

КИЕВСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени ТАРАСА ШЕВЧЕНКО

*На правах рукописи*

ГОЛДАЕВИЧ Евгений Львович

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХИМИЧЕСКИ  
АКТИВНЫХ НЕРАВНОВЕСНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ  
СРЕД И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГЕТЕРОФАЗНЫХ  
СИСТЕМ**

Специальность 01.04.08 — Физика и химия плазмы

*Автореферат*

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Киев — 1995

АВ 32, 790



00755709 (X)

является рукописью

Работа выполнена в Отделении высокотемпературного преобразования энергии  
Института проблем энергосбережения  
Национальной академии наук Украины

Научные руководители:

член-корреспондент НАН Украины Корчевой Ю.П.

кандидат физико-математических наук Лиситченко В.В.

Официальные оппоненты:

1. доктор физико-математических наук, профессор Чутов Ю.И.

2. кандидат физико-математических наук Шамрай К.П.

Ведущая организация:

Институт теоретической физики НАН Украины, Киев

Защита состоится "18" сентября 1995 года в 15 часов на заседании специализированного совета (шифр Д 01.01.17) при Киевском университете им. Тараса Шевченко по адресу: 252127 Киев - 127, просп. акад. Глушкова, 6, аудитория N 46

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.  
Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1995 года.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА

канд. физ.-мат. наук  
ШКАВРО А.Г.

ЛННБ ім. В. Стефаника  
АН України

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Исследование акустических свойств неравновесных газоразрядных сред сложного химического состава, а также гетерофазных систем, находящихся под воздействием мощных энергетических потоков, является одним из наиболее интересных и перспективных направлений современной гидродинамики, облик которой определяет изучение неравновесных явлений. Прежде всего это вызвано широким использованием неравновесных сред в целом ряде технических устройств и технологий, применяемых в металлургии, химии, энергетике, машиностроении, горнодобывающей индустрии и ряде других отраслей промышленности. Становление физики неравновесных систем, начавшееся в 60-е годы благодаря лазерной революции, продолжается бурными темпами и в наши дни, поскольку неравновесные среды — это и рабочее тело высокоэффективных промышленных установок, и верхняя атмосфера земли, и межзвездная среда, включая межзвездные облака, и разрядная плазма. Интерес исследователей к гидродинамике неравновесных систем определяется в первую очередь тем, что она сейчас переживает стадию выявления новых физических эффектов и формулировки основных уравнений. Это поле деятельности принадлежит физике, и роль физических исследований на данном этапе является определяющей.

Распространение гидродинамических возмущений в неравновесной низкотемпературной плазме сопровождается целым рядом эффектов, отсутствующих при распространении аналогичных возмущений в первоначально равновесной среде. В частности, возможно усиление звуковых волн, то есть возникновение акустической неустойчивости. В широком спектре плазменных неустойчивостей акустическая занимает особое место, так как в ней участвует нейтральная составляющая — преобладающая компонента низкотемпературной плазмы. Усиление акустических возмущений неравновесной средой переводит систему на определенном этапе в стадию нелинейной эволюции, характеризуемую формированием слабых ударных волн (УВ). Слабые УВ неизбежно возникают и при импульсном способе создания низкотемпературной плазмы, и в устройствах, где в качестве электродов используются плазмен-

ные листы (при поджиге плазменных листов в приэлектродной области образуются слабые УВ с числами Маха  $M = 1 \div 1.4$ , которые распространяются навстречу друг другу).

Плазма, как среда распространения УВ, отличается от простого газа наличием компонент, для которых характерны большое различие в массах, подверженность действию электрических и магнитных полей, участие в большом числе обратимых и необратимых реакций. Иерархия масштабов, отвечающих различным физическим процессам, предопределяет сложную структуру УВ.

Исследования акустики высокотемпературных гетерофазных систем в значительной степени стимулированы их практическим использованием. Воздействие концентрированных потоков энергии на поверхность материала не только меняет ее фазовое состояние, но и создает условия для возбуждения новых коллективных степеней свободы на межфазной границе. Взаимное влияние гидродинамических движений в газовой среде и в образующемся жидком слое определяет глобальное поведение гетерогенных систем. Это открывает новые возможности для их диагностики, а также управления многими технологическими процессами.

