

На правах рукописи

ГРИДЧИНА Марина Евгеньевна

**Устойчивость ударных и
детонационных волн и их
взаимодействие с малыми
возмущениями**

Специальность 01.04.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2005

Работа выполнена на кафедре молекулярной физики физического факультета Московского Государственного Университета имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор А. В. Уваров.
Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник В.С. Галкин,
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией А.В. Еремин.
Ведущая организация: Институт проблем механики РАН,
г.Москва

Защита состоится "____" _____2005 г. в "____" час. на заседании диссертационного совета Д 501.002.01 в Московском Государственном Университете имени М.В.Ломоносова по адресу: 119992, ГСП-2, Москва, Ленинские горы, Физический факультет МГУ, _____

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан "____" _____2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 501.002.01
кандидат физико-математических наук

Т.В. Лаптинская

1 Общая характеристика работы

Актуальность темы

Устойчивость ударных и детонационных волн и их взаимодействие с малыми гидродинамическими возмущениями всегда привлекало внимание исследователей. Причин для этого несколько. Во-первых, результаты такого взаимодействия важны для прикладных задач отражения и преломления звука при его контакте с волной. Во-вторых, интерес к этой задаче связан с нерешенностью общей проблемы воздействия линейных возмущений на нелинейную систему, каковой является сильный разрыв или детонационная волна. Наконец, в-третьих, эта проблема очень тесно связана с вопросом устойчивости, так как генерация возмущений фронтом волны означает, что коэффициент отражения (прохождения) становится бесконечно большим.

Ранее при исследованиях взаимодействия звуковых и ударных волн учитывался только сильный разрыв, в то время как необходимо принимать во внимание и наличие протяженной релаксационной зоны, характерной для сильных ударных волн. Учет влияния зоны релаксации на свойства отражения проводился лишь в предельных случаях низкочастотного и высокочастотного возмущений. В то же время хорошо известно, что наиболее интересные эффекты неустойчивости проявляются именно на промежуточных, резонансных частотах. Для таких характерных частот задача существенно усложняется и необходимо одновременное рассмотрение релаксационной зоны и гидродинамических скачков. В настоящей работе предлагается более общая постановка задачи для описания взаимодействия малых гидродинамических возмущений с ударными и детонационными волнами.

Цель работы

1. Формулировка и реализация метода, позволяющего рассматривать взаимодействие малых возмущений с ударной или детонационной волной при любом соотношении длины падающего возмущения и ширины волны.
2. Расчет взаимодействия малых гидродинамических возмущений с излучающей ударной волной при произвольном соотношении длины возмущения и ширины зоны релаксации.

3. Точное решение задачи о взаимодействии малых гидродинамических возмущений с ионизирующей ударной волной и выяснение влияния кинетики ионизации на характер взаимодействия.
4. Расчет взаимодействия слабых ударных волн с гидродинамическими возмущениями с учетом структуры ударного фронта.
5. Анализ влияния кинетических моделей, описывающих структуру детонационной волны, на устойчивость такой волны.

Научная новизна работы

1. Сформулирована и решена задача о взаимодействии малых гидродинамических возмущений с ударной волной при любом соотношении длины падающего возмущения и ширины релаксационной зоны за фронтом ударной волны. Впервые рассчитаны коэффициенты отражения и прохождения при взаимодействии сильных ударных волн с акустическими, вихревыми и тепловыми возмущениями для релаксационных процессов за фронтом ударной волны, соответствующих установлению равновесной плотности излучения или ионизации. При косом падении звуковой волны на ударную обнаружена немонотонная зависимость коэффициента отражения звука от волнового числа, определяющего угол падения.
2. Впервые рассмотрено взаимодействие малых гидродинамических возмущений (звуковых и тепловых) со слабой ударной волной при произвольном соотношении длины волны возмущений и ширины ударной волны. Обнаружена немонотонная зависимость коэффициентов прохождения от числа Прандтля.
3. Исследовано влияние кинетической схемы реакции на устойчивость детонационной волны. Показано, что учет обратимости реакций в равновесной зоне приводит к существенному сдвигу порога устойчивости.

На защиту выносятся следующие результаты и положения

1. Формулировка задачи о взаимодействии малых гидродинамических возмущений с ударной волной при любом соотношении длины падающего возмущения и ширины ударной волны, позволившая в рамках единого подхода:

- а) найти коэффициенты отражения и прохождения при взаимодействии сильных ударных волн с акустическими, вихревыми и тепловыми возмущениями при различных релаксационных процессах за фронтом ударной волны;
 - б) обнаружить немонотонную зависимость коэффициентов отражения и прохождения при изменении частоты возмущений;
 - в) определить области параметров гидродинамических возмущений, при которых взаимодействие носит резонансный характер;
 - г) определить степень влияния кинетики реакций на характер взаимодействия и пороги устойчивости в ударных и детонационных волнах.
2. Результаты расчета взаимодействия слабой ударной волны с гидродинамическими возмущениями с учетом процессов вязкости и теплопроводности в ударной волне, показывающие, что зависимость коэффициентов прохождения от числа Прандтля немонотонна.
 3. Результаты расчета устойчивости детонационной волны при учете обратных реакций в равновесной зоне.

