

0- 798554

На правах рукописи

Галимов Ринат Насихович

**Теоретическое исследование ударноволновых и автоволновых
газодинамических структур в тепловыделяющих стационарно-
неравновесных средах**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2012

Работа выполнена на кафедре физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель

доктор физико-математических наук, профессор, **Молевич Нонна Евгеньевна**

Официальные оппоненты:

Губайдуллин Дамир Анварович, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт механики и машиностроения» Казанского научного центра Российской академии наук, директор;

Волов Вячеслав Теодорович, доктор физико-математических наук, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент ГАН РАО, федеральное агентство железнодорожного транспорта «Самарский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой «Физика и экологическая теплофизика».

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур РАН».

Защита состоится «27» декабря 2012 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.081.11 при ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, ауд. мех. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

Автореферат разослан 23 ноября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к. ф.-м.н., доц.



Саченков А.А.

Общая характеристика работы

Актуальность. Традиционно в газовой динамике рассматриваются вопросы формирования нелинейных структур различного типа. Анализ соответствующих задач в равновесных средах проведен весьма подробно. Гораздо менее исследованной является структура газодинамических возмущений в стационарно неравновесных средах, в которых неравновесность какой-либо природы возникает в результате внешнего воздействия на эти среды, например, при наличии в среде распределенного источника тепловыделения.

Существенный вклад в область газовой динамики неравновесных сред внесли такие ученые Я.Б. Зельдович, Г.Г. Черный, В.Е. Фортов, С.А. Лосев, А.И. Осипов, Ю.П. Райзер, Э.Е. Сон, В.А. Битюрин, К.В. Краснобаев, В.Т. Волов и др. В частности Я.Б. Зельдович исследовал ударные адиабаты в релаксационном газе, а в работе В.Т. Волова была доказана предельная энергетическая теорема, на основе которой показано, что условная траектория сильной ударной волны в P - V координатах имеет вогнутый характер. Экспериментальным и теоретическим исследованием газодинамических возмущений в неравновесных газо-плазменных сред занимались А.И. Климов, Г.И. Мишин, А.А. Рухадзе, Ф.В. Шугаев, А.С. Барышников, S.O. Macheret, B.N. Ganguly и многие другие ученые.

Исследования в области газодинамики неравновесных сред привели к созданию нового интенсивно развивающегося направления – плазменной аэродинамики. Важной прикладной задачей плазменной аэродинамики является создание так называемой «плазменной оболочки» самолёта – включения в систему управления самолетом технологии искусственно создаваемого управляемого потока плазмы на крыле. Для развития идеи «плазменной оболочки» необходимо детально разобраться в механизмах, приводящих к модификации структуры ударной волны в неравновесной газоплазменной среде. Помимо развития плазменной аэродинамики, интерес к исследованию особенностей структуры газодинамических возмущений и, в частности, ударных волн в стационарно неравновесных средах связан с широкой их распространённостью в других практически важных приложениях - термодинамически неравновесные газоплазменные среды являются рабочими средами для лазеров, различного рода реакторов, плазменных установок, в которых стабильность и выбор оптимальных режимов работы во многом зависит от их газодинамических свойств. Такие среды существуют и в естественных условиях. К ним относятся, например, неравновесные верхние слои атмосферы, грозовые облака с неравновесной конденсацией, околосветовые и межзвездные среды.

В области неравновесной газовой динамики существуют многочисленные экспериментальные работы, посвященные исследованию ударно-волновых структур. В этих работах отмечается существенное изменение структуры ударных волн, в частности, такие эффекты, как усиление и ускорение ударных

волн, изменение структуры фронта и его расщепление, генерация предвестника в виде импульса перед фронтом ударной волны, увеличение отхода ударной волны при обтекании тела сверхзвуковым потоком неравновесного газа, уменьшение теплового потока на обтекаемое тело по сравнению с равновесным случаем, а также изменение коэффициента сопротивления.

Теоретическое объяснение большинства наблюдаемых эффектов весьма неполно. Структурные изменения ударных волн в неравновесных средах могут быть связаны с существенно новыми вязкостно-дисперсионными свойствами этих сред. В неравновесных средах при определенных условиях дисперсия скорости звука, вторая вязкость и низкочастотный коэффициент газодинамической нелинейности становятся отрицательными. Вследствие этого неравновесные среды могут быть акустически неустойчивыми. Ранее было исследовано влияние вязкостно-дисперсионных свойств неравновесных сред на структуру и эволюцию слабых ударных волн при условии малой дисперсии в среде с экспоненциальной моделью релаксации. Было получено нелинейное уравнение, описывающее возмущения малой конечной амплитуды, исследованы его решения. На основе этого уравнения найдены условия существования автоволны импульсного типа в такой среде. Определен вид равновесной ударной адиабаты, показана возможность существования ударноволновой структуры с детонационным типом профиля плотности и давления.