Важность прикладного аспекта, сложности однозначной интерпретации результатов экспериментальных исследований, недостаточная изученность физической стороны проблемы определили основное содержание диссертационной работы, которая посвящена теоретическому анализу динамических и структурных характеристик слабонелинейных гидродинамических возмущений в химически активной молекулярной плазме тлеющего разряда, а также теоретическому изучению вопроса о распространении акустических волн вблизи жидкой поверхности при наличии концентрированных потоков энергии через межфазную границу.

Цель работы состоит в выяснении роли механизмов объемного тепловыделения и переноса, различных релаксационных процессов в формировании структуры слабых УВ, их влияния на динамические характеристики возмущений конечной амплитуды, распространяющихся в неизотермичной газоразрядной плазме, химическая активность которой стимулирована возбуждением колебательных степеней свободы

молекул. При изучении взаимодействия акустических волн с поверхностью неоднородно нагретой жидкости целью исследований является выяснение роли объемных градиентов температуры в возникновении особенностей в поведении коэффициента отражения звуковой волны как функции угла падения.

Научная новизна результатов, представленных в диссертационной работе, состоит в создании замкнутой теоретической модели, предоставляющей возможность исследовать динамику гидродинамических возмущений конечной амплитуды в неравновесных молекулярных газах сложного химического состава. Впервые установлены и особенности взаимодействия звуковых волн с поверхностью неоднородно нагретой жидкости. Приоритетными являются следующие положения:

- в молекулярной плазме тлеющего разряда, химическая активность которой стимулирована колебательной неравновесностью внутренних степеней свободы молекул, действуют два механизма, определяющих структуру и динамику возмущений нейтральной компоненты с конечной амплитудой: дисперсионный, обусловленный наличием легкой электронной компоненты, и рэлеевский, обусловленный передачей энергии от высокоэнергетичных электронов низкоэнергетичным нейтралам;

- эволюция слабонелинейных волн в нейтральной компоненте описывается уравнением типа Кортевега-де Вриза-Бюргерса (КдВБ) с линейным источником - модифицированным уравнением КдВБ;

- структура слабых ударных волн (УВ), описываемая модифицированным уравнением КдВБ, зависит от знака коэффициента дисперсии; если коэффициент дисперсии положителен, то на профиле УВ развиваются осцилляции, которые распространяются от фронта вниз по потоку; если коэффициент дисперсии отрицателен, то осцилляции возникают перед фронтом УВ, образуя предвестники и лидеры; при положительной дисперсии на больших временах осцилляции трансформируются в цепочку солитонов, амплитуды которых стремятся к фиксированному значению;

- профиль УВ в диспергирующей плазме представляет собой суперпозицию профилей нейтральной и заряженных компонент, пространственные распределения которых различны; различия существен-

ны в области больших градиентов профиля плотности нейтралов и вызваны действием амбиполярной диффузии, а также дрейфом заряженных частиц во внешнем электрическом поле;

– в неравновесных газовых смесях, в которых имеет место тепловыделение, а дисперсия незначительна, динамика слабонелинейных волн описывается модифицированным уравнением Бюргерса;

– рост фоновой температуры плазмы ведет к нарушению фазовых условий усиления волн давления рэлеевским механизмом, что оказывает стабилизирующее воздействие на развитие акустической неустойчивости;

– построение решения задачи Коши для неавтономного модифицированного уравнения Бюргерса с начальным возмущением типа сильного разрыва произвольной формы методом сращиваемых асимптотических разложений; получение аналитических выражений, описывающих эволюцию профиля слабого УИ, его амплитуды, динамику ширины фронта и скорости его движения;

– установление факта существования области параметров системы, в которой временная зависимость ширины фронта УИ с начальным профилем треугольной формы носит немонотонный характер;

– при отражении звуковых волн от межфазной границы газ – жидкость аномально большое поглощение отраженной волны в области малых углов скольжения вызвано резонансным поглощением на диссипативных модах – вязкостной и энтропийной;

– величина поглощения в резонансном максимуме существенно образом зависит от величины и направления температурного градиента в объеме неоднородно нагретой жидкости.

