

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана

Математико-механического факультета

Дмитрий Вадимович Луцив

(подпись)

(инициалы, фамилия)

« 26 »

июль

2024 г

М.П.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

По итогам рассмотрения и обсуждения  
диссертации Савеловой Марины Эдуардовны,

(ф.и.о. соискателя учёной степени)

представленной на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

ученая степень

по теме «Регулярное и маховское отражение скачков уплотнения с энергосвободением»

(тема диссертации)

по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

шифр и наименование научной специальности (научных специальностей)

и выполненной на кафедре «Плазмогазодинамика и теплотехника» (А9) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

(год представления – 2024)

наименование организации и год представления

а также представленных соискателем научных публикаций, в которых излагаются основные научные результаты диссертации, приняты следующие решения, замечания и рекомендации:

Диссертация Савеловой Марины Эдуардовны посвящена решению актуальной задачи аналитического и численного исследования течений реакционноспособной газовой смеси с большими сверхзвуковыми скоростями, при которых оказывается возможным энергосвободение и изменение химического состава газовой смеси ввиду детонационных явлений, инициированных резким повышением температуры на сильных скачках уплотнения в возникающих ударно-волновых системах. Автором аналитически определены условия возникновения маховского отражения при возможности энергосвободения и изменения химического состава газа на главном скачке, создана приближенно-аналитическая модель для быстрой оценки параметров ударно-волновой структуры и поля течения в целом, сделаны практически важные выводы по результатам ее применения.

Актуальность работы обусловлена развитием авиационной и ракетно-космической техники, созданием перспективных двигательных установок летательных аппаратов для полётов с большими сверхзвуковыми скоростями. Ввиду этого становятся необходимыми



исследования взаимодействия газодинамических разрывов в сверхзвуковых потоках реакционноспособных газовых смесей, анализ поля течения и оптимизация образующихся ударно-волновых систем и структур, быстрая оценка новых аэродинамических схем и перспективных конструкций реактивных двигателей.

Работа содержит 176 страниц и состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы.

Первая глава содержит описание математических моделей, применяемых для аналитического и численного исследования основных элементов исследуемых ударно-волновых структур, таких как прямые и косые скачки уплотнения (в том числе с импульсным энерговыделением и изменением химического состава газа, описываемых в рамках модели стационарной детонации Чепмена–Жуге), тройные конфигурации этих скачков, волны разрежения и сжатия Прандтля–Майера, в том числе отделенные тангенциальным разрывом от области дозвукового течения. Приведенный математический аппарат применяется при решении исследовательских задач во второй и третьей главах диссертации.

Вторая глава посвящена исследованию ударно-волновых систем в сверхзвуковых потоках совершенного газа без возможности энерговыделения и химических реакций. Исследовано экстремальное (достигающее минимальные динамические и термические нагрузки при заданных ограничениях) регулярное отражение скачков уплотнения, путем обращения движения показана значимость полученного результата в задачах взрывозащиты. На основе решения ряда частных задач интерференции газодинамических разрывов, ранее полученных В.Н. Усковым и его учениками, разработана новая модель для быстрой оценки параметров ударно-волновой структуры маховского отражения. Исследована неоднозначность ударно-волновых структур, возникающих в течениях с большими сверхзвуковыми скоростями и пониженными (по сравнению с двухатомными газами) показателями адиабаты.

Третья глава посвящена исследованию изменения ударно-волновых структур, возникающих в течениях с маховским отражением при возможности энерговыделения и изменения химического состава газа на главном скачке. Исследованы условия существования тройных конфигураций маховского отражения, выявлено их смещение («сдвиг критерия фон Неймана») при наличии энерговыделения и уменьшения показателя адиабаты газовой смеси на главном скачке. Приближенно-аналитическая модель течения с маховским отражением, разработанная во второй главе, обобщена на течения с энерговыделением и химическими реакциями, применена к их исследованию. Предложено практическое применение полученных теоретических результатов к задачам реактивного двигателестроения в современной аэрокосмической технике.

#### **Наиболее значимые научные результаты, полученные автором лично:**

1. Аналитически найдены параметры ударно-волновой структуры регулярного отражения, которые позволяют существенно снизить не только динамически, но и тепловые нагрузки на тела, подвергающиеся ударно-волновому воздействию при аэродинамической интерференции, а также (при обращении движения) – на объекты воздействия бегущих ударных (в том числе взрывных) волн.

2. Аналитически и численно установлены условия неоднозначности решений для ударно-волновых структур маховского отражения (включая тройные конфигурации маховского отражения с отрицательным углом наклона отраженного скачка). Показано, что установленная неоднозначность решений может привести к практической нереализуемости или неустойчивости конфигураций маховского отражения с отрицательным углом наклона отраженного скачка.

3. Построена приближенно-аналитическая модель ударно-волновой структуры течения с маховским отражением при наличии импульсного энерговыделения и



изменения химического состава газовой смеси на главном скачке, которая позволяет достаточно точно и достоверно оценить основные параметры течения, включая размер главного (маховского) скачка.

4. Обнаружено, что возможность импульсного энерговыделения на главном скачке маховского отражения (в установленных пределах существования решения) приводит к существенному увеличению размеров маховского скачка, а также к теоретически возможной реализации маховского отражения в условиях, когда при отсутствии импульсного энерговыделения реализуется только регулярное отражение. Влияние изменения химического состава смеси (изменения её показателя адиабаты) на высоту главного скачка и другие параметры ударно-волновой структуры является фактором, существенно более слабым.

