

На правах рукописи

Ахмедова Хамида Гаджиалиевна

**УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ
ПЛАЗМЕ**

Специальность
01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МАХАЧКАЛА – 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Дагестанский государственный университет»

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
доцент **Омарова Н.О.**
кандидат физико-математических наук,
доцент **Хачалов М.Б.**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **Александров А.Ф.**

доктор физико-математических наук,
профессор **Садыков С.А.**

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Защита диссертации состоится «15» мая 2009 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.053.02 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук при Дагестанском государственном университете по адресу: 367000, г. Махачкала, ул. Дзержинского, 12, корпус физического факультета ДГУ, ауд. 2-38.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Дагестанского государственного университета.

Автореферат разослан «11» апреля 2009г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.ф.- м. н.

Курбанисмаилов В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Физика ударных волн (УВ) стала самостоятельным обширным разделом физики, тесно связанным с исследованиями в самых разнообразных областях от астрофизики и физики плазмы до физики твердого тела.

Среди практических задач, при решении которых возникают интенсивные УВ, можно назвать: исследования по нагреву плазмы мощными электрическими разрядами, сопровождающимися формированием УВ большой интенсивности; сверхзвуковое движение в атмосфере; вопросы, связанные с происхождением и ускорением космических частиц; исследования, направленные на реализацию управляемого термоядерного синтеза; создание новых источников излучения высокой яркости и т.д.

В отличие от УВ в нейтральном газе, УВ в плазме сопровождаются такими интересными и недостаточно исследованными до сих пор процессами, как образование стационарных двойных слоев заряда на фронте волны, связанных с поляризацией плазмы и формирование ионных УВ. В этой связи представляет значительный интерес исследование УВ в слабоионизованных газах, в частности, в воздухе, так как распространение УВ в слабоионизованном воздухе имеет место при сверхзвуковых движениях, ядерных взрывах, при различных природных явлениях.

С другой стороны, интерес к изучению УВ в газовых разрядах связан с техническими проблемами, возникающими при создании высокоэффективных плазмохимических реакторов и быстропроточных лазеров большой мощности. В таких системах вблизи зоны энерговыделения могут возникать УВ, которые существенно изменяют как структуру потока, так и физико-химические процессы в реакторе, а в лазерах со сверхзвуковыми потоками слой ударно сжатой плазмы поглощает значительную часть излучения и существенно влияет на динамику плазмы. Это приводит к снижению генерации излучения с ростом интенсивности УВ (или даже к срыву генерации в молекулярных лазерах).

Самостоятельный интерес представляет процесс поперечного (по отношению к току) переноса фронта ионизации и особенности формирования УВ в магнитном поле. Наложение магнитного поля вносит существенные особенности в развитие УВ на всех его стадиях - позволяет выявить физические процессы характерные для тех или иных стадий. Причем представляет особый интерес исследование влияния магнитного поля на развитие УВ в условиях, когда градиент давления магнитного поля соизмерим с градиентом газокINETического давления.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование и теоретическое обоснование механизмов формирования и распространения УВ, развивающихся из области расширяющегося катодного пятна и искрового канала в слабоионизованной плазме в газах

высокого давления, как при наличии, так и при отсутствии внешнего продольного магнитного поля.

Основные задачи исследования:

- разработка и развитие методов комплексного экспериментального и теоретического исследования механизмов формирования и распространения УВ при импульсных разрядах в газах высокого давления с достаточным пространственно-временным разрешением;
- исследование влияния параметров разрядного контура на эффективность энерговыклада в разряд, интенсивность и структуру фронта формирующейся УВ.
- исследование процессов формирования УВ и поперечного переноса фронта ионизации во внешнем магнитном поле.
- исследование особенностей взаимодействия УВ со слабоионизованной плазмой;
- определение каналов диссипации энергии в процессах гашения интенсивности УВ.

Объектом исследования явились свободно расширяющиеся самостоятельные импульсные разряды, сопровождающиеся формированием УВ достаточной интенсивности в межэлектродных промежутках с характерными расстояниями (0,3-1 см) в аргоне в диапазоне давлений 1-3 атм и в воздухе при прикладываемых внешних полях 6,8-25 кВ/см и напряженностях внешнего продольного магнитного поля в диапазоне от 90 до 250 кЭ.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи был принят комплексный подход, включающий использование различных традиционных экспериментальных методов исследования как макроскопических параметров импульсных разрядов: электрических, спектральных и оптических с пространственно-временным разрешением ~10 нс, так и внутренних, таких как концентрация и температура электронов в плазме искрового канала и катодного пятна. Была также разработана специальная методика измерения напряженности в двойном электрическом слое на фронте УВ с помощью плоского сетчатого конденсатора.