Научная и практическая ценность

Построена последовательная теория взаимодействия малых гидродинамических возмущений с ударной и детонационной волной, учитывающая все гидродинамические моды, включая и тепловые. Развитая строгая теория может служить прообразом для создания последовательной теории устойчивости ударных и детонационных волн.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на:

1. VI Международной научной конференции "Молекулярная биология, химия и физика неравновесных систем" (Иваново-Плес, 2002);
2. IV Международной конференции "Неравновесные процессы в соплах и струях" (Санкт-Петербург, 2002);
3. Зимней школе для студентов старших курсов физических и математических специальностей "Физика экстремальных состояний и процессов" (Снежинск, 2002);

4. XII Международной конференции "Вычислительная механика и современные прикладные программные системы" (Владимир, 2003);
5. VII Международной научной конференции "Молекулярная биология, химия и физика гетерогенных систем" (Москва – Плес, 2003);
6. Программном совещании для аспирантов в Институте гидродинамики Университета Тохоку (Япония, 2004);
7. XX Юбилейном Международном семинаре по струйным, отрывным и нестационарным течениям (Санкт-Петербург, 2004).

Кроме того, результаты работы докладывались на конференциях "Ломоносов-2001", "Ломоносов-2002", "Ломоносов-2003", "Ломоносовские чтения-2003".

Публикации

По результатам работы опубликовано 4 статьи в реферируемых научных изданиях и 9 тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем — 123 страницы, в том числе 49 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 63 наименования.

2 Содержание диссертации

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи диссертационной работы и изложено ее краткое содержание.

В **первой** главе содержится обзор работ, связанных с исследованием структуры и устойчивости ударных и детонационных волн. Сформулированы нерешенные задачи и обоснована постановка задачи диссертационной работы.

В разделе 1.1 обсуждаются основные понятия и определения, рассмотрена стационарная структура ударных и детонационных волн, приведена

основная система уравнений и граничные условия. Для описания ударных волн и возмущений используются стандартные уравнения неразрывности, движения и энергии [1].

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) &= 0, \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} &= -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho h - p + \frac{\rho v^2}{2} \right) &= -\operatorname{div} \left(\rho \mathbf{v} \left(h + \frac{v^2}{2} \right) \right)\end{aligned}$$

где ρ, v, p, h , — плотность, скорость, давление и удельная энтальпия соответственно. В удельную энтальпию входит и внутренняя энергия, которая в релаксационной зоне неравновесна. Эволюция этой энергии описывается дополнительным уравнением (уравнениями), вид которых зависит от рассматриваемой задачи.

В разделе 1.2 рассмотрена общая постановка задачи о взаимодействии малых возмущений с ударным разрывом и анализ устойчивости. Обсуждение работ, посвященных исследованию взаимодействия гидродинамических возмущений с ударными волнами, показывает, что в условиях, когда длина волны возмущения имеет порядок ширины релаксационной зоны, задача оказывается нерешенной.

В разделе 1.3 описан общий метод гидродинамических мод, позволяющий анализировать взаимодействие с малыми возмущениями и устойчивость как ударных, так и детонационных волн.

Во **второй главе** рассмотрено взаимодействие звуковых волн с ударными с учетом релаксационной зоны при произвольном отношении длины волны возмущения к ширине зоны релаксации для различных диапазонов чисел Маха как для излучающих, так и для ионизирующих ударных волн.

В разделе 2.1 исследована структура сильной ударной волны с учетом релаксационной зоны. Решена задача о взаимодействии ударных волн со звуковыми волнами в одномерном случае и при наклонном падении звуковой волны на ударную, при изменяющемся в релаксационной зоне показателе адиабаты.

Сначала рассмотрена стационарная структура ударной волны с учетом излучения. Хорошо известно решение задачи о структуре фронта ударной волны с учетом излучения в диффузионном приближении [1].

С увеличением числа Маха изначально излучение влияет на гидродинамические параметры, а затем необходимо учитывать и саму плотность энергии излучения. Однако в работе [1] при анализе излучения не рассматривается изменение температуры, а затем это изменение рассчитывает-

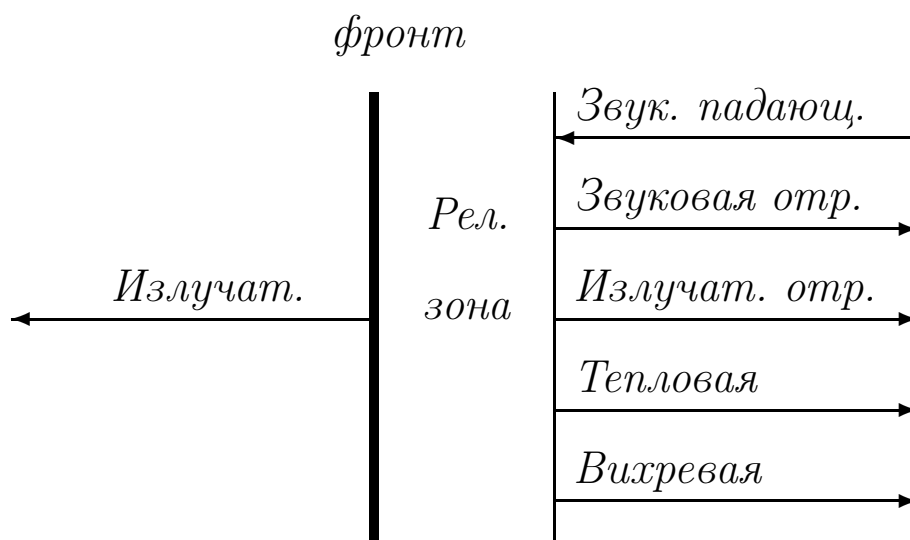


Рис. 1: Отражение звуковой волны от ударной.