### **Научная новизна работы**

Впервые аналитически описаны области неоднозначности решения для ударно-волновых структур, возникающих при отражении косых скачков уплотнения в течениях с большими числами Маха и сниженными показателями адиабаты.

Впервые выявлено смещение условий существования («сдвиг критерия фон Неймана» в сторону более слабых скачков) тройных конфигураций скачков уплотнения, возникающих при маховском отражении с энерговыделением и изменением химического состава смеси на главном скачке.

Впервые разработана приближенно-аналитическая модель течения с маховским отражением при наличии импульсного энерговыделения и изменения показателя адиабаты газовой смеси на главном скачке.

Впервые аналитически найдены закономерности изменения ударно-волновой структуры маховского отражения (в частности, увеличение геометрических размеров главного скачка) в условиях импульсного энерговыделения на главном скачке уплотнения.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что в работе проведён теоретический анализ неоднозначности решений для ударно-волновых структур, возникающих при отражении косых скачков уплотнения в течениях с большими числами Маха и сниженными показателями адиабаты; разработана новая приближенно-аналитическая модель течения с маховским отражением, позволяющая провести теоретический анализ течений с энерговыделением и изменением химического состава газовой смеси исключительно на главном (маховском) скачке; проведен анализ влияния детонационного энерговыделения и изменения показателя адиабаты газовой смеси на реализуемость маховского отражения, высоту главного (маховского) скачка уплотнения и другие параметры образующейся при этом ударно-волновой структуры.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что результаты проведенной оптимизации ударно-волновой структуры по критериям динамической и термической нагрузки на объект воздействия позволяют существенно снизить динамические и тепловые нагрузки на аэродинамические поверхности и объекты воздействия взрывных волн. Проанализированная неоднозначность решений должна учитываться при газодинамическом проектировании сверхзвуковых воздухозаборников, планеров летательных аппаратов и других технических объектов. Разработанная модель быстрой оценки параметров ударно-волновой структуры маховского отражения с возможным импульсным энерговыделением и изменением химического состава газа на главном скачке может быть использована при проектировании перспективных воздушно-реактивных двигателей.

### **Степень достоверности результатов**



Достоверность полученных результатов обеспечивается применением хорошо апробированного математического аппарата классической газовой динамики, динамики детонационных волн, условий совместности на газодинамических разрывах и решений классических задач об их взаимодействии, в том числе полученных научной школой В.Н. Ускова в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Данные теоретического анализа и численного моделирования, проведенного автором работы, взаимно верифицируют друг друга. Доступные численные и экспериментальные данные других отечественных и зарубежных авторов также подтверждают достоверность полученных результатов.

### **Апробация результатов**

Результаты научных исследований Савеловой К.Э. по теме диссертации представлены на 24 всероссийских и международных конференциях, других научно-технических мероприятиях и опубликованы в 27 работах по теме исследования, из которых 8 статей опубликованы в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science (1 статья издана в журнале, входящем в Q1 согласно SJR и WoS). Научные исследования диссертанта выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Создание и научное обоснование методологии аэрогазодинамического проектирования общего облика двигательных и энергетических установок, технологий разработки и массового производства беспилотной аэрокосмической техники для решения задач в экстремальных условиях и чрезвычайных ситуациях», № FZWF-2024-0003).

Считаем, что диссертация Савеловой Марины Эдуардовны на тему «Регулярное и маховское отражение скачков уплотнения с энерговыделением» содержит новые результаты, направленные на решение важной научной проблемы нерегулярного взаимодействия газодинамических разрывов (в частности, маховского отражения скачков уплотнения) с энерговыделением, связанной с динамикой высокоскоростных течений реакционноспособных газовых смесей с возникающими при этом разветвленными ударно-волновыми структурами.

Работа хорошо оформлена, удовлетворяет всем необходимым требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, и рекомендуется к защите по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Нарушения со стороны Савеловой Марины Эдуардовны

ФИО соискателя

п. 11 Приказа СПбГУ от «19» ноября 2021 г. № 11181/1 не выявлены

(не выявлены, выявлены)

и Приказа СПбГУ от 03.07.2023 г. № 9287/1 не выявлены

(не выявлены, выявлены)

Все основные выносимые на защиту научные материалы диссертации опубликованы  
(либо указать исключения)

в представленных соискателем статьях в рецензируемых научных изданиях.

Коллектив сотрудников кафедры гидроаэромеханики СПбГУ

наименование подразделения

рекомендовал

рекомендовал / не рекомендовал / рекомендовал при условии устранения замечаний

диссертацию Савеловой Марины Эдуардовны

ФИО соискателя

по теме «Регулярное и маховское отражение скачков уплотнения с энерговыделением»

тема диссертации

к защите на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

ученая степень

по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы  
шифр и наименование научной специальности (научных специальностей)

При проведении голосования коллектива сотрудников Кафедры гидроаэромеханики  
(протокол заседания № 44/8/6-02-1 от 24.06.2024) в количестве 8 человек,  
участвовавших в заседании из 11 человек штатного состава:

Проголосовали «за»: 8,

«против»: 0,

«воздержались»: 0.

Подписал: профессор

*(должность)*

Кафедры гидроаэромеханики

*(наименование структурного подразделения)*

д.ф.-м.н.

*(ученая степень)*

профессор

*(ученое звание)*



*(подпись)*

А. Н. Рябинин / 24.06.2024

*Расшифровка подписи, дата*