того, значительный рост температуры газа за скачками уплотнения высокой интенсивности ведет к инициации химических реакций, детонации, сопровождающихся объемным выделением энергии в потоке газа. Прогнозирование и оптимизация процессов в подобных ударно-волновых структурах необходимы при проектировании перспективных технических устройств, таких как прямоточные воздушно-реактивные двигатели и воздухозаборники. Этим обусловлена **актуальность выбранной темы**. Диссертация К.Э. Савеловой посвящена исследованию различных конфигураций систем газодинамических разрывов с учетом энерговыделения. Основное внимание в диссертации уделяется разработке и реализации приближенно-аналитических методов исследования ударно-волновых структур с использованием модели Чепмена-Жуге. Результаты также подкреплены численным моделированием в пакете ANSYS Fluent с применением однотемпературной модели неравновесных химических реакций.

**Структура работы и основные результаты.** Диссертация состоит из Введения, трех глав, Заключения, списка литературы и Приложения. Во Введении приведен подробный обзор современного состояния вопроса, а также общая характеристика работы. Первая глава является вспомогательной и содержит определения основных понятий и терминов, описание используемых подходов и моделей. Вторая и третья главы представляют основные содержательные результаты исследования. К ним относятся: 1) Приближенно-аналитическая модель ударно-волновой структуры течения с маховским отражением, в том числе при наличии импульсного энерговыделения и изменения химического состава газовой смеси на главном скачке. Энерговыделение задается в рамках модели Чепмена-Жуге, изменение состава регулируется варьированием показателя адиабаты, который принимается постоянным до и после скачка уплотнения. 2) Оптимизация ударно-волновой структуры регулярного отражения. 3) Анализ влияния импульсного энерговыделения и изменения показателя адиабаты на размер маховского скачка; изучение возможности реализации маховского отражения в условиях, когда при невозможности импульсного энерговыделения косой скачок

33-06-1223 от 11.12.2024

может отражаться только регулярно. 4) Анализ неоднозначности решений для ударно-волновых структур маховского отражения.

Результаты, полученные в главах 2 и 3 диссертации, являются **новыми**. Обоснованность научных положений и выводов не вызывает сомнений. **Достоверность** полученных результатов подтверждается применением строгого математического аппарата газовой динамики и хорошим совпадением результатов расчета по предложенным приближенно-аналитическим моделям с результатами численного моделирования. **Теоретическое значение** состоит в создании приближенно-аналитических моделей для описания ударно-волновых структур с маховским отражением и энерговыделением, анализе неоднозначности решений для случая тройных конфигураций с отрицательным углом наклона отраженного скачка. **Практическая ценность** заключается в создании методики оптимизации ударно-волновых структур с целью снижения динамической и тепловой нагрузки на объекты, а также разработке простой модели для быстрой оценки параметров течения в системе газодинамических разрывов с учетом объемного выделения энергии.

По диссертации имеются следующие **замечания**.

1. Есть замечания по выбранному стилю изложения, особенно это касается наиболее объемной главы 2. В данной главе а) совсем не обсуждаются модели с энерговыделением, что несколько противоречит названию диссертации; б) материал представлен таким образом, что трудно выделить, какие результаты получены непосредственно автором, а какие – в более ранних работах. Очевидно, что ряд уравнений был выведен раньше, т.к. даются ссылки на работы других авторов. Сложно понять, что конкретно автор имеет в виду под «разработанной приближенно-аналитической» моделью, так как уравнения модели «размазаны» по всей главе. Было бы полезно написать один короткий параграф, в котором полностью сформулировать модель и алгоритм ее реализации (такой алгоритм представлен в п.2.2.7, но не указано, к каким конкретно уравнениям он применяется).
2. Основные уравнения аналитических моделей – это алгебраические уравнения третьего и более высоких порядков, имеющие соответствующее число корней. Как конкретно выбираются корни уравнений? Число вещественных корней обсуждается только применительно к уравнению (2.5). Проводилось ли исследование типов корней в общем случае? Что если имеется несколько вещественных положительных корней?
3. Имеется ряд вопросов к постановке задачи, решаемой численно в ANSYS Fluent: нет информации о внешних силах и о том, как задается величина  $S_h$  в системе (3.48); обязательно ли в расчете учитывать силу тяжести? Уравнения химической кинетики (3.49) и (3.53) описывают одно и то же, зачем приводить их дважды и которое из них используется?
4. В приближенном расчете по аналитической модели и при численном моделировании в ANSYS Fluent решаются разные задачи. В первом случае отсутствует вязкость, а

химия – равновесная, т.к. реакции происходят мгновенно. Во втором рассматривается вязкая жидкость, при этом химические реакции – неравновесные (имеют конечную скорость). Насколько корректно сравнивать результаты?

5. Имеются замечания редакционного плана: а) на стр. 6 утверждается «по мере увеличения числа Кнудсена (приближения модели разреженного газа к модели сплошной среды)» – должно быть наоборот, сплошная среда соответствует малым  $Kn$ ; б) в уравнении (1.14) появляется  $\gamma_3$ , хотя в этом параграфе рассматривается одиночный скачок уплотнения с показателем адиабаты  $\gamma_1$  за скачком; в) имеются опечатки и несогласованные предложения: стр. 55 – «в невязком ... потоке невязкого газа», стр. 136 – «безразмерный импульсный энерговыделение» и др.

Данные замечания не снижают ценности диссертационной работы в целом. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, вносит заметный вклад в газовую динамику сверхзвуковых течений. Результаты представляют научный и практический интерес. Результаты диссертационной работы опубликованы в 27 работах. Из них 2 – в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК, 8 – в рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и SCOPUS, 17 – в материалах конференций, индексируемых в РИНЦ. Результаты прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях.

Диссертация Савеловой Карины Эдуардовны на тему «Регулярное и маховское отражение газодинамических разрывов с энерговыделением» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Савелова Карина Эдуардовна 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.

Председатель диссертационного совета  
Доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующая кафедрой гидроаэромеханики СПбГУ

Кустова Е.В.

05.12.2024

