

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной и
инновационной деятельности
Томского государственного университета



А.Б. Ворожцов

12 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
на диссертацию **Савеловой Карины Эдуардовны**
на тему «**Регулярное и маховское отражение газодинамических разрывов с
энерговыведением**», представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
«1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность темы диссертационного исследования

В настоящее время у нас в стране и в ряде экономически развитых странах за рубежом активно ведутся работы по проектированию и отработке ряда новых эффективных двигательных установок, для полетов с высокими скоростями (например, прямоточных воздушно-реактивных двигателей, гиперзвуковых летательных аппаратов и др.). Эти работы осуществляются по ряду направлений. Одним из них, является проработка усложненных схемно-компоновочных решений по газодинамическим тракта этих установок. В результате газовая динамика в них, как правило, носит пространственный характер и включает много газодинамических разрывов различных видов. Кроме того, в поле течения могут происходить ряд химических реакций, локальные подводы тепла, что в итоге приводит к изменению химического состава газа.

Для учета этих процессов при проектировании установок в настоящее время используется математическое и физическое моделирование, позволяющее исследовать закономерности газодинамических процессов и

прогнозировать у них локальные и интегральные характеристики.

В последнее время, не уменьшая роль физического моделирования, в связи с интенсивным развитием вычислительных технологий и ростом быстродействия вычислительных систем, акцент делается на математическое моделирование газодинамических характеристик. Для этого созданы и совершенствуются пакеты прикладных программ и ряд авторских программ, различного уровня сложности, основанные на различных численных алгоритмах.

Несмотря на относительно большой период изучения газодинамических процессов в различных установках и накопленный опыт по газодинамическим закономерностям в них, перспективное проектирование требует решения новых возникающих задач и совершенствованию физико-математических моделей и соответствующего программного обеспечения.

Можно отметить, что наличие в поле течения сильных разрывов приводит к понижению точности сквозных расчетов в таких областях. Для улучшения качества расчетов возможен подход путем аккуратного выделения разрывов и уточнением параметров потоков с использованием условий на них.

В связи с вышеизложенным, диссертационная работа Савеловой Марины Эдуардовны, посвященная реализации методов решения газодинамических течений при сложных ударно-волновых процессах и аналитическому и численному исследованиям с их помощью особенностей газодинамики с учетом подвода тепла, изменением химического состава и других свойств является несомненно актуальной.

Общая характеристика структуры и содержания диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения А. Общий объем работы – 176 страниц, список использованных источников и литературы включает 142 наименования.

Во введении приведен обзор работ по теме диссертации, отмечены актуальность работы, степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования, методы исследования, изложены научная новизна, практическая значимость полученных результатов, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов исследований.

В первой главе диссертации изложены основные соотношения газовой динамики, выполняющиеся на разрывах различных типов. Глава разбита на пять параграфов. В первом параграфе рассмотрены прямой и косой скачки уплотнения. Выписаны известные основные соотношения, связывающие параметры течения до и после поверхностей разрывов. Во втором параграфе анализируется скачок уплотнения с учетом импульсного энерговыделения и трансформации химического состава газа. Используется простая модель стационарной детонации и соотношения Чепмена-Жуге. Она позволяет уточнить соотношения на разрывах для рассмотренных усложненных физических процессов. В третьем параграфе акцент сделан на подробном рассмотрении скачков уплотнения с тройной конфигурацией. Приведена их классификация и рассмотрены особенности газодинамических разрывов при различных условиях течения. Анализ квазиодномерного течения при наличии скачка приведен в следующем параграфе. Отмечено, что для такого течения можно получить конкретные результаты с использованием соотношений для газодинамических функций. В последнем параграфе этой главы записаны соотношения для волны Прандтля-Майера. Они хорошо известны, и успешно применяются для различных прикладных задач газовой динамики (истечение из сопла, обтекание точки излома контура сопла и т.д.). Отмечается, что результаты этой главы являются основой, при исследовании течений в последующих главах.

Во второй главе представлены результаты теоретического анализа ударно-волновых систем и структур при сверхзвуковом течении идеального газа. Она структурно разбита на три части. В первой части изучено регулярное отражение косых скачков уплотнения т бегущих ударных волн. Отмечено, что