Научная новизна исследования. Впервые проведено комплексное экспериментальное исследование и теоретическое обоснование механизмов формирования и распространения УВ в слабоионизованной плазме в газах высокого давления с наносекундным временным разрешением как при наличии, так и при отсутствии внешнего продольного магнитного поля.

При этом в диссертации впервые:

- Изучены физические закономерности распространения фронта УВ по слабоионизованной плазме, развивающейся из области расширяющегося катодного пятна при взрывных процессах на катоде, исследовано влияние продольного магнитного поля на динамику плазмы катодного пятна.

Экспериментально и расчетами показано, что разлет плазмы катодного пятна носит адиабатический характер.

- Экспериментально изучены особенности формирования УВ и поперечного переноса фронта ионизации во внешнем магнитном поле. Показано, что вследствие роста ширины релаксационного слоя на фронте УВ и замедления скорости релаксационных процессов в присутствии магнитного поля распределение энергетической яркости свечения в радиальном направлении становится более однородным.

- Предложена методика определения напряженности поля и потенциала двойного электрического слоя на фронте УВ, распространяющейся в слабоионизованной плазме. Измерены скорости распространения УВ, оценена скорость диссипации энергии. Показано, что причиной образования двойного электрического слоя в ион-ионной плазме является разрушение отрицательных ионов в результате нагрева плазмы на фронте волны.

Практическая ценность работы в основном определяется актуальностью тематики и новизной проведенных исследований, существенно расширивших наше понимание физических особенностей генерации и распространения УВ в слабоионизованной плазме в сильных магнитных полях.

С практической точки зрения, результаты проведенных исследований и полученные новые закономерности позволяют прогнозировать характер и особенности протекания ударно-волновых процессов, возникающих на начальных стадиях развития импульсных разрядов в газах высокого давления, что важно для создания различных плазмодинамических систем и устройств.

Полученные в работе результаты по формированию и распространению УВ в слабоионизованной плазме могут быть использованы при исследовании движения тел со сверхзвуковыми скоростями в ионизованном воздухе, для повышения эффективности плазмохимических устройств и оптимизации параметров быстропотоковых газовых лазеров, и в других задачах.

Достоверность научных результатов и обоснованность научных положений базируется на использовании современных средств диагностики с высоким временным и пространственным разрешением, согласованности результатов теоретических исследований с результатами эксперимента и их согласие с имеющимися данными других авторов, систематичности экспериментальных и теоретических исследований в широком диапазоне начальных условий для различных газовых сред.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Формирование УВ в газоразрядных промежутках высокого давления сопровождается образованием катодных пятен, которые приводят к формированию диффузионных каналов, влияющих на динамические и энергетические характеристики этих волн: с увеличением

перенапряжения на промежутке увеличивается диаметр прорастающего канала и уменьшается скорость его прорастания.

2. Расширяющаяся плазма катодного пятна формирует УВ, которая переносит фронт ионизации вдоль направления электрического поля с большей скоростью, чем в радиальном направлении, а наложение продольного магнитного поля приводит к уменьшению скорости расширения прикатодной плазмы в радиальном направлении.
3. Скорость распространения УВ, развивающейся из области расширяющегося искрового канала до отрыва ее от токоведущего канала зависит от напряженности магнитного поля и не зависит от нее после такого отрыва.
4. Уменьшение скорости расширения плазменного канала в нейтральный газ обусловлено скачком магнитного давления на границе канала, которое приводит к уменьшению интенсивности УВ, уменьшению энергии, идущей на расширение УВ и увеличению внутренней энергии плазмы и ее излучения.
5. При распространении УВ по слабоионизованной ион-ионной плазме на фронте волны возникает двойной электрический слой, что объясняется разрушением отрицательных ионов в результате нагрева плазмы вследствие ее взаимодействия с УВ. Разработана методика определения напряженности поля и потенциала двойного электрического слоя на фронте УВ с помощью плоского конденсатора, образованного двумя сетчатыми электродами. Экспериментально показано, что скорость диссипации энергии УВ пропорциональна ее интенсивности.

Апробация результатов исследования и публикации.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на XXXIII и XXXVI Международных конференциях по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2006, 2009), на IV, V Всероссийских конференциях по «Физической электронике» (Махачкала, 2006, 2008), на Международной конференции «Фазовые переходы и нелинейные явления в конденсированных средах» (Махачкала, 2007), а также на научных семинарах и научно-практических конференциях в Даггосуниверситете в период 2004 – 2008 г.г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ (из них 2 статьи в рецензируемых изданиях из перечня ВАКа), список которых приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. Личный вклад автора в работы, на основе которых написана диссертация, является определяющим. Основные результаты экспериментов и расчетов, представленные в диссертации, получены непосредственно автором или при ее определяющем личном участии. Анализ всего цикла работ, выводы диссертации и основные положения, выносимые на защиту, также принадлежат автору.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 133 страниц текста, включая 36 рисунков. Список цитируемой литературы насчитывает 109 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы основные задачи и цели исследования, а также основные положения, выносимую на защиту, показана научная новизна полученных результатов. Приводится краткое содержание диссертации.