ся. Детальный анализ, приводит к существенной корректировке профилей гидродинамических параметров. В данном разделе рассчитаны стационарные параметры с учетом изменения температуры и проведено сравнение с имеющимися результатами.

Далее сформулирована общая постановка задачи для расчета возмущений. Рассматривается плоская ударная волна, распространяющаяся вдоль направления x , на которую накладываются малые возмущения $a' = a'(x)exp(i\omega t + ik_y y)$. Приводится общая система уравнений и граничные условия. Находятся собственные значения задачи $k = k(\omega)$ и определяются соответствующие им собственные векторы.

Известно что, при взаимодействии ударных волн с малыми гидродинамическими возмущениями в равновесной зоне за фронтом волны произвольное возмущение распадается на совокупность независимых возмущений, которые называются модами [2].

При взаимодействии звуковых волн с ударными возможны две ситуации: распространение звука со стороны холодного газа (прохождение) и со стороны нагретого газа (отражение, поскольку в этом случае невозможно прохождение звуковой волны через фронт ударной волны). На рис. 1 представлена схема взаимодействия звуковой и ударной волн. В равновесной зоне за фронтом возможно существование пяти независимых волн (мод). Перед фронтом может распространяться только излучательная мода. Наличие этой моды сильно усложняет задачу и отличает эту задачу от всех других, связанных с анализом релаксационной зоны.

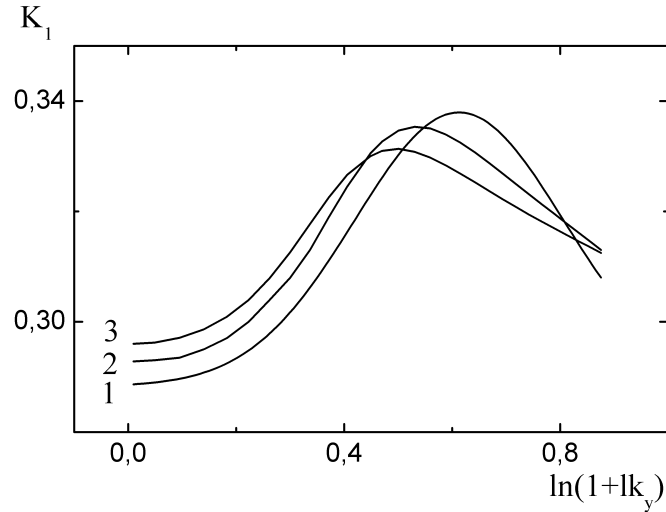


Рис. 2: Зависимость коэффициента отражения $K_1 = \left| \frac{A_1 T'^{out}}{A_4 T'^{in}} \right|$ от волнового числа k_y : $p_0 = 0.1$ атм, $M = 28$; 1 — $\omega l/c_s = 3$, 2 — $\omega l/c_s = 4$, 3 — $\omega l/c_s = 5$.

Рассмотрено отражение звуковой волны при различных числах Маха. Величина показателя адиабаты γ в рассматриваемой постановке задачи является независимым параметром, поэтому также исследована зависимость от этого фактора.

Далее приведены результаты расчета для случая прохождения звуковой волны через ударную. Проанализированы относительные вклады амплитуд всех генерируемых мод.

Исследован двумерный случай отражения звуковой волны от ударной. При косом падении звуковой волны на ударную со стороны нагретого газа задача существенно усложняется и количество параметров увеличивается. На рис. 2 представлены результаты расчета коэффициента отражения K_1 в зависимости от величины k_y для нескольких фиксированных значений частоты. Как видно из рисунка, коэффициент отражения K_1 изменяется немонотонно с ростом k_y . В этом состоит принципиальное отличие от одномерного случая $k_y = 0$. Найденная немонотонная зависимость коэффициента отражения вскрывает новый механизм усиления возмущений, связанный с отражением от релаксационного профиля гидродинамических параметров.