Однако для данной модели неравновесной среды остаются открытыми вопросы о влиянии новых вязкостно-дисперсионных свойств на структуру и эволюцию ударных волн большей амплитуды при различных степенях неравновесности, в том числе в сильно диспергирующих областях. Также мало исследованной остаётся структура и устойчивость газодинамического возмущения в тепловыделяющих средах с неравновесной химической реакцией, а также в средах с продольными градиентами термодинамических параметров.

Описанные выше проблемы делают актуальной тему диссертационного исследования, ее цель и основные задачи.

Целью диссертации является теоретическое исследование условий существования и устойчивости различных типов ударных волн и автоволновых газодинамических структур в тепловыделяющих стационарно-неравновесных средах.

В соответствии с поставленной целью определены **основные задачи диссертации:**

1. Исследовать структуру и эволюцию газодинамических возмущений малой конечной амплитуды в таких тепловыделяющих стационарно неравновесных средах, как химически активная газовая смесь с обратимой химической реакцией и внешними источниками энергии и реагентов, среда с обобщенным источником тепловыделения, зависящим от плотности и температуры, а также слабонеоднородный поток газа с распределенным тепловыделением при условии слабой дисперсии в этих средах.

2. Получить и исследовать возможные типы стационарных ударноволновых и автоволновых структур в тепловыделяющей стационарно неравновесной среде с экспоненциальной моделью релаксации при различных скоростях распространения этих структур и различных степенях неравновесности среды.

3. Определить условия гидродинамической устойчивости полученных стационарных ударноволновых и автоволновых структур.

4. С помощью численного моделирования эволюции газодинамических возмущений исследовать эволюционную устойчивость полученных ударных волн и автоволновых газодинамических структур.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Получено и исследовано дисперсионное соотношение для возмущений химически неравновесной среды с обратимой химической реакцией, неравновесность которой поддерживается внешним объемным источником одного из реагентов. Найдены области параметров, при которых дисперсия скорости звука становится отрицательной, а среда акустически неустойчива.

2. Получены нелинейные уравнения, описывающие эволюцию слабых ударных волн и малых газодинамических возмущений малой, но конечной амплитуды и произвольного спектра для химически неравновесной среды с обратимой химической реакцией, неравновесность которой поддерживается внешним объемным источником одного из реагентов, и среды с обобщенным источником тепловыделения, зависящим от плотности и температуры. Показано, что эти уравнения с точностью до коэффициентов совпадают с аналогичным уравнением для тепловыделяющей стационарно-неравновесной среды с экспоненциальной моделью релаксации.

3. Получены нелинейные уравнения, описывающие распространение малых газодинамических возмущений скорости, плотности, давления и температуры в слабонеоднородном потоке газа с распределенным источником тепловыделения. Найдены поправки к инкрементам этих величин, связанные с неоднородностью среды. Найденные поправки различны для возмущений различных величин и зависят от направления распространения возмущения.

4. Определены возможные типы профилей и произведено исследование гидродинамической и эволюционной устойчивости стационарных ударных волн произвольной амплитуды в тепловыделяющей стационарно-неравновесной среде с экспоненциальной моделью релаксации. В исследуемой среде существует два типа ударных волн и три типа автоволновых газодинамических структур, определены условия их генерации. Построены бифуркационные диаграммы для структурных изменений профилей давления (плотности) и температуры стационарных ударных волн и автоволновых структур в зависимости от степени неравновесности и скорости возмущений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Дисперсионное соотношение, вид низкочастотной скорости звука, низкочастотных теплоёмкостей при постоянном объеме и давлении, коэффициента второй вязкости, коэффициентов нелинейности, полученные для

стационарно неравновесной среды с обратимой химической реакцией и внешними источниками энергии и реагентов. Условия Релевской неустойчивости рассматриваемой среды.

2. Новое нелинейное уравнение, описывающее распространение малых газодинамических возмущений в потоке слабо неоднородной тепловыделяющей среды. Поправки к инкременту газодинамических возмущений, связанные с влиянием неоднородности среды.

3. Нелинейные уравнения, описывающие эволюцию слабых газодинамических возмущений произвольного спектра в среде с обобщенным источником тепловыделения и в среде с неравновесной химической реакцией.

4. Классификация типов неперiodических автоволновых и ударно волновых газодинамических структур в неравновесной среде с экспоненциальной моделью релаксации. Новые типы автоволновых газодинамических структур с ненулевой асимптотой, бифуркационные диаграммы структурных изменений профилей давления (плотности) и температуры в зависимости от степени неравновесности среды и скорости структур. Условия устойчивости автоимпульсов, автоволн, ударных волн в рассматриваемой среде.