**Научная значимость** представленных результатов состоит в том, что они способствуют глубокому пониманию фундаментальных процессов, лежащих в основе образования структуры ударных волн в акустически активных плазменных средах сложного состава. Предложенная эволюционная модель дает возможность исследовать динамику слабых УВ в неравновесных нестационарных газовых средах аналитическими методами в широком диапазоне физических параметров системы. Проведенное исследование взаимодействия звуковой волны с поверхностью

термически неравновесной жидкости объясняет механизм поглощения энергии отраженной волны при малых углах скольжения, а также влияние объемных градиентов температуры на действие этого механизма. Добытые знания могут служить базисом для описания поведения плазмы и гетерогенных сред в условиях конкретного устройства, без чего трудно рассчитывать на его адекватное функционирование, диктуемое назначением.

**Практическая ценность** полученных данных заключается в возможности их использования для интерпретации поведения УВ в верхних слоях атмосферы при возмущении этих слоев летательными аппаратами и небесными телами. Проведенные исследования могут представлять интерес для прогнозирования поведения звуковых и слабых ударных волн в лабораторных и промышленных установках и устройствах, где неравновесная низкотемпературная плазма и высокотемпературные гетерофазные среды используются в качестве рабочего тела (газовые лазеры, плазмохимические реакторы, устройства по обработке поверхности материалов концентрированными потоками энергии и т.п.). Полученные результаты важны и для разработки новых, а также совершенствования уже существующих методов акустической диагностики систем указанной природы.

**Достоверность** полученных результатов обоснована использованием теоретических моделей, адекватных в главных чертах экспериментальным условиям, корректной постановкой рассматриваемых задач, соответствием наблюдаемым в экспериментах эффектам, сводимостью полученных результатов в предельных случаях к результатам работ других авторов.

**На защиту выносятся следующие основные положения.**

1. В молекулярной плазме тлеющего разряда, химическая активность которой стимулирована возбуждением колебательных степеней свободы молекул, эволюция слабонелинейных возмущений давления нейтральной компоненты на нестационарном температурном фоне может быть описана неавтономным модифицированным уравнением Кортевега - де Вриза - Бюргерса с линейным источником, который учитывает влияние возмущенных объемных источников тепловыделения активной среды.
2. Впервые показано, что структура слабых ударных волн в нейтральной компоненте химически активной плазмы тлеющего разряда

определяется двумя совместно действующими механизмами: дисперсионным, который управляет движением электронов в областях со значительными пространственными градиентами профиля плотности нейтралов, и рэлеевским, ответственным за усиление акустических возмущений распределенными источниками тепла. В зависимости от знака коэффициента дисперсии профиль скачка давления нейтральной компоненты модулируется распадными осцилляциями либо вниз по потоку (положительная дисперсия), либо вверх, порождая предвестники и лидеры перед фронтом ударной волны (отрицательная дисперсия).

3. Впервые установлено, что осцилляционному профилю слабой ударной волны в нейтральной компоненте плазмы отвечают осцилляционные профили концентраций заряженных компонент. Пространственные распределения каждой из компонент различаются между собой как по амплитуде, так и по фазе.
4. Впервые доказано, что рост фонового давления в плазме с нестационарной фоновой температурой оказывает стабилизирующее воздействие на развитие акустической неустойчивости.
5. Разработана теоретическая модель, позволяющая описывать динамику гидродинамических возмущений конечной амплитуды в акустически активных средах без дисперсии неавтономным модифицированным уравнением Бюргерса. Построено аналитическое решение задачи Коши для модифицированного уравнения Бюргерса, описывающее эволюцию слабых ударных импульсов с профилем произвольной формы. Установлен факт существования области параметров системы, в которой временная зависимость ширины ударного фронта имеет немонотонный характер.
6. Впервые показано, что при отражении звуковых волн от поверхности неоднородно нагретой жидкости аномально большое поглощение отраженной волны в области малых углов скольжения вызвано резонансным поглощением на диссипативных модах – вязкостной и энтропийной. Величина поглощения в резонансном максимуме существенным образом зависит от величины и направления температурного градиента в объеме неоднородно нагретой жидкости.