Отдельно рассмотрен частный случай отражения звука низкой частоты от ударной волны. Показано, что излучение, которое генерируется перед фронтом, остается существенно неравновесным. Этот факт отличает зада-

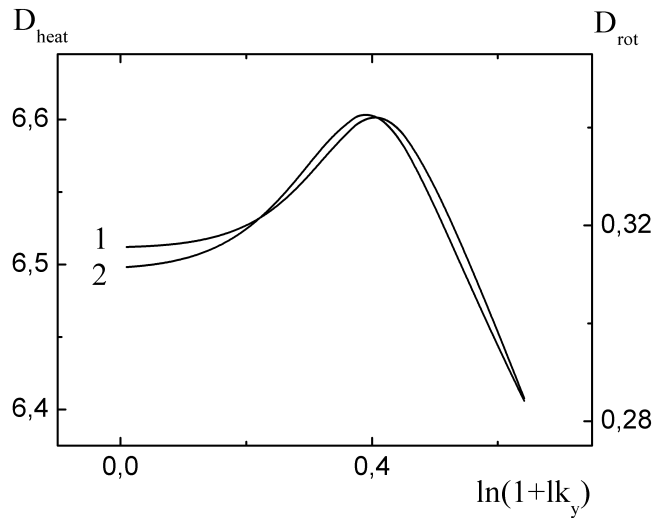


Рис. 3: Зависимость коэффициента прохождения теплового (кривая 1) и вихревого (кривая 2) возмущений от параметра lk_y для излучающей ударной волны.

чу с излучением от подобных задач для ударных волн с релаксационными зонами, определяемыми процессами колебательной релаксации и др.

Проанализирован случай падения вихревой и тепловой моды на фронт со стороны холодного газа. На рис. 3 представлены зависимости коэффициентов прохождения D_{heat} (отношение амплитуды генерируемой звуковой волны к амплитуде падающей тепловой, кривая 1) и D_{rot} (отношение амплитуды генерируемой звуковой волны к амплитуде падающей вихревой, кривая 2) как функции волнового вектора k_y соответственно теплового и вихревого возмущений. Из рассмотрения рис. 3 видно, что в обоих случаях максимум коэффициента прохождения находится в области, где длина волны тепловой (вихревой) моды имеет порядок длины релаксационной зоны. Кроме того, коэффициент прохождения D_{heat} , также как и коэффициент отражения K , больше единицы. Следовательно, ударная волна ослабляется при прохождении через область с тепловыми возмущениями.

В разделе 2.2 исследована стационарная структура ударной волны в диапазоне чисел Маха, в котором в релаксационной зоне за фронтом ударной волны происходит процесс установления равновесной ионизации, получены профили основных гидродинамических параметров за фронтом ударной волны, приведена общая система уравнений и граничные условия для возникающих мод. В этом случае стандартная система гидродинамических уравнений дополняется релаксационными уравнениями, описыва-

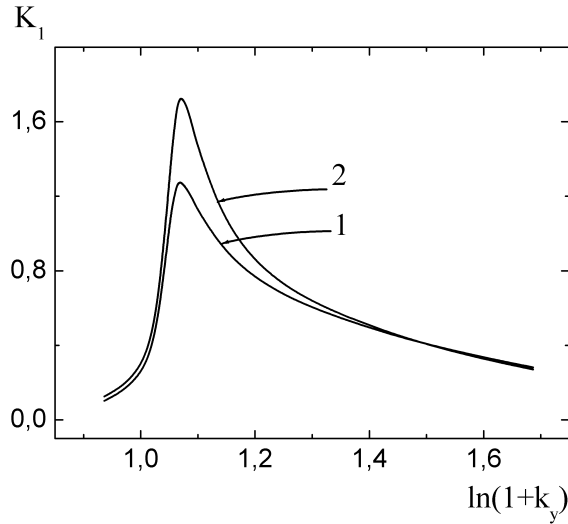


Рис. 4: Коэффициент отражения звуковой волны от ионизирующей ударной K_1 в зависимости от угла падения, характеризуемого волновыми числами k_y . Кривая 1 соответствует механизму ионизации за счет электронного удара, затравочная концентрация электронов задана. Кривая 2 — механизму ионизации за счет атом-атомных и электрон-атомных столкновений.

ющими кинетику ионизации [1]

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} + \mathbf{v} \text{grad} N_e = \alpha_e N_a N_e - \beta_e N_e^3 + \alpha_a N_a^2 - \beta_a N_a N_e^2.$$

Рассмотрена плоская ударная волна, на которую накладываются малые возмущения. При этом найдены собственные значения $k = k(\omega)$ и определены соответствующие им собственные векторы.

Приведены результаты численных расчетов для взаимодействия сильных ударных волн с акустическими возмущениями для релаксационного процесса за фронтом ударной волны, соответствующего ионизации. Для ионизирующей ударной волны на рис. 4 представлена зависимость коэффициента отражения K_1 (отношение амплитуды отраженной звуковой волны, к амплитуде падающей) как функция угла падения звуковой волны на ударную со стороны горячего газа при $\omega = 1.4$, $M = 15$ в аргоне. Рассмотрены два механизма ионизации. Кривая 1 соответствует механизму ионизации за счет электронного удара (в предположении, что небольшая ионизация в газе уже есть), кривая 2, наряду с ионизацией электронным ударом, учитывает ионизацию за счет атомных столкновений на первой стадии. Показано, что влияние кинетической схемы ионизации существенно. Обнаружено, что при произвольном соотношении длины волны возмущений и ширины