В первой главе приводится краткий обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных нестационарным газодинамическим процессам в импульсных разрядах в газах высокого давления. Проведенный анализ экспериментальных и теоретических работ показывает, что формирование и распространение УВ исследовалось как в молекулярных (в воздухе, азоте, кислороде, водороде), так и атомарных (гелий, аргон) газах. Но, несмотря на обилие работ, структура фронта УВ, образование фронта и динамика двойного слоя на фронте УВ практически не изучены. Это в большей мере относится к таким газам как аргон и воздух. В воздухе наряду с атомарными ионами существуют молекулярные и сложные (кластерные) ионы. Кинетика кластерных и молекулярных ионов может существенно влиять на характер образования двойного слоя, величину поля этого слоя и т.д. С другой стороны, характер диссипации энергии УВ в воздухе будет отличаться от характера диссипации энергии в атомарных газах. В литературе также нет полных исследований влияния магнитного поля на особенности формирования УВ.

Вторая глава диссертации посвящена описанию экспериментальной установки и ее основных элементов: описание методик и условий эксперимента, методов исследования эффективности фотоионизации газа, основных методов измерения электрических параметров: разрядного тока, напряжения, сопротивления и энергии, вкладываемой в разряд, а также оптических и спектральных характеристик.

Известно, что характеристики импульсного разряда (сила тока, геометрические размеры, интенсивность излучения и др.) меняются на много порядков за очень малые времена. В связи с этим экспериментальная установка создавалась исходя из следующих требований:

1. обеспечение необходимого временного разрешения измеряемых параметров - электрических не хуже чем 10 нс, картин развития свечения не хуже чем 10 нс и спектральных не хуже чем 40 нс;
2. использование пробойных импульсов напряжения с регулируемой амплитудой и крутым передним фронтом (меньше, чем 10 нс);
3. создание в области, с характерным размером 10 мм импульсных магнитных полей напряженностью до 250 кЭ с длительностью больше 100 мкс;
4. создание в разрядном промежутке начальной плотности электронов $\approx 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Для формирования высоковольтных импульсов напряжения и предыонизации разрядного промежутка была создана традиционная установка на накопительных элементах, собранная в коаксиальной компоновке из малоиндуктивных элементов - емкостей типа КВИ и сопротивлений типа ТВО (§ 2.1).

При исследовании стадий слабого тока разрядная емкость составляла $C_1=10^{-8}$ Ф, а при исследовании сильноточных стадий $C_1=5 \cdot 10^{-8}$ Ф.

Измерение малых предпробойных токов ($10^{-3} - 10^{-1}$ А) производилось осциллографированием сигнала с малоиндуктивного шунта $R_5 = 1 - 10$ Ом. На стадиях большого тока использовался пояс Роговского. Временное разрешение измерения тока составляло 7 нс, максимальная погрешность в измерении напряжения 10%. Начальная концентрация электронов, создаваемых фотоионизацией газа в промежутке, оценивалась по измеренному току в разрядной цепи при постоянном напряжении на промежутке 100-300 В (§ 2.2).

Магнитное поле создавалось разрядом батареи конденсаторов через соленоид, в котором и помещался исследуемый промежуток. Импульсные магнитные поля измерялись индукционным датчиком, представляющей собой катушку, намотанную (10 витков) на фарфоровую трубку диаметром 1,5 мм, при диаметре провода 0,1мм и длине намотки 1-2 мм, сигнал с которого поступал на пассивную интегрирующую RC – цепочку (§ 2.3).

Регистрация пространственно-временного развития разряда производилась в покадровом режиме электрооптическим затвором Керра (ЭОЗ). При размерах электродов $L=4$ см и межэлектродном расстоянии 0,4 см полное открытие ячейки происходило при напряжении 9 кВ. Начальные стадии пробоя исследовались с применением электронно-оптического преобразователя типа ФЭР 2-1 (ЭОП), работающим как в покадровом, так и в непрерывном режиме, временное разрешение которого в непрерывном режиме развертки составляло около $3 \cdot 10^{-11}$ с. Наиболее яркие стадии разряда разворачивались во времени с помощью сверхскоростного фотохронографа СФР с временным разрешением 10 нс. Оптические картины, снятые при помощи ЭОЗ, ЭОП и СФР, представляют полную информацию о характере газодинамических и оптических явлений, сопутствующих формированию и развитию плазменного канала и УВ в импульсных разрядах в газах высокого давления (§ 2.4).