**Апробация работы и публикации.** Результаты исследований, выполненных по теме диссертации, докладывались на III Всесоюзной конференции по физике газового разряда (Киев, 1986), X Европейской конференции по атомной и молекулярной физике в ионизированных газах (Орлеан, 1990), XX Международной конференции по явлениям в ионизированных газах (Пиза, 1991), VIII Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы (Минск, 1991). По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 98 страницах машинописного текста, а также списка литературы, содержащего 140 наименований. Общий объем диссертации – 109 страниц, включая 8 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведено обоснование актуальности исследуемой в диссертации проблемы, сформулирована цель работы, кратко описано ее содержание и изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** дан обзор полученных к настоящему времени результатов экспериментальных и теоретических исследований по распространению гидродинамических возмущений в низкотемпературной плазме и других активных средах, а также по взаимодействию акустических волн с межфазной границей вязкостно – теплопроводных сред.

В разделе 1.1 рассмотрен вопрос об устойчивости акустических возмущений в активных средах, описаны возможные механизмы акустических неустойчивостей и дан обзор результатов исследований по данному вопросу.

Раздел 1.2 содержит анализ современного состояния дел в динамике гидродинамических возмущений конечной амплитуды. Рассмотрены существующие эволюционные модели и представлены данные по исследованию структуры слабых ударных волн.

Обзору работ, связанных с изучением взаимодействия звуковых волн с межфазной границей, посвящен раздел 1.3.

В кратких выводах, изложенных в разделе 1.4, анализируется современное состояние проблемы, составляющей предмет диссертационного исследования.

**Вторая глава** посвящена исследованию эволюции слабонелинейных возмущений гидродинамических полей плоской геометрии в диспергирующей неравновесной газоразрядной молекулярной плазме с нестационарным температурным фоном. Эволюцию гидродинамических

возмущений в таких средах необходимо исследовать на многожидкостных моделях, поскольку на высоких частотах сказывается инерционность тяжелых частиц, и колебания плотностей нейтральной и заряженных компонент плазмы отличаются между собой как по амплитуде, так и по фазе. В аналитическом подходе использована простейшая модель трехжидкостной гидродинамики для неравновесного слабоионизированного газа, представляющего собой неограниченный пространственно однородный положительный столб тлеющего разряда, состоящий из смеси электронов, одного сорта ионов и одного сорта нейтральных молекул.

Раздел 2.1 содержит построение и обоснование физической модели, адекватной в главных чертах своего поведения реальным неравновесным плазмохимическим средам. В рассматриваемой модели источником энергетической неравновесности является электронный газ с температурой  $T_e$ , значительно превосходящей температуру тяжелых частиц  $T$ . Поток энергии от электронов к нейтралам вследствие упругих и неупругих взаимодействий при определенных условиях является причиной усиления акустических возмущений (акустическая неустойчивость). Неупругие взаимодействия электронов с молекулами возбуждают колебательные степени свободы, стимулируя тем самым химическую активность молекул. Вступая между собой в химические реакции, колебательно-возбужденные молекулы часть своей внутренней энергии диссипируют на поступательно-вращательных степенях свободы, чем повышают температуру тяжелых частиц. Для разрядов умеренного давления с температурой электронов 1-3 эВ большая часть мощности разряда расходуется на возбуждение именно колебательных уровней основного электронного состояния молекул. Рассмотрен наиболее интересный для плазмохимических приложений случай интенсивной химической реакции, когда характерное время гидродинамических возмущений  $\tau_s \gg \nu_r^{-1}$ , где  $\nu_r$  - частота химической реакции.

Ионизационно-рекомбинационная кинетика в принятой модели представлена прямой ионизацией электронным ударом и процессами диссоциативной рекомбинации.

Раздел 2.2 содержит последовательный вывод эволюционного урав-

нения для слабонелинейных возмущений давления нейтральной компоненты плазмы. Показано, что полная система уравнений релаксационной гидродинамики и уравнений Максвелла для трехжидкостной модели в квадратичном (по амплитуде возмущений) приближении может быть сведена к одному эволюционному уравнению типа Кортевега - де Вриза - Бюргера (КДВБ) с линейным источником - модифицированному уравнению КДВБ. Для безразмерных величин в сопровождающей системе координат это уравнение имеет вид

$$\partial_\tau \delta + \alpha_1 \delta \partial_\zeta \delta = \alpha_2 \partial_\zeta^2 \delta - \alpha_3 \partial_\zeta^3 \delta + \alpha_4 \delta . \quad (1)$$