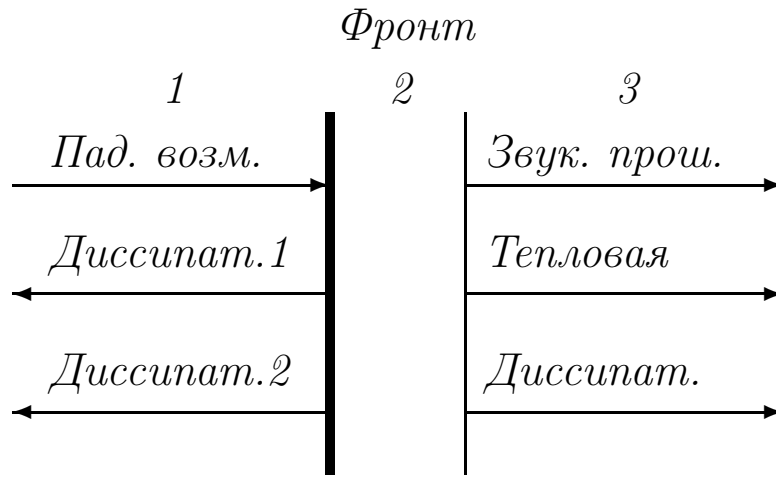


Рис. 5: Набор мод при встречном взаимодействии падающего возмущения с ударной волной. Область 1 — холодный газ перед волной, 2 — фронт, 3 — нагретый равновесный газ за фронтом.

релаксационной зоны при косом падении гидродинамических возмущений на ударную волну для коэффициента отражения наблюдается максимум.

Проведенное исследование зависимости коэффициентов отражения и прохождения от механизма ионизации показывает, что из экспериментальных данных по коэффициентам отражения и прохождения можно сделать вывод о механизмах ионизации за фронтом сильной ударной волны, которые в настоящее время детально не изучены.

В [разделе 2.3](#) приведены основные результаты второй главы.

Третья глава посвящена исследованию процесса взаимодействия малых возмущений со слабыми ударными волнами. Интерес к этой задаче обусловлен тем, что ударный фронт в этом случае может рассматриваться как гидродинамическая область со структурой, описываемой уравнениями Навье-Стокса. Как и в случае, рассмотренном ранее, особое внимание уделено случаю взаимодействия в котором длины волн возмущений имеют порядок ширины ударной волны (в слабой ударной волне ширина зависит от ее интенсивности, то есть от числа Маха).

В [разделе 3.1](#) сформулирована общая постановка задачи о взаимодействии малых возмущений со слабыми ударными волнами. Рассчитана структура слабой ударной волны посредством численного решения системы гидродинамических уравнений для вязкой и теплопроводной жидкости.

В [разделе 3.2](#) рассмотрена общая система гидродинамических уравнений для возмущений в приближении Навье-Стокса. Проанализировано встречное взаимодействие ударной волны со звуковой волной (рис. 5). Возмущения, возникающие при таком взаимодействии по обе стороны от фрон-

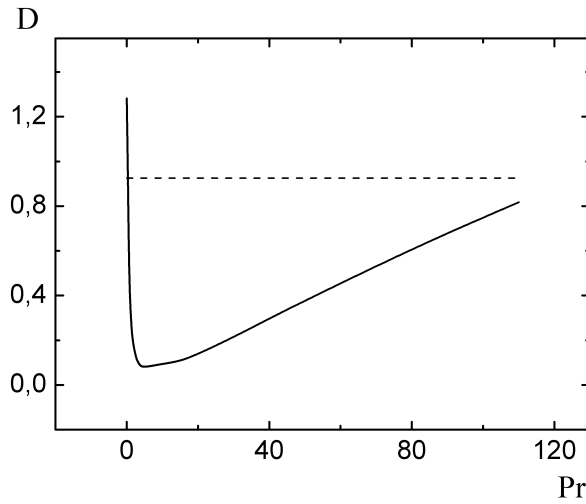


Рис. 6: Зависимость коэффициента прохождения D от числа Прандтля Pr : $p = 0.1$ атм, $M = 1.3$, $\tilde{\omega} = 6$. Асимптота $D = 0.925$ соответствует случаю $\chi = 0$ ($Pr \rightarrow \infty$), минимальное значение коэффициента прохождения $D = 0.082$ соответствует $Pr = 4.5$.

та, должны удовлетворять физическому условию: в области за фронтом ударной волны могут существовать только моды, распространяющиеся в сторону нагретого равновесного газа.

При этом (по сравнению с задачами рассмотренными в предыдущей главе), набор мод существенно меняется — добавляются диссипативные моды, связанные с учетом вязкостных эффектов. Перед фронтом ударной волны распространяются падающее возмущение и две диссипативные моды, а за фронтом возможно существование трех независимых мод — звуковой прошедшей, тепловой и диссипативной.

В [разделе 3.3](#) приведены основные результаты численных расчетов. Для определения сравнительной роли вязкости и теплопроводности рассмотрена зависимость коэффициента прохождения от числа Прандтля $Pr = \nu/\chi$, где ν — коэффициент динамической вязкости, χ — коэффициент температуропроводности. Отдельно исследованы два предельных случая $\nu = 0$ ($Pr = 0$) и $\chi = 0$ ($Pr \rightarrow \infty$). При $\nu = 0$ ударная волна, как известно, существует только до значения $M \approx 1.3$, а при $\chi = 0$ решение всегда возможно.