Регистрация спектров излучения разряда осуществлялась как фотографическим, так и фотоэлектрическим способами. Диагностический стенд включал в себя вакуумную систему, спектрограф (СТЭ-1) со скрещенной дисперсией, призмный монохроматор (ДМР-4), генератор импульсов напряжения с амплитудой до 25 кВ и фронтом нарастания ≈ 10 нс, фотоумножители (ФЭУ-29, ФЭУ-79, ФЭУ-87), разрядные камеры с кварцевыми окнами, скоростные и высоковольтные осциллографы, систему синхронизации и предыонизации (создаваемая плотность электронов $n_0 \approx 10^8 - 10^{10}$ см $^{-3}$) (§ 2.5).

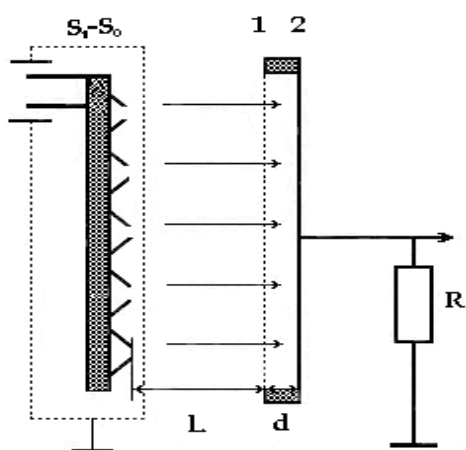


Рис. 1. Схема для измерения концентрации заряженных частиц

Для исследования эффективности фотоионизации газа собственным излучением и определения напряженности поля двойного слоя на фронте УВ была создана экспериментальная установка, принцип действия которой поясняется электрической схемой, изображенной на рис.1 (§ 2.6).

Плоский фронт ультрафиолетового излучения создавался с помощью решетки искровых разрядников, расположенных на расстоянии L от

сетчатого электрода 1. Между сетчатым электродом 1 и коллекторном сплошным электродом 2 создается однородное электрическое поле. Ионы под действием поля дрейфуют к коллектору 2, ток с которого осциллографируется. Решетка искровых разрядников состоит из 25 одинаковых промежутков, равномерно расположенных на диске диаметром 56 мм и соединенных последовательно. На искровые разрядники подается импульс напряжения амплитудой до 25 кВ и длительностью ≈ 100 нс. Минимальное напряжение срабатывания разрядников $\approx 6,5$ кВ. Энергия, вкладываемая в разряд, менялась в пределах 0,2 – 100 Дж.

Третья глава диссертации посвящена результатам исследования формирования и распространения УВ как при взрывных процессах на катоде, так и на стадии расширения искрового канала. Наиболее ясное представление о динамике ионизационных процессов дают пространственно-временные исследования свечения газоразрядного промежутка.

В §3.1 представлены пространственные формы изучаемых разрядов, и результаты влияния начальных условий на динамику формирования искрового канала в аргоне атмосферного давления, как во внешнем продольном магнитном поле, так и в его отсутствии.

Исследования с помощью электрооптического затвора Керра и фотоэлектронного регистратора показали, что с ростом перенапряжения формируются несколько катодных пятен, которые, сливаясь, образуют широкий столб плазмы, с которого прорастал искровой канал. С увеличением перенапряжения скорость прорастания канала уменьшается, а диаметр сформировавшегося канала увеличивается.

В §3.2 приведены результаты исследования динамики УВ, развивающейся из области расширяющегося катодного пятна, определены параметры плазмы катодного пятна. При взрывных процессах, таких как образование катодного пятна, в газах с нормальными термодинамическими свойствами, формируются УВ, которые распространяются по

слабоионизованной плазме. Выделение большой удельной энергии ($16,2 \cdot 10^4$ Дж/см³) за очень короткие времена ($\approx 10^{-8}$ с) вызывает расширение плазмы катодного пятна со сверхзвуковой скоростью ($\approx 10^6$ см/с). Расширение плазмы катодного пятна происходит в первые 40-50 нс, в дальнейшем его размеры изменяются очень слабо (см. рис.2). Именно в течение первых десятков наносекунд формируется УВ, распространение которой по слабоионизованному столбу разряда вызывает дополнительный рост ионизации и формирование диффузного канала разряда.