Практическая и теоретическая ценность проведенных исследований заключается в том, что их результаты могут быть использованы в приложениях, где рабочие среды являются стационарно неравновесными, включая лазерную физику и лазерную технику, плазменную аэродинамику, атмосферную газодинамику и астрофизику. Полученные новые уравнения и описываемые ими новые автоволновые газодинамические структуры, а также условия их эволюционной устойчивости, являются существенным вкладом в область теории газодинамики неравновесных сред.

Достоверность полученных научных результатов обеспечена корректной математической постановкой задач, применением известных апробированных асимптотических методов, совпадением результатов исследований с результатами других авторов при предельном переходе к слабым ударным волнам и малым степеням неравновесности, а также качественным согласием полученных результатов с данными других авторов, включая экспериментальные данные.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 45 работ, в том числе 9 статей в рекомендованных ВАК журналах, 26 тезисов международных конференций, 10 тезисов Всероссийских конференций.

Апробация. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах Самарского государственного аэрокосмического университета, Самарского филиала Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Объединённого института высоких температур РАН, на Демидовских чтениях (Москва 2006), 6-8 Международных конференциях по неравновесным процессам в соплах и струях (Санкт-Петербург 2006, Алушта, Украина 2008, 2010), Семинаре «Современные проблемы аэродинамики» (Сочи, «Буревестник» МГУ, 2006, 2007), International Workshop on Magnetoplasma

Aerodynamics (Москва 2007-2009), Курдюмовских чтениях (Тверь 2007, 2008, 2010, 2011), Сессиях РАО (Нижний Новгород 2007, Москва 2008, 2010), школах-конференциях «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов 2007, 2010), West-East High Speed Flow Field Conference (Москва 2007), 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics (Стокгольм, Швеция 2008), Acoustics'08 Paris (Париж, Франция 2008), 51 научной конференции МФТИ (г. Долгопрудный 2008), «Актуальные проблемы физики» (Звенигород 2008), 27th International Symposium on Shock Waves (Санкт-Петербург 2009), 3rd European Conference for Aerospace Sciences (Версаль, Франция 2009), X «Королевские чтения» (Самара 2009), Школах-семинарах «Нелинейные волны» (Нижний Новгород 2010, 2012), Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (Анталия, Турция 2010), 17th International Congress on Sound & Vibration (Каир, Египет 2010), «Перспективные информационные технологии для авиации и космоса», (Самара 2010), Forum Acusticum 2011 (Ольбург, Дания 2011), 19th и 20th International Shock Interaction Symposium (Москва 2010, Стокгольм, Швеция 2012), 9th European Fluid Mechanics Conference (Roma, Italy, 2012).

Авторский вклад. Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично, либо при его определяющем личном участии, а также были отмечены: медалью и премией РАН в номинации физика и астрономия в 2010 г., стипендией Президента РФ за 2011/2012 гг., грантом поддержки молодых ученых, специализирующихся в области теоретической физики фонда «Династия» 2007-2012 гг, премией победителя в конкурсе Молодой учёный Самарской области 2009 г., стипендией ученого совета Самарского государственного аэрокосмического университета 2007 и 2008 года, дипломом лауреата премии Министерства образования и науки РФ по поддержке талантливой молодежи в 2007 г., дипломом Министерства образования и науки открытого конкурса на лучшую работу студентов по естественным, техническим и гуманитарным наукам в ВУЗах РФ 2008 год, стипендией Правительства РФ 2008/2009 уч. год.

Связь с государственными программами. Работы по теме диссертации выполнялись в соответствии с планами фундаментальных научно-исследовательских работ по программам: Минобрнауки РФ, гос. задание на выполнение работ на 2012-2014 годы, шифр 2.560.2011, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.), ГК №№ П2315, П2450, 14.740.11.0999, 14.740.11.0703, 14.740.11.1140, 14.740.11.0676, 14.B37.21.0767, НИР ГР 01201156352, ГР 01200805605, АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)», проекты 1.1.11, 1.2.08, 2.1.1/309, 2.1.1/13492, грантом РФФИ 12-01-31229мол_а.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Объем работы составляет 161 печатную страницу, содержит 47 рисунков, 1 приложение, список литературы включает 160 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, дан краткий обзор работ по теме исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая ценность полученных результатов, приводятся положения, выносимые на защиту, описана структура и приведено краткое содержание диссертации.

В первой главе исследуются структура и эволюция малых газодинамических возмущений конечной амплитуды в тепловыделяющих стационарно-неравновесных средах с различной природой неравновесности. Рассмотрены три модели тепловыделяющих сред: химически активная неравновесная газовая смесь с обратимой химической реакцией и внешними источниками энергии и реагентов, среда с обобщенной моделью объемного тепловыделения, мощность которого зависит от плотности и температуры, а также модель слабонеоднородного потока газа с распределенным тепловыделением.