в работе соискателя с соавторами получена аналитическая зависимость, позволяющая рассчитывать параметры статического давления и температуры газа за точкой отражения скачка заданной интенсивности. Показано, что эта зависимость имеет немонотонный вид и поэтому и механические и тепловые нагрузки за отраженной ударной волной от угла наклона преграды тоже являются немонотонными. Это позволяет определить их минимальные значения, что важно для прикладных задач, в частности в задачах взрывозащиты. Во второй части этой главы предложена новая приближенно-аналитическая модель ударно-волновой структуры течения с маховским отражением скачков уплотнения. Её основой явился опыт решения ряда задач по интерференции газодинамических разрывов (в частности, сотрудниками известной научной школой В.Н. Ускова). Достоинством этой модели является достаточно быстро по времени определить размеры маховского скачка уплотнения и форму тангенциального разрыва, который разделяет потоки за главным и отраженным скачками. Приведен подробный алгоритм расчета по этой методике, результаты расчетов и экспериментальная верификация. Продемонстрировано, что результаты расчетов на её основе для сверхзвукового перерасширенного струйного течения и для течения в сужающемся канале имеют высокую точность. В третьей части выполнено исследование по неоднозначности решений для ударно-волновых структур, которые образуются в течениях с высокими сверхзвуковыми скоростями при уменьшенных значениях показателя адиабаты. Известно, что ряд неравновесных процессов, происходящих в газе, приводит к уменьшению значения показателя адиабаты. Поэтому, важно иметь оценки, как эти неравновесные процессы будут влиять на ударно-волновую структуру и на локальные и интегральные характеристики потока.

Глава 3 тоже состоит из трех параграфов. Первый параграф посвящен исследованию ударно-волновых структур в сверхзвуковых потоках с учетом импульсного энерговыделения и изменением показателя адиабаты газа за маховским скачком. Известно, что неравновесные процессы, происходящие в

газе (химические, многофазные), приводят к уменьшению её величины. Результаты исследований показали, что влияние этих дополнительных эффектов на газодинамическую структуру течения, описанную в предыдущей главе, увеличивает область маховского отражения при большем диапазоне изменения чисел Маха. Кроме того, отмечается, что учет энерговыделения за главным скачком может приводит к смещению тройных конфигураций маховского отражения («сдвиг критерия фон Неймана») и возникновению маховского отражения даже для слабых падающих скачков уплотнения. Во втором параграфе изложена, новая приближенно-аналитическая модель для оперативного (быстрого) определения параметров ударно-волновой структуры течения. Она адаптирована для расчетов реакционной газовой смеси с маховским отражением и при наличии импульсного энерговыделения и изменения химического состав на главном скачке. Выполнены расчеты для нескольких газовых смесей (метановоздушной, водородовоздушной, водородокислородной) в сверхзвуковых струйных течениях. Результаты расчетов показывают некоторые новые качественные явления в потоке, по сравнению с течениями, без учета рассмотренных дополнительных эффектов. Так, отмечается, что маховское отражение начинается раньше, а геометрические размеры главного скачка несколько увеличиваются. Верификация предложенной и реализованной приближенно-аналитической модели было выполнено путем сравнения с результатами аналогичных расчетов на основе широко используемого программного пакета ANSYS Fluent. Результаты сравнения безразмерной длины маховского скачка по предложенной методики и результатами расчетов по пакету качественно совпадают и количественно являются вполне удовлетворительными. Выполнены также сравнения с результатами работы Троцок А.В и др. (2006 г.) тоже показали работоспособность предложенной диссертантом приближенно-аналитической модели. В заключительном параграфе диссертации обсуждена возможность практического применения результатов диссертационной работы для анализа сложной ударно-волновой системы при

проектирования комбинированного воздушно-реактивного двигателя (предложенного автором с её научным руководителем) с детонационным режимом горения. Такие типы двигателей в последнее время подробно исследуются для практического применения. Особенностью рассмотренного соискателем двигателя является использование потоков газов, разделенных тангенциальным разрывом за тройной точкой маховского отражения при различных термодинамических циклах.

В заключении сформулированы итоговые результаты и выводы полученные диссертантом в процессе выполнения работы.

Научная новизна результатов диссертационной работы

1. Получены аналитические зависимости, позволяющие определять минимальные динамические и термические нагрузки на обтекающую сверхзвуковым потоком газа поверхность, путем подробного анализа ударно-волновой структуры при регулярном отражении скачков уплотнения, ударных и взрывных волн. Кроме того, для таких структур выполнен анализ возможных областей неоднозначных решений.

2. Оценены условия существования тройных конфигураций скачков уплотнения и их анализ, образующихся при маховском отражении с импульсным энерговыведением и изменением химического состава смеси на главном скачке.

3. Показано, что при таких условиях существует возможность нерегулярного отражения скачков уплотнения, которые при обычных условиях отражаются регулярно. Кроме того, отмечено, что наличие импульсного энерговыведения смещает критерий фон Неймана в область более слабых скачков.

4. Разработана и реализована приближенно-аналитическая модель течения с маховским отражением, которая, по-видимому, впервые учитывает импульсное энерговыведение и изменения химического состава смеси на главном скачке.