На рис. 6 представлена зависимость коэффициента прохождения D от числа Прандтля при $M = 1.3$ и $\tilde{\omega} = 6$. Данная зависимость немонотонна, коэффициент прохождения имеет минимальное значение при определенном числе Прандтля ($Pr = 4.5$). Поскольку взаимодействие звуковых и

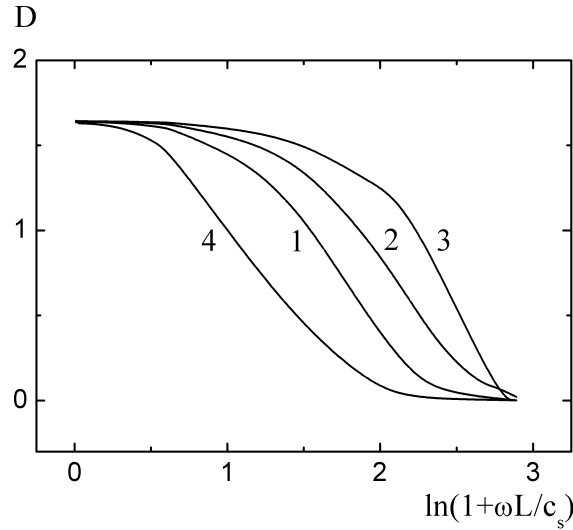


Рис. 7: Зависимость коэффициента прохождения D от частоты ω : $M = 1.3$; $p = 0.1$ атм; 1 — случай одновременного учета процессов вязкости и теплопроводности во фронте волны ($Pr = 0.71$); 2 — случай, когда рассматривались только вязкостные эффекты ($Pr \rightarrow \infty$); 3 — случай учета только процесса теплопроводности ($Pr = 0$); 4 — случай минимума коэффициента прохождения, достигаемого при $Pr = 4.5$.

ударных волн носит нелинейный характер, то суммарный эффект от вязкости и теплопроводности не является аддитивным. Далее рассчитаны коэффициенты прохождения звуковых и тепловых возмущений через ударную волну. На рис. 7 представлены зависимости коэффициента прохождения D (отношение амплитуды генерируемой звуковой волны к амплитуде падающей волны) как функции безразмерной частоты падающего звукового возмущения $\tilde{\omega} = \omega L / c_s$ (c_s — скорость звука). На графике представлены зависимости для разных чисел Прандтля. Кривая 1 соответствует случаю одновременного учета процессов вязкости и теплопроводности во фронте волны ($Pr = 0.71$). Кривая 2 соответствует расчету, когда рассматривались только вязкостные эффекты, т.е. число Прандтля стремится к бесконечности, а кривая 3 соответствует учету только процесса теплопроводности $Pr = 0$ (такая волна существует только до $M \sim 1.3$). Кривая 4 соответствует минимуму коэффициента прохождения, достигаемому при $Pr = 4.5$ (см. рис. 6). Отметим, что для газов $Pr = 0.71$.

При $\omega \rightarrow 0$ коэффициент прохождения может быть вычислен аналитически, причем результаты численного и аналитического расчетов совпадают [3]. Однако с увеличением частоты коэффициент прохождения начинает зависеть от числа Прандтля. С увеличением частоты волна затухает за

счет диссипативных эффектов.

При взаимодействии тепловых возмущений с ударной волной наблюдается резонансный эффект увеличения коэффициента прохождения в условиях, когда характерная длина волны возмущения по порядку величины становится сравнимой с шириной ударной волны. С увеличением числа Маха коэффициент прохождения увеличивается [4], а резонансный эффект приобретает более заметные очертания.

В разделе 3.4 приведены основные результаты третьей главы.

В **четвертой** главе рассмотрено взаимодействие малых возмущений с детонационными волнами. Исследовано влияние кинетической схемы при расчете детонации на порог устойчивости детонационных волн.

В разделе 4.1 исследована структура детонационной волны и приведен обзор моделей, описывающих химическую реакцию в релаксационной зоне.

Сначала исследована структура волны при наличии одной необратимой реакции с Аррениусовской кинетикой. Приведена основная система уравнений (см., напр. [5])

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) &= 0, & \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \operatorname{div}(p + \rho v^2) &= 0, \\ \frac{\partial \tilde{E}}{\partial t} + \operatorname{div}(\tilde{E} \mathbf{v} + p \mathbf{v}) &= 0, & \frac{\partial \lambda}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \lambda &= W. \end{aligned}$$

Здесь

$$\tilde{E} = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{\rho v^2}{2} - \rho q(1 - \lambda)$$

полная энергия единицы объема, q — теплота реакции, λ — релаксационный параметр ($\lambda = 1$ для не сгоревшего, $\lambda = 0$ для сгоревшего газа),

$$W = -\alpha \lambda \exp(-\tau/T),$$

где α — множитель, определяемый константой скорости реакции, τ — температура активации. Исходя из этих уравнений, получены профили основных гидродинамических параметров за фронтом волны.