Здесь  $\delta$  - относительный уровень возмущения давления нейтральной компоненты,  $\tau$  и  $\zeta$  - время и пространственная координата, нормированные на соответствующие характерные масштабы задачи,  $\alpha_j$  - коэффициенты, сложным образом зависящие от невозмущенных параметров плазмы и в общем случае (при нестационарном температурном фоне) являющиеся функциями времени. В инкремент  $\alpha_4$  в качестве слагаемого входит член  $-\frac{3}{4} \frac{d \ln T_0}{d \tau}$ , описывающий стабилизирующий вклад роста фоновой температуры  $T_0$ .

Пространственно-временные распределения относительных возмущений концентраций электронов и ионов имеют вид

$$\bar{n}'_{e,i} = B_1^{(e,i)} \partial_\zeta^2 \delta + B_2^{(e,i)} \partial_\zeta \delta + B_3^{(e,i)} \delta , \quad (2)$$

где коэффициенты  $B_j^{(e,i)}$  - сложные функции невозмущенных параметров среды,  $\xi = \zeta + \int_0^\tau \bar{c}'(t) dt$ ,  $\bar{c}'$  - безразмерная дисперсионная добавка к фазовой скорости звука.

В разделе 2.3 исследуется распад слабой УВ в плазме с постоянным температурным фоном (коэффициенты  $\alpha_j = const$  в уравнении (1)). Начальная стадия распада описывается задачей Коши для линеаризованного уравнения (1), что справедливо на временах

$$\tau \ll |\alpha_3|^{1/2} / (\alpha_1 |\delta|)^{3/2} ,$$

где  $|\delta|$  - величина скачка давления на фронте УВ, имеющей в начальный момент времени вид

$$\delta(\zeta, \tau=0) = \begin{cases} \delta^- , & \zeta < 0, \\ 0, & \zeta > 0. \end{cases} \quad (3)$$

Решение линеаризированной задачи Коши (1),(3) можно представить в следующей форме

$$\delta(\zeta, \tau) = B \int_{a(\zeta, \tau)}^{\infty} \text{Ai}(z) \exp(\bar{\alpha}_2 z) dz \quad (4)$$

Здесь  $B = \delta^{-1} \exp(\alpha_4 - \bar{\alpha}_2^2/3)$ ,  $a(\zeta, \tau) = \beta \operatorname{sgn} \alpha_3 + \bar{\alpha}_2^2$ ,  $\beta = \frac{\zeta}{\sqrt[3]{3|\alpha_3| \tau}}$ ,  $\bar{\alpha}_2 = \frac{\alpha_2}{\sqrt[3]{(3\alpha_3 \tau)^2}}$ ,  $\text{Ai}(z)$  - функция Эйри. Для положительной дисперсии ( $\alpha_3 > 0$ ) главный член асимптотического разложения решения (4) имеет вид

$$\delta(\zeta, \tau) \sim \frac{B}{2\sqrt{\pi}} \frac{\exp(-\frac{2}{3}a^{3/2} + \bar{\alpha}_2 a)}{a^{1/4}(a^{1/2} - \bar{\alpha}_2)} \quad \text{при } \beta \rightarrow \infty, \quad (5)$$

$$\delta(\zeta, \tau) \sim B \left\{ I_1 + \frac{\exp(-\bar{\alpha}_2 |a|)}{\sqrt{\pi(\bar{\alpha}_2^2 + |a|)}} [\bar{\alpha}_2 |a|^{-1/4} \cos(\frac{2}{3}|a|^{3/2} + \pi/4) - |a|^{1/4} \sin(\frac{2}{3}|a|^{3/2} + \pi/4)] \right\} \quad \text{при } \beta \rightarrow -\infty, \quad (6)$$

где

$$I_1 = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\bar{\alpha}_2^k \Gamma(k+1) [1 + (-1)^k 2 \cos(\frac{k\pi}{3})]}{k! 3^{1+k/3} \Gamma(1 + \frac{k}{3})},$$