В разделе 1.1 исследуется химически активная газовая смесь с обратимой химической реакцией и внешними источниками энергии и реагентов. На основе законов сохранения получена исходная система уравнений, описывающая газовую динамику среды. В этой системе уравнений корректно учтены слагаемые, связанные с внешним притоком чистого реагента и стоком реагирующей смеси, а именно слагаемые, связанные с обменом массой, импульсом и энергией с внешней средой. Показано, что подобный обмен веществом приводит к совершению над системой дополнительной термодинамической работы.

В подразделе 1.1.1 исследуются вязкостно-дисперсионные свойства химически активной смеси. Получены выражения для низкочастотных теплоемкостей при постоянном объеме и давлении, а также выражение для низкочастотной скорости звука. Исследована зависимость этих теплоемкостей от мощности внешнего источника реагента, то есть фактически от степени неравновесности среды. При определенных отклонениях от равновесия, полученные низкочастотные теплоемкости становятся отрицательными. Показано, что в исследуемой системе существует два характерных времени релаксации: одно связано с протекающей в среде обратимой химической реакцией, второе связано с внешним источником реагента. Было введено приведенное время релаксации, которое позволило свести уравнение, описывающее бесконечно малые газодинамические возмущения к аналогичному уравнению для неравновесной среды с экспоненциальной моделью релаксации с точностью до коэффициентов. Исследована устойчивость среды по отношению к малым газодинамическим возмущениям. Определена область таких параметров как тепловой эффект реакции и мощность внешнего источника реагента, в которой вторая вязкость ξ в среде отрицательна, а среда является неустойчивой.

В подразделе 1.1.2 было получено нелинейное уравнение (1), описывающее эволюцию малых газодинамических возмущений конечной амплитуды при условии слабой дисперсии в исследуемой химически неравновесной среде

$$C_{V\infty}\tau_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial t^2} - c_\infty^2 \frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial z^2} - c_\infty^2 \Psi_\infty \left(\frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial z^2} \right)^2 \right) + C_{V0} \left(\frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial z^2} - c_0^2 \Psi_0 \left(\frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial z^2} \right)^2 \right) = 0 \quad (1)$$

где $C_{V\infty}, c_\infty, \Psi_\infty, C_{V0}, c_0, \Psi_0$ - высокочастотные и низкочастотные теплоёмкости при постоянном объеме, скорости звука, коэффициенты газодинамической нелинейности, \tilde{p} - возмущение плотности, τ_0 - время релаксации.

Вид полученного уравнения с точностью до коэффициентов совпадает с аналогичным нелинейным уравнением для стационарно-неравновесной среды с экспоненциальной моделью релаксации (Молевич 1991). При определенном тепловом эффекте химической реакции низкочастотный коэффициент нелинейности может стать отрицательным. При малых тепловых эффектах химической реакции низкочастотный коэффициент нелинейности остается положительным при любых мощностях накачки среды реагентом.

В разделе 1.2 диссертации получено нелинейное уравнение, описывающее эволюцию малых газодинамических возмущений конечной амплитуды при условии слабой дисперсии в среде с обобщенным источником тепловыделения, мощность которого зависит от плотности и температуры. Показано, что вид полученного уравнения также с точностью до коэффициентов совпадает с уравнением (1).

В разделе 1.3 приведены известные решения (Молевич, Макарян 2004) полученного нелинейного уравнения (1) для двух различных моделей сред. Существует два типа эволюционно устойчивых решений в виде стационарных ударных волн с понижением плотности за разрывом и с повышением плотности за разрывом, а также решение в виде автоволнового импульса.

В разделе 1.4 исследуется влияние неоднородности на вязкостно-дисперсионные свойства неравновесных сред. Получены нелинейные уравнения, описывающие эволюцию малых газодинамических возмущений в слабо неоднородном потоке газа с распределенным объемным тепловыделением. Уравнения для возмущений плотности, скорости, давления и температуры имеют различные коэффициенты. Для каждой величины получены поправки к декременту затухания, связанные с неоднородностью

$$G_\varepsilon' = \frac{\mp(-2M_\varepsilon^2 + 2 - \gamma_\varepsilon M_\varepsilon^2 + 2K_2) - M_\varepsilon(1 + \gamma_\varepsilon M_\varepsilon^2 - 2K_1)}{4|1 \pm M_\varepsilon|} \frac{1}{1 - \gamma_\varepsilon M_\varepsilon^2} \frac{1}{T_0} \frac{dT_0}{dx}, \quad (2)$$

где M_ε - число Маха потока, γ_ε - показатель адиабаты среды, K_1, K_2 - числовые коэффициенты, различные для возмущений плотности, скорости, давления и температуры, dT_0/dx - градиент температуры в потоке. В (2) верхнему знаку соответствуют возмущения, распространяющиеся по потоку, нижнему против потока. Условия устойчивости отличаются друг от друга для

различных термодинамических величин и зависят также от направления распространения возмущений.