Преимущество простейшей модели — в предельно простой кинетической схеме. Учет обратных процессов приводит к так называемой модели обратимой реакции. В этом случае система уравнений остается прежней, но меняется выражение для W

$$W = -\alpha \lambda \exp(-\tau/T)(1 - \exp(\Delta F/RT)),$$

где F — свободная энергия.

В разделе 4.2 содержится обзор исследований по устойчивости детонационных волн. Сформулированы нерешенные задачи.

В разделе 4.3 рассмотрена одномерная неустойчивость детонационной волны для рассматриваемой модели на основе общей методики, используемой в работе.

В разделе 4.4 проанализировано влияние равновесной зоны на устойчивость детонационной волны. Показано, что критерии устойчивости сильно зависят не только от релаксационной зоны, но и от граничных условий в равновесной зоне, поскольку именно эти условия определяют вид собственных функций. В этом случае простая кинетическая модель не позволяет точно описать ситуацию. В данном разделе проанализировано влияние "обратимости" реакции на устойчивость детонационной волны. Для учета обратимости использована простейшая модель обратимой однокомпонентной реакции [6], которая неоднократно рассматривалась при анализе самой зоны реакции, но не применялась при исследованиях устойчивости.

Дана аналитическая оценка влияния обратимости на систему гидродинамических мод. Рассмотрено, каким образом изменение кинетической схемы реакции меняет дисперсионное уравнение и соотношение параметров в гидродинамических модах. Показано, что наиболее сильно обратные процессы проявляются при больших энергиях активации. В то же время величина теплоты реакции слабо влияет на изменение границ устойчивости при использовании разных моделей реакций.

Произведен расчет устойчивости детонационной волны для разных кинетических схем. Рассмотрено решение задачи устойчивости в координатах (Q, E) (теплота реакции – энергия активации) для волны детонации, распространяющейся в режиме Жуге. На рис. 8 представлены результаты численного расчета кривых нейтральной стабильности, отделяющих неустойчивую область внутри кривой от устойчивой снаружи. Для необратимой реакции такие результаты хорошо известны [7] и соответствуют кривой 1. Результаты выполненного по общему методу расчета полностью совпали с ранее полученными.

В обратимом случае варьировалась конечная концентрация λ_k от $\lambda_k = 0.05$ до $\lambda_k = 0.5$. При этом показано, что границы устойчивости плавно смещаются при изменении конечной концентрации вещества. Наличие концентрации продуктов реакции приводит к стабилизации системы, поскольку в равновесной зоне возникает релаксирующая среда, в которой возмущения затухают.

Наибольший интерес представляет нижняя граница области неустойчивости. Здесь видно, что, в зависимости от энергии активации, критическая теплота реакции может меняться в несколько раз. Это показывает, что

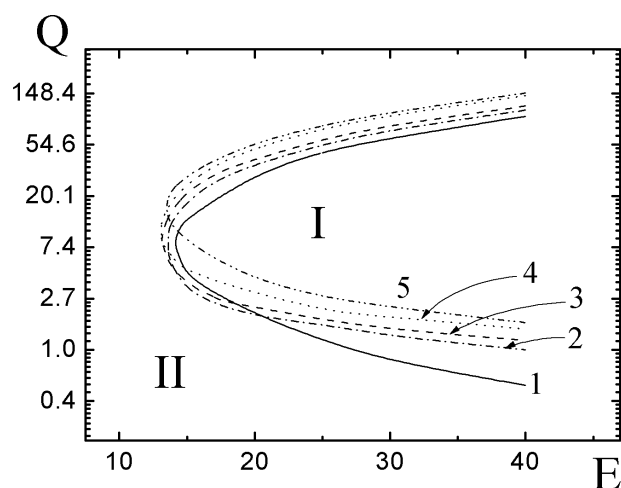


Рис. 8: Кривые нейтральной стабильности — как функции теплоты реакции Q и энергии активации E : $\gamma = 1.2$; I — область неустойчивости, II — область устойчивости; 1 — расчет, соответствующий необратимой реакции; кривые 2 — 5 соответствуют расчету для обратимых реакций для различных λ_k : 2 — $\lambda_k = 0.05$, 3 — $\lambda_k = 0.1$, 4 — $\lambda_k = 0.2$, 5 — $\lambda_k = 0.5$.

любые расчеты устойчивости, выполненные по простейшей схеме, могут давать для границы стабилизации лишь порядок величины.

Из рисунка также видно, что влияние энергии активации очень велико и растет вместе с ростом этой энергии. В то же время, зависимость от теплоты реакции скорее обратная — при малых Q влияние обратимости оказывается в относительном выражении больше.

Исследованы возмущения в релаксационной зоне в момент возникновения неустойчивости. Рассмотрены профили параметров возмущений, генерируемых детонационной волной в режиме неустойчивости. Показано, что, во-первых, релаксационная мода дает существенный вклад и пренебречь этой модой нельзя и, во-вторых, что реально существующая зависимость равновесной концентрации от термодинамических параметров среды в равновесной зоне полностью изменяет профили возмущений и существенным образом меняет диапазон устойчивых режимов.