Специальные эксперименты в сильных продольных магнитных полях с использованием быстродействующего электрооптического затвора Керра показали, что продольное магнитное поле уменьшает скорость расширения прикатодной плазмы в радиальном направлении. Уменьшение скорости радиального расширения катодного факела, особенно на начальном этапе его развития, указывает на соизмеримость градиента магнитного поля с градиентом газодинамического давления.

При наличии магнитного поля расширение будет определяться разностью газодинамического и магнитного давлений, т.е.

$$kru_H^2 = kru^2 + \frac{H_{cp}^2}{8p} - \frac{H_0^2}{8p} = kru^2 - \frac{H_0^2}{8p} \left[1 - \left(\frac{H_{cp}}{H_0} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

Здесь u_H – скорость расширения катодного факела в радиальном направлении при наличии магнитного поля, H_0 – магнитное поле на границе канала, H_{cp} – среднее магнитное поле в плазме факела, k – коэффициент, учитывающий противодействие газа ($k \approx 0,9$).

Из (1) определяли отношение $\frac{H_{cp}}{H_0}$, которое характеризует степень проникновения поля в плазму факела

$$\frac{H_{cp}}{H_0} = \left[1 - \frac{8p}{H_0^2} kr(u^2 - u_H^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Используя экспериментальные значения u и u_H , определили отношение $\frac{H_{cp}}{H_0} \approx 0,4-0,5$. Влияние магнитного поля на скорость расширения катодного факела указывает на гидродинамический механизм расширения.

Распространение УВ, инициированной катодным пятном, по столбу разряда (по слабоионизованной плазме), естественно, вызывает дополнительный рост ионизации и формирование диффузного канала, вдоль которого в последующем прорастает искровой канал со скоростью $\approx 10^7$ см/с. Скорость же распространения вдоль плазменного столба выше, чем в невозмущенном газе (в радиальном направлении), т.е. фронт волны сферически несимметричен. Это объясняется тем, что температура газа в слабоионизованном столбе больше, чем температура окружающего газа. А УВ является дополнительным источником нагрева газа в диффузном канале.

Интересными представляются результаты сравнения скорости радиального расширения плазмы катодного пятна в аргоне и в воздухе. Радиальная скорость расширения плазмы катодного пятна в воздухе

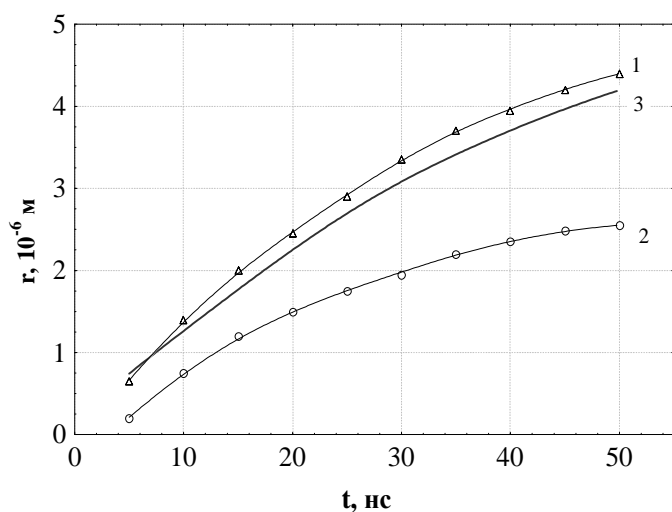


Рис.2. Радиус расширяющейся плазмы катодного пятна
1) $H = 0$; 2) $H = 200$ кЭ;
3) расчет в адиабатическом приближении

меньше, чем в аргоне при сравнимых энерговкладах, что свидетельствует о более быстрой диссипации энергии УВ, переносящей фронт ионизации в воздухе, чем в Ar.

Быстрое прекращение радиального расширения плазмы катодного пятна указывает на адиабатический характер разлета плазмы. Это позволяет найти следующую зависимость радиуса расширяющейся плазмы катодного пятна от времени в адиабатическом приближении

$$r(t) \approx \left[\left(\frac{g+1}{2g} \right)^{1/2} \left(\frac{3g+2}{2} \right) \cdot r_m^{3g/2} \cdot c \cdot t + r_0^2 \right]^{\frac{2}{3g+2}}, \quad (3)$$

где r_m – конечные размеры плазменного образования, определяемые равенством давления плазменного поршня давлению окружающего газа, g -показатель адиабаты, r_0 – начальный радиус катодного пятна.

Полученная зависимость удовлетворительно согласуется с экспериментальными значениями на начальном этапе расширения плазмы катодного пятна. Из сопоставления экспериментальных и расчетных данных следует, что наилучшее совпадение имеет место при $r_0 \cong 10^{-6}$ м, что соответствует данным (см. рис.2), полученным в настоящей работе.