Во второй главе исследованы установившиеся ударные волны в стационарно-неравновесном газе с экспоненциальной моделью релаксации при различных скоростях волн и степенях неравновесности среды.

В разделе 2.1 получены математические выражения для характерных скоростей, определяющих вид решения уравнения для плотности за фронтом ударной волны, и характерных степеней неравновесности. Существуют три характерные скорости, зависящие от степени неравновесности среды: $D_{cr1}(S)$ и $D_i(S)$ определяют область параметров, при которых существуют решения в виде стационарных ударных волн, $D_{cr2}(S)$ определяет конкретный вид ударноволнового профиля. Также из соотношения $D_{cr1}(S) = D_i(S)$ получено характерное значение степени неравновесности S_c , которое влияет на бифуркации решений, а из условия существования скорости $D_i(S)$ получена степень неравновесности S_n . Ещё одним бифуркационным значением степени неравновесности является пороговая степень неравновесности S_{br} , выше которой дисперсия в среде становится отрицательной, а среда акустически активной.

В разделе 2.2 на основе полученных бифуркационных значений скоростей и степеней неравновесности среды была построена бифуркационная диаграмма зависимости профиля плотности и давления от степени неравновесности среды и скорости стационарной ударной волны (рисунок 1 г).

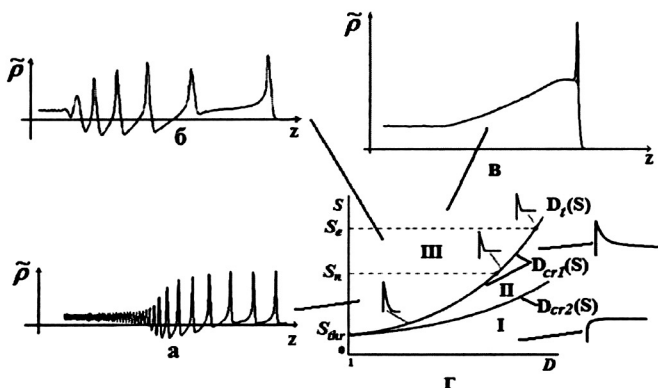


Рисунок 1. Бифуркационная диаграмма зависимости профиля плотности и давления от степени неравновесности среды и скорости стационарной ударной волны

Полученные бифуркационные значения скоростей и степеней неравновесности разделили бифуркационную диаграмму на три области. Первая область соответствует сильным ударным волнам и малым степеням

неравновесности. В этой области профили плотности и давления в ударных волнах имеют вид, характерный для релаксирующих сред: плавное повышение давления за разрывом. Во второй области ударные волны имеют детонационный вид профиля плотности и давления: уменьшение давления за разрывом. В третьей области стационарных ударных волн не существует. Границами между областями на бифуркационной диаграмме являются найденные в разделе 2.1 значения скоростей (рисунок 1 г). При этом граница между областями II и III является кусочно-гладкой, ей соответствуют различные газодинамические структуры. При степенях неравновесности $S_{thr} < S < S_n$ граница описывается скоростью $D_{cr1}(S)$, на ней реализуется ударноволновой импульс, газ за которым возвращается к исходному неравновесному состоянию. При степенях неравновесности $S_n < S < S_e$ граница также описывается скоростью $D_{cr1}(S)$, на ней реализуется ударная волна с ненулевой асимптотой, среда за которой остается акустически активной. При степенях неравновесности $S > S_e$ граница описывается скоростью $D_1(S)$, которой также соответствует ударная волна с ненулевой асимптотой. Отличие такой волны от предыдущей заключается в том, что за ней дисперсия среды становится положительной, а сама среда акустически пассивной.

В разделе 2.3 построена аналогичная бифуркационная диаграмма для профиля температуры. Она отличается от бифуркационной диаграммы для профиля плотности тем, что в областях, в которых существуют стационарные ударные волны, появляется новая область, в которой профиль температуры является немонотонным: за ударноволновым разрывом температура возрастает, затем убывает. Наличие такого профиля связано с немонотонной зависимостью температуры от удельного объема в потоке за фронтом ударной волны.

В разделе 2.4 исследован физический смысл области бифуркационной диаграммы, в которой стационарных ударных волн не существует, а также физический смысл границы этой области. Показано, что существование этой области связано с гидродинамической устойчивостью ударноволнового разрыва. Это условие связано с тем, что движение газа за фронтом ударной волны относительно него должно быть дозвуковым. В случае положительной дисперсии в условии гидродинамической устойчивости участвует низкочастотная скорость звука, а в случае отрицательной дисперсии высокочастотная. При степени неравновесности $S = S_e$ за фронтом ударной волны происходит смена знака дисперсии среды, которая влечет за собой смену условия гидродинамической устойчивости ударных волн.