$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} x^{z-1} e^{-x} dx$ . Если  $\alpha_3 < 0$ , то тогда

$$\delta(\zeta, \tau) \sim \frac{B \exp(-\bar{\alpha}_2 a)}{\sqrt{\pi(\bar{\alpha}_2^2 + a)}} [\bar{\alpha}_2 a^{-1/4} \cos(\frac{2}{3}a^{3/2} - \pi/4) - a^{1/4} \sin(\frac{2}{3}a^{3/2} - \pi/4)] \quad \text{при } \beta \rightarrow \infty, \quad (7)$$

$$\delta(\zeta, \tau) \sim B \left[ I_1 - \frac{\exp(-\frac{2}{3}|a|^{3/2} + \bar{\alpha}_2 |a|)}{2\sqrt{\pi}|a|^{1/4}(|a|^{1/2} - \bar{\alpha}_2)} \right] \quad \text{при } \beta \rightarrow -\infty. \quad (8)$$

Как видно из (6), для  $\alpha_3 > 0$  распадные осцилляции профиля УВ развиваются вниз по потоку, тогда как для  $\alpha_3 < 0$  осцилляционная структура возникает перед фронтом - (7). Осцилляции возникают и в заряженных компонентах, как это нетрудно видеть из (2), однако их пространственные распределения отличаются от (6),(7) и друг от друга. Такое поведение плазменных компонент может являться причиной появления так называемых дополнительных плазменных образований, обнаруженных

в ряде экспериментов и представляющих собой зоны повышенной концентрации электронов, а также колебаний электрического потенциала, наблюдавшихся как за фронтом, так и перед ним.

В разделе 2.4 сформулированы краткие выводы относительно результатов исследований, проведенных в данной главе.

В третьей главе рассмотрена динамика слабых ударных импульсов (УИ) в акустически активных неравновесных молекулярных газах с нестационарным температурным фоном. В ней показано, что в отсутствие дисперсии эволюцию конечных гидродинамических возмущений можно описывать уравнением Бюргерса с линейным источником (модифицированное уравнение Бюргерса).

Раздел 3.1 посвящен описанию пространственно-временного поведения профиля слабого УИ, эволюции фронта и скорости его движения. Это достигается построением аналитического решения задачи Коши для неавтономного модифицированного уравнения Бюргерса методом сращиваемых асимптотических разложений. Решения получены для УИ с формой начального профиля произвольного вида.

В разделе 3.2 исследуется динамика УИ треугольной формы. Получены и проанализированы аналитические выражения, описывающие эволюцию амплитуды и ширины ударного фронта.

Краткие выводы по третьей главе изложены в разделе 3.3.

В четвертой главе исследуются особенности отражения звуковых волн от граничной поверхности неоднородно нагретой жидкости. В отличие от подробно исследованного случая термодинамически равновесных сред, в термически неравновесных системах звуковая волна, падающая из газа на поверхность неоднородно нагретой по объему жидкости, возбуждает в последней приповерхностные конвективные движения, которые влияют на распределение скоростей и температуры на самой поверхности, а, следовательно, и на условия отражения и поглощения звука. Конвекция вызывается как термокапиллярными силами, возникающими вследствие изменения межфазного натяжения под воздействием неоднородных возмущений температуры поверхности (эффект Марангони), так и переменным давлением акустического поля. Кроме того, для неоднородно нагретой жидкости распределение

поверхностной температуры зависит и от величины локальной деформации межфазной границы.

В разделе 4.1 дается постановка задачи и сформулированы основные уравнения, описывающие процесс взаимодействия с межфазной границей акустической волны, падающей из газового полупространства  $z > \zeta(x, t)$  на поверхность  $z = \zeta(x, t)$  несжимаемой вязкой жидкости, занимающей полупространство  $z < \zeta(x, t)$ . В объеме невозмущенной жидкости создан постоянный градиент температуры за счет поглощения жидкой поверхностью теплового потока плотностью  $Q$ .

В разделе 4.2 исследовано взаимодействие падающей звуковой волны с межфазной границей и получено аналитическое выражение для коэффициента отражения.