В § 3.3. представлены результаты исследования влияния параметров разрядного контура и внешнего продольного магнитного поля на развитие искрового канала и формирование УВ. Быстрое изменение сопротивления разрядного канала приводит к сильной зависимости тока и напряжения на промежутке от параметров цепи, в частности, от индуктивности и зарядной емкости. Разряд по истечении определенного времени переходит в колебательный режим. Момент перехода определяется условием равенства импеданса цепи и активного сопротивления канала:

$$R(t) \approx 2r_0 = 2 \left(\frac{L}{C_1} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

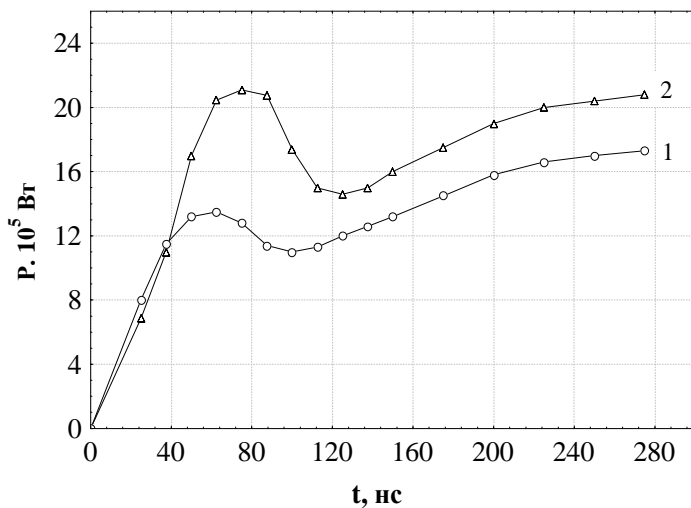


Рис.3. Скорость энерговклада в разряд (E/p=10 В/см ∅То.)
1) N=0; 2) N=200 кА.

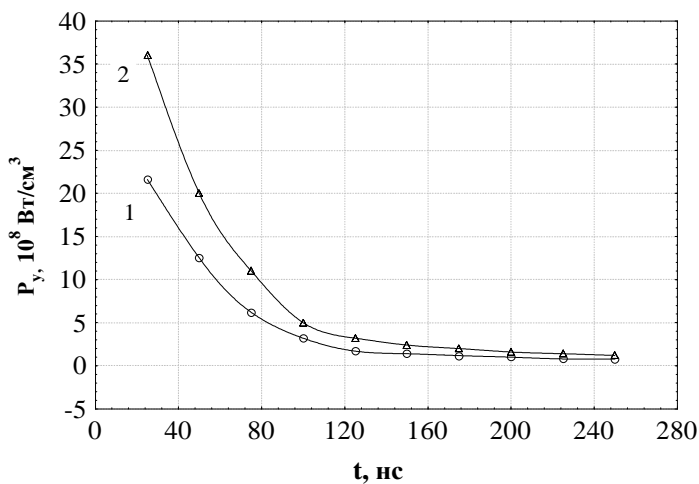


Рис.4. Удельная мощность, вводимая в разряд (E/p=10 В/см ∅То.)
1) N=0; 2) N=200 кА.

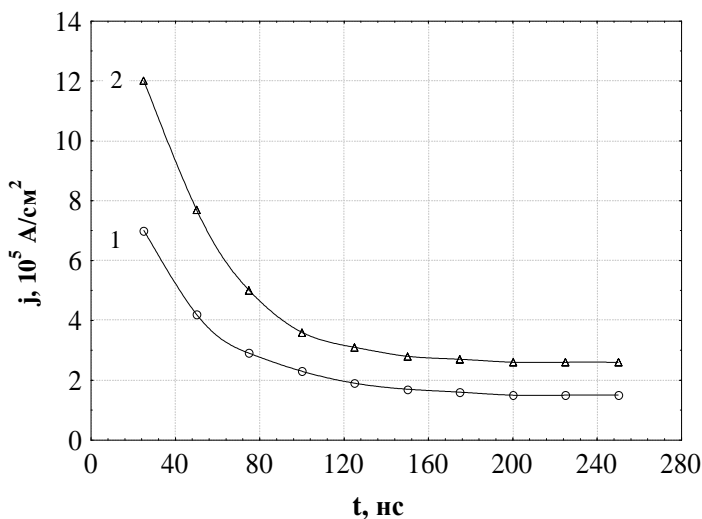


Рис.5. Плотность тока в разряде (E/p=10 В/см ∅То.)) =0,) =200 к.