В третьей главе с помощью численного моделирования исследуется нестационарная эволюция возмущений в неравновесной среде с экспоненциальной моделью релаксации. В каждой области параметров бифуркационной диаграммы (рисунок 1г), построенной в главе 2 было промоделировано распространение ударных волн и исследована их

эволюционная устойчивость. Также детально исследована область параметров, при которой установившиеся ударные волны не существуют.

В разделе 3.1 приведена постановка задачи о формировании ударной волны под действием поршня при различных начальных и граничных условиях в координатах Лагранжа.

В разделе 3.2 исследуется эволюционная устойчивость ударных волн в первой и второй областях бифуркационной диаграммы. Показано, что ударные волны с детонационным и релаксационным типом ударноволнового профиля являются эволюционно устойчивыми.

В разделе 3.3 исследуется эволюция малых газодинамических возмущений из третьей области. Показано, что в этой области газодинамические возмущения нарастают со временем, ускоряются и формируются в структуру, которой на бифуркационной диаграмме соответствует описанная выше кусочно-гладкая граница третьей области при соответствующей степени неравновесности (рисунок 1 а,б,в). При степенях неравновесности $S_{thr} < S < S_n$ структура эволюционирует в ударноволновой импульс (рисунок 1 а). При этом, поскольку газ за фронтом такого импульса остается акустически активным и его состояние такое же, как в невозмущенной области, формируется последовательность одинаковых импульсов. При степенях неравновесности $S_n < S < S_e$ из малых газодинамических возмущений формируется ударная волна с ненулевой асимптотой (рисунок 1 б). Аналогично ударноволновому импульсу газ за фронтом такой ударной волны является акустически активным. Степень неравновесности газа за фронтом удовлетворяет условию $S_{thr} < S < S_n$, поэтому за фронтом такой волны также формируется последовательность таких волн. При степенях неравновесности $S > S_e$ из малых газодинамических возмущений формируется уединенная ударная волна с ненулевой асимптотой (рисунок 1 в).

Все газодинамические структуры, описанные в разделе 3.3, являются автоволновыми. Их форма и амплитуда не зависят от формы и амплитуды начального возмущения, а определяются только параметрами самой среды.

В заключении перечислены основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы.

1. Исследованы вязкостно-дисперсионные характеристики химически неравновесной газовой смеси с обратимой химической реакцией и внешними источниками энергии и реагентов. Получено дисперсионное соотношение для газодинамических возмущений. Определена область значений теплового эффекта реакции и мощности внешнего источника реагента, при которых среда является акустически неустойчивой. Получены нелинейные уравнения, описывающие эволюцию малых газодинамических возмущений конечной амплитуды для исследуемой химически неравновесной среды и среды с обобщенным источником тепловыделения, мощность которого зависит от плотности и температуры. Структура полученных уравнений совпадает со

структурой аналогичного уравнения для неравновесной среды с экспоненциальной моделью релаксации.

2. Исследовано влияние неоднородности на вязкостно-дисперсионные свойства неравновесных сред. Получены нелинейные уравнения, описывающие эволюцию малых возмущений в слабо неоднородном потоке газа с распределенным тепловыделением. Уравнения для возмущений плотности, скорости, давления и температуры имеют подобную структуру, но различные коэффициенты. Для каждой термодинамической величины получены поправки к акустическому декременту затухания, связанные с неоднородностью, проанализирована газодинамическая устойчивость данной модели среды.

3. Исследованы стационарные ударные волны в стационарно-неравновесном газе с экспоненциальной моделью релаксации. Построены бифуркационные диаграммы зависимости профилей плотности, давления и температуры от степени неравновесности среды и скорости стационарной ударной волны. Показано, что на бифуркационной диаграмме для профилей плотности и давления существует три области с различными типами ударноволновых профилей плотности и давления. В первой области профили плотности и давления в ударных волнах имеют релаксационный вид, во второй области детонационный вид в третьей области стационарных ударных волн не существует. Для профиля температуры существует ещё одна область с немонотонным типом профиля. Границы областей получены в аналитическом виде. Показано, что границы между второй и третьей областями соответствуют три типа различных газодинамических структур: ударноволновой импульс и две волны с ненулевой асимптотой с различной дисперсией скорости звука за фронтом.

4. Исследован физический смысл области бифуркационной диаграммы, в которой стационарных ударных волн не существует, а также границы этой области. Показано, что существование этой области в неравновесных средах связано с гидродинамической устойчивостью разрыва в ударных волнах.

5. С помощью численного моделирования исследована нестационарная эволюция возмущений в стационарно-неравновесной среде с экспоненциальной моделью релаксации. Показано, что ударные волны с детонационным и релаксационным типом ударноволнового профиля являются эволюционно устойчивыми. В области, в которой стационарных ударных волн не существует, газодинамические возмущения нарастают со временем, ускоряются и формируются в структуру, которой на бифуркационной диаграмме соответствует кусочно-гладкая граница этой области. Все газодинамические структуры на этой границе являются автоволновыми.

Публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Галимов, Р.Н. Профиль температуры во фронте ударной волны в стационарно неравновесном колебательно-возбужденном газе [Текст] / Р.Н. Галимов, В.Г. Макарян, Н.Е. Молевич // Журнал технической физики. - 2006. - Т.76. - №12. - С.106-108.

2. Галимов, Р.Н. Структура и бифуркации плоских ударных волн в колебательно-возбужденном газе с внешним источником накачки [Текст] / Р.Н. Галимов, Н.Е. Молевич // Известия РАН МЖГ. – 2009. - №1. - С.188-202.
3. Galimov, R.N. Stationary structures in acoustically active nonequilibrium media with one relaxation process [Текст] /R.N. Galimov, N.E. Molevich // Journal of Acoustical Society of America. – 2008. - Vol. 123. - №5. - P. 3692.
4. Галимов, Р.Н. Бифуркации ударных волн в колебательно-возбужденном газе с внешним источником энергии [Текст] / Р.Н. Галимов, Н.Е. Молевич // Физическое образование в ВУЗах. – 2010. - Т 16. - №1. - П13.
5. Галимов, Р.Н. Малые возмущения в химически активной газовой смеси с обратимой химической реакцией и внешними источниками энергии и химических реагентов [Текст] / Р.Н. Галимов, Н.Е. Молевич // Вестник Самарского государственного университета. – 2010. - №80. - С. 125-138.
6. Галимов, Р.Н. Акустические возмущения в стационарно неравновесной химически активной газовой среде с внешними источниками химических реагентов и энергии [Текст] / Р.Н. Галимов, Н.Е. Молевич // Физическое образование в ВУЗах. – 2011. - Т21. - №1. - П24.
7. Galimov, R.N. Acoustics of non-equilibrium chemically active mixture with external source of the reagents [Текст] / R.N.Galimov, N.E. Molevich // Acta Acustica United with Acustica. – 2011. – Vol. 97. - Suppl. 1. - С.69.
8. Galimov, R.N. Acoustics of non-equilibrium chemically active mixture with external source of the reagents [Текст] / R.N. Galimov, D.I. Zavershinsky, V.G. Makaryan, N.E. Molevich // Astrophysics and Space Science. –2011. - Issue 1. - Vol. 334. - С. 35-44.
9. Galimov, R.N. Acoustical Instability of Inhomogeneous Gas Flows With Distributed Heat Release [Текст] / R.N. Galimov, N.E. Molevich, N.V.Troshkin // Acta Acustica United with Acustica. - May/June 2012. – Vol. 98. - Number 3. - С.372-377.

Основные публикации по теме диссертации в других изданиях

10. Galimov, R.N. Self-sustained-wave solutions of the system of relaxation gasdynamics [Текст] / R.N. Galimov, N.E.Molevich, D.P. Porfirjev // Proceedings of 7th International Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics, Moscow, Russia, April 17-19.07. – 2007. - С. 193-197.
11. Galimov, R.N. Shock Wave Bifurcations and Self-Sustained-Waves in vibrationally nonequilibrium gas [Электронный ресурс] / R. N. Galimov, N. E. Molevich // Proceedings of West-East High Speed Flow Field Conference, Moscow, Russia, November 19-22,2007. – Режим доступа: <http://wehsff.imamod.ru/pages/Section%205%20Shocks,%20Shock-Shock%20Interactions/Molevich.pdf>.
12. Галимов, Р.Н. Структура ударной волны и бифуркации в акустически активной неравновесной среде [Текст] / Р.Н. Галимов, Н.Е. Молевич // Тезисы XV школы-семинара «Современные проблемы аэродинамики», посвященной

100летию со дня рождения академика Л.И. Седова. Сочи, «Буревестник» МГУ. 5-15 сентября, 2007. - С. 29-30.

13. Galimov, R.N. Autowaves in relaxing acoustically active nonequilibrium media [Текст] / R.N. Galimov, N.E. Molevich // Proc. 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, 7-10 July 2008, Stockholm, Sweden. – 2008. – V. 1022. -С. 341-344.

14. Galimov, R.N. Structure of acoustical perturbation in medium with exothermic chemical reaction [Электронный ресурс] / R.N. Galimov, N.E. Molevich // Proc. XX Session of the Russian Acoustical Society. Moscow. October 27-31.08. – 2008. - С. 156-159.

15. Галимов, Р.Н. Бифуркации ударных волн в колебательно-возбужденном газе с внешним источником накачки [Текст] / Р.Н. Галимов, Н.Е. Молевич // Труды школы-семинара по Магнитоплазменной аэродинамике. Москва. - 2008. - С. 86-90.

16. Galimov, R.N. Stationary structures in acoustically active nonequilibrium media with one relaxation process [Текст] / R.N. Galimov, N.E. Molevich // Proc. 2nd ASA-EAA joint conference Acoustics'08 Paris, 29.06-4.07.08 Paris, France. – 2008. - С. 4395-4400.