Распространение акустической волны в неоднородной среде, в которой имеют место процессы теплопроводности и внутреннего трения, сопровождается возбуждением дополнительных коллективных степеней свободы: тепловой и вязкостной мод колебаний. Это означает, что при взаимодействии падающей волны с межфазной границей от поверхности жидкости распространяются три типа волн:

- отраженная звуковая с длиной  $\lambda$ , распространяющаяся под углом  $\theta$  по отношению к нормали к плоскости  $z=0$ ;
- сильно затухающая тепловая волна с длиной  $\lambda_T \sim \sqrt{l\lambda}$  ( $l$  - длина свободного пробега молекул газа), распространяющаяся под углом к нормали, близким к нулю;
- сильно затухающая вязкостная волна с длиной  $\lambda_\nu \sim \sqrt{l\lambda}$ , которая также, как тепловая распространяется вглубь газа под малым углом.

Решая задачу о трансформации падающей волны, можно выделить малый параметр  $\epsilon = (\chi\omega/c_s^2)^{1/2}$  ( $\chi$  - температуропроводность,  $c_s$  - фазовая скорость адиабатического звука), пропорциональный отношению длины волны тепловой (или вязкостной) моды к длине волны обычного звука:

$$\lambda_\nu/\lambda \sim \epsilon Pr^{1/2} \sim \sqrt{l/\lambda} \ll 1, \quad \lambda_T/\lambda \sim \epsilon \ll 1, \quad (9)$$

где  $\omega$  - циклическая частота звука,  $Pr = \nu/\chi$  - число Прандтля (для газов обычно  $Pr = O(1)$ ). Компоненты волновых векторов и гидродинамические поля, представляющие собой решения исходных уравнений

для гетерофазной системы и удовлетворяющие граничным условиям на межфазной поверхности, определены в решаемой задаче с точностью до членов порядка  $\epsilon$ . Такое приближение позволяет пренебречь объемным поглощением обычных звуковых волн, коэффициент объемной диссипации которых имеет порядок  $1/\lambda \sim \epsilon^2$ .

В выражении для коэффициента отражения градиент температуры, создаваемый внешним источником, присутствует только в безразмерной комбинации параметров  $\delta$ , представляющей собой отношение длины звуковой волны к характерному размеру вертикальной плотностной неоднородности жидкости. Следовательно, влияние термической неравновесности на параметры отраженной волны определяется исключительно соотношением между двумя отмеченными выше масштабами, и с ростом частоты это влияние уменьшается, стремясь к нулю на высоких частотах:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \delta = 0.$$

Существование в газовом полупространстве медленных тепловой и вязкостной волн с большими коэффициентами поглощения является причиной возникновения резонансного максимума в поглощении энергии отраженной звуковой волны в области углов падения  $\theta$ , близких к  $90^\circ$ . При выполнении условий синхронизма максимум наблюдается для тех значений  $\theta$ , при которых  $z$ -компонента фазовой скорости отраженной звуковой волны  $c_{z,z}$  становится сравнимой по величине с фазовыми скоростями тепловой  $c_T$  и вязкостной  $c_v$  волн.

Раздел 4.3 содержит численный анализ зависимости коэффициента отражения  $R = |R|e^{i\varphi}$  от угла падения  $\theta$ , где  $\varphi$  - фазовый сдвиг отраженной звуковой волны по отношению к падающей. В соответствии с расчетными данными представлены графики функций  $|R(\theta)|$  и  $\varphi(\theta)$ .

В разделе 4.4 содержится обсуждение полученных в четвертой главе результатов и даны краткие выводы.

В заключительном разделе диссертации приведены основные результаты и сформулированы выводы по результатам выполненных теоретических исследований. Кратко их можно изложить следующим образом.

1. Эволюция акустических возмущений конечной амплитуды плазмы тлеющего разряда, химическая активность которой стимулирована возбуждением колебательных степеней свободы молекул, может быть описана неавтономным модифицированным уравнением Кортевега - де Вриза-Бюргерса с линейным источником, учитывающим возмущение объемного тепловыделения активной среды.

2. Структура и динамика слабых УВ определяются двумя совместно действующими механизмами: дисперсионным, который управляет движением электронной компоненты в областях со значительными пространственными градиентами профиля плотности нейтралов, и рэлеевским, ответственным за усиление акустических возмущений объемными источниками тепловыделения. В зависимости от знака коэффициента дисперсии профиль скачка плотности нейтралов может быть промодулирован распадными осцилляциями либо вниз по потоку (положительная дисперсия), либо вверх (отрицательная дисперсия), порождая тем самым особенности структуры УВ перед ее фронтом.