где L – индуктивность разрядной цепи, C_1 – накопительная емкость. Характеристический импеданс при $L=1,1 \cdot 10^{-6}$ Гн и $C_1=1 \cdot 10^{-7}$ Ф составляет 3,5 Ом. Это значит, что, начиная с момента $R(t)=7$ Ом, разряд переходит в колебательный режим.

По сфазированным осциллограммам тока и напряжения определялась мощность, рассеиваемая в промежутке и энергия. С образованием искрового канала мощность в течении первых 60-80 нс резко возрастает до максимального значения и в дальнейшем меняется с периодом колебания тока и напряжения (рис. 3). Максимальное значение мощности соответствует фазе быстрого расширения канала. Следует отметить, что на стадии большого тока скорость энерговклада существенно зависит от параметров цепи. Продольное магнитное поле приводит к увеличению мощности, вводимой в разряд, начиная с некоторого момента. При этом также увеличивается и удельная мощность, вводимая в разряд (рис. 4).

Плотность тока в формирующемся искровом канале спустя 30-40 нс после начала резкого спада напряжения на промежутке (с момента образования катодного пятна) достигает значения $\approx 10^6$ А/см², а с быстрым расширением искрового канала (через 100 нс) уменьшается на

порядок (рис. 5, кривая 1). Таким образом, плотность тока в расширяющемся искровом канале достигает насыщения. Несмотря на быстрое расширение канала, плотность тока остается постоянной. Это свидетельствует о том, что проводимость плазмы ограничена. В магнитном поле плотность тока на всех стадиях больше (см. рис.5, кривая 2).

Проводимость плазмы канала в течении первых 100 нс возрастает до значения $80 \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$ и в дальнейшем практически не меняется (рис.6). В продольном магнитном поле проводимость увеличивается с ростом поля. Быстрый рост проводимости плазмы искрового канала в первые 100 нс свидетельствует о возрастании степени ионизации. Поскольку, в дальнейшем проводимость практически не меняется и очень слабо зависит от значения поля, то можно предположить, что к моменту установления максимальной проводимости степень ионизации плазмы близка к стопроцентной.

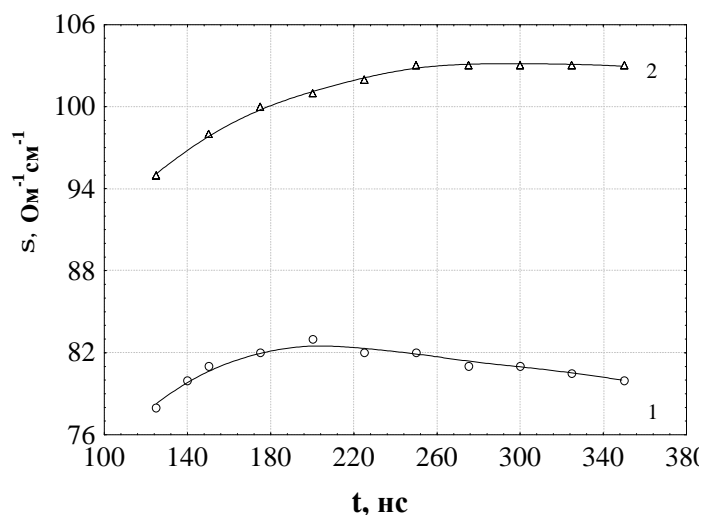


Рис. 6. Проводимость плазмы канала (E/p=10В/см ∅То.)
1) H=0; 2) H=140 кЭ.

эВ частота электрон-ионных соударений $n_{ei} \approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$, а время передачи

энергии $T_{ei}^* \cong \left[\frac{2m}{M_i} v_{ei} \right]^{-1} \approx 10^{-8} \text{ с}$. Таким образом, приведенные оценки

показывают, что в искровом канале ($n_e \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$) через $\approx 10^{-8} \text{ с}$ происходит выравнивание температур электронов и ионов, т.е. $T_e \approx T_i$. Плазма характеризуется единой температурой, определяемой выражением (5).

В §3.4. приведены результаты исследования влияния внешнего продольного магнитного поля на особенности формирования УВ при разряде в аргоне. Расширяющийся искровой канал в газах высокого давления является источником интенсивной цилиндрической УВ. Резкий рост проводимости в сформированном узком разрядном канале сопровождается резким ростом давления внутри плазменного столба, при этом расширяющийся плазменный поршень давит на нейтральный газ,

Температура электронов связана с проводимостью соотношением:

$$T_e \approx 1,4 \cdot 10^3 \cdot s^{\frac{2}{3}} \text{ К.} \quad (5)$$

Время передачи энергии от электронов к ионам равно от электронов к ионам равно

$$t_{ei}^* \approx (d \cdot n_{ei})^{-1}, \text{ где } n_{ei} = n_i \frac{pe^4 \ln \Lambda \bar{v}}{(kT_e)^2}$$

- частота упругого соударения электрона с ионами, $d = \frac{2m}{M_i}$

(M_i - масса иона). При

концентрациях заряженных частиц $\approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и температуре электронов $T_e \approx 3$

эВ частота электрон-ионных соударений $n_{ei} \approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$, а время передачи

формируя тем самым УВ большой интенсивности, способную переносить фронт ионизации в радиальном направлении.