17. Галимов, Р.Н. Неустойчивость и бифуркационные значения скорости ударных волн в колебательно-возбужденном газе с внешним источником накачки [Текст] / Р.Н. Галимов, Н.Е. Молевич // Сборник тезисов Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях NPNJ-2008. 24.05 – 23.05.2008, Украина, г. Алушта. – 2008. - С. 131-134.

18. Galimov, R.N. Molevich Autowave solutions of the 1D and 2D systems of relaxation gasdynamic equations with the energy source [Текст] / R.N. Galimov, V.G. Makaryan, N.E. // Proc. 8 Int. Workshop on magneto-plasma aerodynamics. Moscow. 31.03.09-2.04.09. – 2009. - С. 96-99.

19. Galimov, R.N. Shock wave structures depending on the wave speed and the nonequilibrium degree of vibrationally excited gas [Электронный ресурс] / R.N. Galimov, N. E. Molevich // Proc. 27th International Symposium on Shock Waves, St.-Petersburg, July 19-24, 2009. – 2009. – 1CD.

20. Galimov, R.N. The influence of Stationary Vibrational Nonequilibrium on the Stability and Structure of Shock Waves [Электронный ресурс] / R.N. Galimov, V.G. Makaryan, N.E. Molevich // Proc. 3rd European Conference for Aerospace Sciences, Versailles, France, 6-9 July, 2009. – 2009. – 1CD.

21. Галимов, Р.Н. Акустическая устойчивость и ударные волны в неравновесной химически активной смеси с внешним источником реагента [Текст] / Р.Н. Галимов // Сборник трудов Научной школы «Нелинейный волны – 2010», 6 – 12 марта 2010, г.Нижний Новгород. – 2010. – С. 134-136.

22. Galimov, R.N. New acoustical properties of the non-equilibrium gas with the reversible chemical reactions and the external injection of reagents [Электронный ресурс] / R.N. Galimov, N.E. Molevich // Proc. 7th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 19-21 July 2010, Antalya, Turkey. – 2010. – 1CD.

102

23. Galimov, R.N. Nonlinear acoustical waves in fluids with generalized heat-loss function [Электронный ресурс] / R.N. Galimov, D.I.Zavershinskii, V.G.Makaryan, N.E.Molevich // Proc. 17th International Congress on Sound & Vibration, 18 – 22 July, 2010, Cairo, Egypt. – 2010. – 1CD.
24. Галимов, Р.Н. Исследование акустической устойчивости химически активной среды с внешним объемным источником реагента [Текст] / Р.Н. Галимов, Н.Е. Молевич // Материалы Международной междисциплинарной научной конференции с элементами научной школы для молодежи Шестые Курдюмовские чтения «Идеи синергетики в естественных науках», 21.04.10-25.04.10, Тверь. – 2010. – С. 169-170.
25. Галимов, Р.Н. Распространение малых возмущений в неравновесной газовой среде с обратимой химической реакцией и внешним источником чистого реагента [Текст] / Р.Н. Галимов, Н.Е. Молевич // Сборник тезисов Восьмой Международной конференции по Неравновесным процессам в соплах и струях NPNJ'2010, 25.05.10 – 31.05.10, г. Алушта, Украина. – 2010. – С. 34-36.
26. Galimov, R.N. Shock waves and autowaves in relaxing gas with the energy source [Электронный ресурс] / R.N.Galimov, V.G.Makaryan, N.E.Molevich // Proc.19th International Shock Interaction Symposium, August 31 – September 3, 2010, Moscow – Russia. – 2010. – 1CD.
27. Galimov R.N. Acoustics of non-equilibrium chemically active mixture with external source of the reagents [Электронный ресурс] / R.N. Galimov, N.E. Molevich // Proceedings of Forum Acusticum 2011, 26 June to 1 July 2011, Denmark. – 2011. – 1CD.
28. Galimov, R.N. Modification and stability of shock waves in the nonequilibrium gas with an external power source [Электронный ресурс] / R.N. Galimov, V.G. Makaryan, N.E. Molevich // Proc. 20th International Shock Interaction Symposium, Stockholm, Sweden, 2012, August 20 – 24. – 2012. – 1CD.
29. Galimov, R.N. Self-sustaining hydrodynamical structures and shock - wave disintegration in nonequilibrium media with heat release [Электронный ресурс] / R.N. Galimov, D. I. Zavershinsky, V.G. Makaryan, N. E. Molevich // Proc. 9 Euromech Fluid Mechanics Conference (EFMC9), Roma, Italy. – 2012. -1 CD. - 0645_VO5.

Подписано в печать 20 ноября 2012 г. Формат 60x48/16. Тираж 100 экз.
Отпечатано с готового оригинал-макета заказчика.
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, СГАУ.