3. Осцилляционному профилю нейтралов отвечают осцилляционные профили заряженных компонент, однако форма пространственных распределений каждой из компонент различна. Такое различие приводит к появлению прекурсорных областей нескомпенсированного пространственного заряда.

4. Рост фонового давления в плазме с нестационарным температурным фоном оказывает стабилизирующее воздействие на развитие акустической неустойчивости.

5. В случаях, когда дисперсионные эффекты незначительны, эволюция гидродинамических возмущений конечной амплитуды может быть описана неавтономным модифицированным уравнением Бюргерса. Для описания динамики профиля слабого ударного импульса произвольной формы построено решение задачи Коши методом сращиваемых асимптотических разложений. Анализ эволюции фронта УИ треугольной формы показал существование области параметров системы, в которой временная зависимость ширины ударного фронта имеет немонотонный характер.

6. При отражении звуковых волн от поверхности неоднородно нагретой жидкости аномально большое поглощение отраженной волны в области малых углов скольжения вызвано резонансным поглощением на диссипативных модах - вязкостной и энтропийной. Величина поглощения в резонансном максимуме существенным образом зависит от величины и направления температурного градиента в объеме неоднородно нагретой жидкости.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ  
ДИССЕРТАЦИИ

1. *Голдаевич Е.Л.* Динамика акустического импульса в неравновесной химически активной плазме.- Препринт/ Ин-т проблем моделирования в энергетике АН УССР.- Киев, 1986.- №2.- 34с.
2. *Голдаевич Е.Л.* Влияние релаксационных процессов на структуру ударного импульса в токовой плазме молекулярного газа// III Всесоюзн. конф. по физике газового разряда: Тезисы докладов.- Киев, 1986.- С.422-424.
3. *Goldayevich E.L.* Front velocity of shock waves propagating through a glow discharge in irreversibly reacting gases// Proc. X-th Europ. Conf. on Atomic and Molecular Phys. of Ionized Gases.- Orleans (France), 1990.- P.413-414.
4. *Голдаевич Е.Л., Фисун О.И.* О решении модифицированного уравнения Бюргерса (случай плавных возмущений)// Плазменные преобразователи энергии: Сб. науч. тр.- Киев: Ин-т проблем энергосбережения АН УССР.-1991.- С.46-48.
5. *Goldayevich E.L.* Development of an ion fore-runner caused by a weak shock wave propagating through a glow discharge in chemically active molecular gases// Proc. XX<sup>th</sup> Int. Conf. Phenom. Ionized Gases (ICPIG).- Pisa (Italy), 1991.- Contr. Papers 3.- P.568-569.
6. *Голдаевич Е.Л.* Формирование ионного предвестника слабой ударной волны в химически активной молекулярной плазме тлеющего разряда// Динамические процессы в сложноорганизованных системах: Сб. науч. тр.- М.: Ин-т физ.-техн. проблем.- 1991.- С.73-80.
7. *Голдаевич Е.Л., Лиситченко В.В.* Возникновение осцилляционной структуры ударной волны в плазме тлеющего разряда химически активных молекулярных газов// Материалы VIII Всесоюзной конф. "Физика низкотемпер. плазмы": В 3-х част./ Под ред. О.Г.Мартыненко.- Минск: АНК "ИТМО АН БССР".- 1991.- Ч.1.- С.145-146.
8. *Голдаевич Е.Л.* О взаимодействии звука с межфазной границей в гетерогенных системах со стационарными тепловыми потоками// Проблемы энергосбережения.- 1991.- Вып.6.- С.83-90.
9. *Голдаевич Е.Л.* Отражение акустических волн от поверхности неоднородно нагретой жидкости// Теплофиз. высоких темпер.- 1992.- Т.30, вып.1.- С.98-104.

---

Подп. в печ. 11.05.95 . Формат 60x84/16. Бумага тип. Офс. печать.  
Усл. печ, л. 116 . Усл. кр.-отт. 116 . Уч.-изд. л. 0,95  
Тираж 100 экз. Зак. 125 Бесплатно.

---

Отпечатано в Институте математики АН Украины  
252601 Киев 4, ГСП, ул. Терещенковская, 3



Ab. 32.792

**AB 32.792**