В разделе 4.5 резюмированы основные результаты четвертой главы.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

3 Основные результаты и выводы

1. Разработан общий метод анализа взаимодействия малых гидродинамических возмущений (акустических, вихревых, тепловых) с ударными и детонационными волнами. Метод позволяет рассматривать любые соотношения между длинами волн возмущений и шириной релаксационной зоны.
2. Рассчитаны коэффициенты отражения и прохождения при взаимодействии сильных ударных волн с акустическими, вихревыми и тепловыми возмущениями при двух релаксационных процессах за фронтом ударной волны, соответствующих ионизации и установлению равновесной плотности излучения. Найдены профили параметров в сильной ударной волне с учетом потока излучения. Установлено, что наибольшее влияние релаксационной зоны на коэффициент отражения звука наблюдается в области параметров возмущений, соответствующих условию $\omega\tau \approx 1$.
3. В строгой постановке решена задача о взаимодействии малых возмущений со слабыми ударными волнами. Обнаружена немонотонная зависимость коэффициентов прохождения звуковых возмущений от числа Прандтля. В предельном случае низких частот решение совпадает с известным решением, вычисленным для ударного разрыва.
4. Рассчитаны профили параметров возмущений, генерируемых детонационной волной в режиме неустойчивости. Показано, что реально существующая зависимость равновесной концентрации от термодинамических параметров среды в равновесной зоне полностью изменяет профили возмущений и существенным образом меняет диапазон существования устойчивых режимов.

4 Цитируемая литература

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. М.: Наука, 1966.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Гидродинамика*. М.: Наука, 1988.
3. Блохинцев Д.И. Движущийся приемник звука. *ДАН СССР*, 1945, т.47, N1, с.22-25.

4. Гридчина М.Е., Осипов А.И., Уваров А.В. Взаимодействие звуковых и сильных ударных волн. *Аэромеханика и газовая динамика*, 2002, N2, с.40-47.
5. G.J. Sharpe, S.A.E.G. Falle One-dimensional numerical simulations of idealized detonations *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1999, **vol. 455**, pp. 1203-1214.
6. G.J. Sharpe The structure of planar and curved detonation waves with reversible reactions *Phys. Fluids*, 2000, **vol. 12**, N 11, pp. 3007-3020.
7. H.I. Lee, D.S. Stewart Calculation of linear detonation stability: one-dimensional instability of plane detonation *J. Fluid. Mech.*, 1990, **vol. 216**, pp. 103-132.

5 Публикации

1. Гридчина М.Е., Осипов А.И., Уваров А.В. Взаимодействие звуковых и сильных ударных волн. // *Аэромеханика и газовая динамика*, 2002, N2, с.40-47.
2. Гридчина М.Е., Осипов А.И., Уваров А.В. Применение метода гидродинамических мод для исследования взаимодействия малых возмущений с ударной волной // *Математическое моделирование*, 2004, т.16, N 6, с.61-64.
3. Гридчина М.Е., Осипов А.И., Уваров А.В. Влияние релаксационной зоны на взаимодействие малых гидродинамических возмущений с ударными волнами // *Вестник МГУ, серия 3, Физика. Астрономия*, 2005, N 2, с. 23-28.
4. Гридчина М.Е., Осипов А.И., Уваров А.В. Влияние структуры ударной волны на ее взаимодействие с малыми гидродинамическими возмущениями. // *Аэромеханика и газовая динамика*, 2005, N 2, с.41-44.
5. Гридчина М.Е. Анализ неустойчивости сильных ударных волн // Конференция "Ломоносов-2001", Москва, 2001, с.115-116.
6. Гридчина М.Е. Взаимодействие звуковых и сильных излучающих ударных волн // Конференция "Ломоносов-2002", Москва, 2002, с.114-115.

7. Гридчина М.Е., Осипов А.И., Уваров А.В. Влияние неравновесности за фронтом ударной волны на ее взаимодействия с акустическими возмущениями // VI Международная научная конференция "Молекулярная биология, химия и физика неравновесных систем", Иваново-Плес, 2002, с.281.
8. Гридчина М.Е., Осипов А.И., Уваров А.В. Взаимодействие звуковых и сильных излучающих ударных волн // IV Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях, С.-Петербург, 2002 с.185-186.
9. Гридчина М.Е. Влияние релаксационных процессов на взаимодействие ударной волны с вихревыми и тепловыми неоднородностями среды // Конференция "Ломоносов-2003", Москва, 2003, с.80.
10. Гридчина М.Е. Влияние ионизации и излучения на взаимодействие сильных ударных волн с акустическими // Конференция "Ломоносовские чтения-2003", Москва, 2003, с.185.
11. Гридчина М.Е., Осипов А.И., Уваров А.В. Применение метода гидродинамических мод для исследования взаимодействия малых возмущений с ударной волной // XII Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, Владимир, 2003, с.217-218.
12. Гридчина М.Е., Осипов А.И., Уваров А.В. Взаимодействие вихревых и тепловых возмущений с ударной волной // VII Международная научная конференция "Молекулярная биология, химия и физика гетерогенных систем", Москва-Плес, 2003, с.248-251.
13. Гридчина М.Е., Осипов А.И., Уваров А.В. Взаимодействие слабых ударных волн с малыми гидродинамическими возмущениями // XX Юбилейный Международный семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям, Санкт-Петербург, 2004, с.51-52.