5. На основе этой модели впервые выполнен аналитический и численный анализ основных закономерностей динамики ударно-волновой структуры течения. Отмечено, что для таких структур значительно увеличивается размер главного скачка уплотнения, по сравнению с маховским отражением для инертной среды.

Практическая ценность диссертационной работы

1. Результаты анализа ударно-волновой структуры регулярного отражения при сверхзвуковом обтекании тел позволил разработать методологию получения условий, когда динамические и термические нагрузки на тело будут минимальными. Эту методологию можно использовать для оптимизации степени нагрузок для прорабатываемых изделий.

2. Полученную в работе неоднозначность решений для ударно-волновых структур маховского отражения необходимо учитывать при газодинамическом проектировании различных технических систем (воздухозаборники, сопловые блоки и т.п.).

3. Предложенная и адаптированная новая модель приближенно-аналитическая модель, позволяющая в экспресс-режиме оценивать параметры ударно-волновой структуры маховского отражения, учитывающая импульсное энерговыделение и изменение химического состава газа на главном скачке, может быть использована при проектировании различных технических устройств, в частности, перспективных прямоточных воздушно-реактивных двигателей, в которых планируется использовать детонационные эффекты и соответствующий термодинамический цикл Фикера-Джейкобса.

4. Полученные аналитические зависимости для ударно-волновых структур могут быть использованы для тестирования различных численных алгоритмов.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы

Степень обоснованности и достоверности полученных результатов позволяет утверждать, что результаты диссертации получены с использованием основных законов и соотношений газовой динамики.

Выполнены основные требования к достоверности результатов. Проведено сравнение полученных аналитических результатов с результатами численных расчетов с использованием более сложной модели среды (вязкой, турбулентной) и с результатами, полученными другими авторами. Все сравнения подтверждают достоверность результатов исследования.

Уровень апробации результатов диссертации (публикации в международных научных журналах и выступления на конференциях) – соответствует требованиям ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и достаточно полно отражает результаты исследований.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе исследования выполнены в рамках модели идеального газа. Однако, при верификации предложенной авторами приближенно-аналитической модели сравнение проводится с результатами, полученной диссертантом по пакету ANSYS FLUENT на основе вязкой турбулентной модели. На сколько корректное такое сравнение, и почему расчет по пакету не выполнен в рамках идеального газа?

2. В работе представлен широкий спектр задач с тройными конфигурациями скачков уплотнения. Но почему то, диссертант не обратил внимание на сложную ударно-волновую структуру при натекании сверхзвуковой струи на преграду при разных углах. Этой задаче уделяется большое внимание и получено много результатов и экспериментальных и теоретических исследований. Можно было провести сравнения с вашей моделью.

3. В целом работа оформлена хорошо. Структурно её, наверное, можно было улучшить, если часть известных соотношений перенести в приложение (например, из 1 главы). В работе часто используются термины качественного характера (например, малым показателем адиабаты (стр. 80), заданной интенсивности и т.д.). Желательно конкретизировать такие параметры и где возможно приводить их граничные значения. Имеются небольшие опiski (например, на стр. 21, 26, 48).

Сделанные замечания не уменьшает высокую оценку результатов диссертационной работы Савеловой К.Э. Исследование выполнено на высоком научном уровне, результаты, представленные на защиту и выводы по работе обоснованы.

Заключение

Диссертация Савеловой К.Э. соответствует отрасли «физико-математические науки», а по своей цели, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне данная диссертационная работа соответствует пунктам «б» и «8» паспорта специальности «1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа **Савеловой Карины Эдуардовны «Регулярное и маховское отражение газодинамических разрывов с энерговыделением»** является завершённым научным исследованием, 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.

Диссертация и отзыв на неё заслушан и утверждён на расширенном заседании НТС отдела математической физики НИИ ПММ ТГУ (протокол № 2 от 06.12.2024).

Отзыв подготовили:

Заведующий лабораторией проектирования
рабочих элементов ракетно-космической
техники НИИ ПММ ТГУ,
доктор физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),

профессор



Глазунов Анатолий Алексеевич

Заместитель директора по НИР НИИ ПММ ТГУ,
заведующий лабораторией математической физики НИИ ПММ ТГУ,
кандидат физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),



Еремин Иван Владимирович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
государственный университет» (НИ ТГУ, ТГУ)

Адрес: Российская Федерация, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Контактные телефоны: 8 (3822) 529-585

Адрес электронной почты: rector@tsu.ru

Адрес официального сайта в сети «Интернет»: <https://www.tsu.ru>

09.12.2024

Подписи Глазунова А.А. и Еремина И.В. удостоверяю

Ученый секретарь Ученого совета НИ ТГУ



Подпись удостоверяю
Ведущий документовед
Андрienko И. В.

Н.А. Сазонтова