В расширении канала искры можно выделить две стадии: 1) стадия расширения со сверхзвуковой скоростью, когда граница плазменного канала совпадает с УВ; 2) стадия расширения с дозвуковой скоростью, когда фронт УВ оторвался от границы канала разряда. Таким образом, на первой стадии, которая длится несколько сотен наносекунд, происходит формирование УВ. Его интенсивность определяется скоростью ввода энергии в разряд.

Наложение магнитного поля приводит к заметному уменьшению скорости расширения плазменного канала разряда в радиальном направлении до 50%. Исследование радиального развития в зависимости от внешнего продольного магнитного поля показывает, что длительность стадии сверхзвукового расширения определяется напряженностью магнитного поля и скоростью энерговода. В аргоне уменьшение этой стадии составляет при $H=200$ кЭ около 200 нс. Мгновенность выделения энергии (60% всей запасенной энергии выделяется за 200-250 нс, при общей длительности разряда ~ 1 мкс) определяет взрывной характер процесса расширения искрового канала.

Внешнее магнитное поле не сказывается на значении скорости УВ на стадии отрыва волны от токоведущего канала, для аргона это значение скорости приблизительно равно 600-700 м/с, для воздуха 800-900 м/с. На начальном этапе развития УВ вызывает такое возрастание температуры, что она способствует значительной ионизации газа, т.е. УВ на этой стадии переносит границу канала разряда.

Показано, что процесс расширения искрового канала носит изотермический характер. На рис.7 показаны значения радиуса канала при различных значениях напряженности магнитного поля. Для сравнения приведены рассчитанные в адиабатическом и изотермическом приближении значения. Скорость

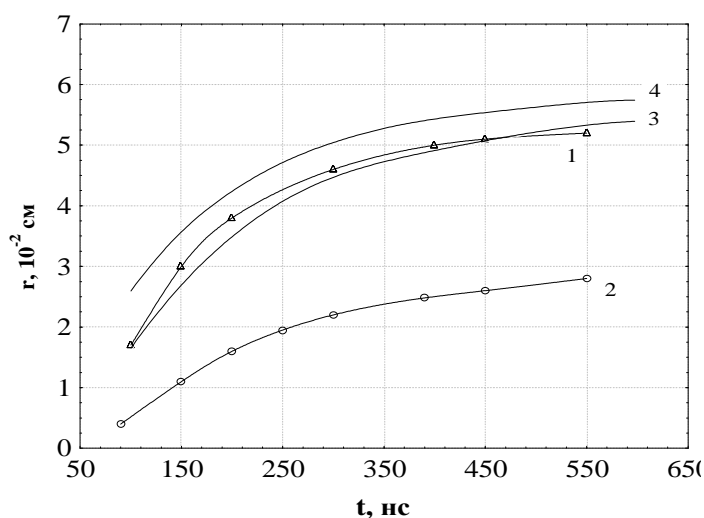


Рис.7. Радиус канала искры
1) $H=0$; 2) $H=140$ кЭ;

3 – расчет в изотермическом приближении;
4 – расчет в адиабатическом приближении.

рассчитанная в изотермическом приближении, на более

$$u(t) = c \frac{\left(\frac{g+1}{2g}\right)^{1/2} r_m}{\left[2c\left(\frac{g+1}{2g}\right)^{1/2} r_m \cdot t + r_0^2\right]^{1/2}},$$

поздней стадии лучше согласуется с экспериментальным значением, чем скорость, рассчитанная в адиабатическом приближении.

В магнитном поле температура плазмы увеличивается, а скорость изменения температуры уменьшается. Увеличивается также концентрация ионов плазмы и толщина слоя, в котором происходит скачок газодинамических параметров.

Четвертая глава диссертации посвящена результатам исследования распространения и взаимодействия УВ со слабоионизованной фотоплазмой в воздухе, описана методика определения эффективности фотоионизации газа и методика определения времяпролетного спектра ионов в многокомпонентных газовых смесях.

В §4.1 показано, что в образовании носителей заряда при фотоионизации излучением свободной искры основную роль играют ступенчатые процессы (см. рис. 8).

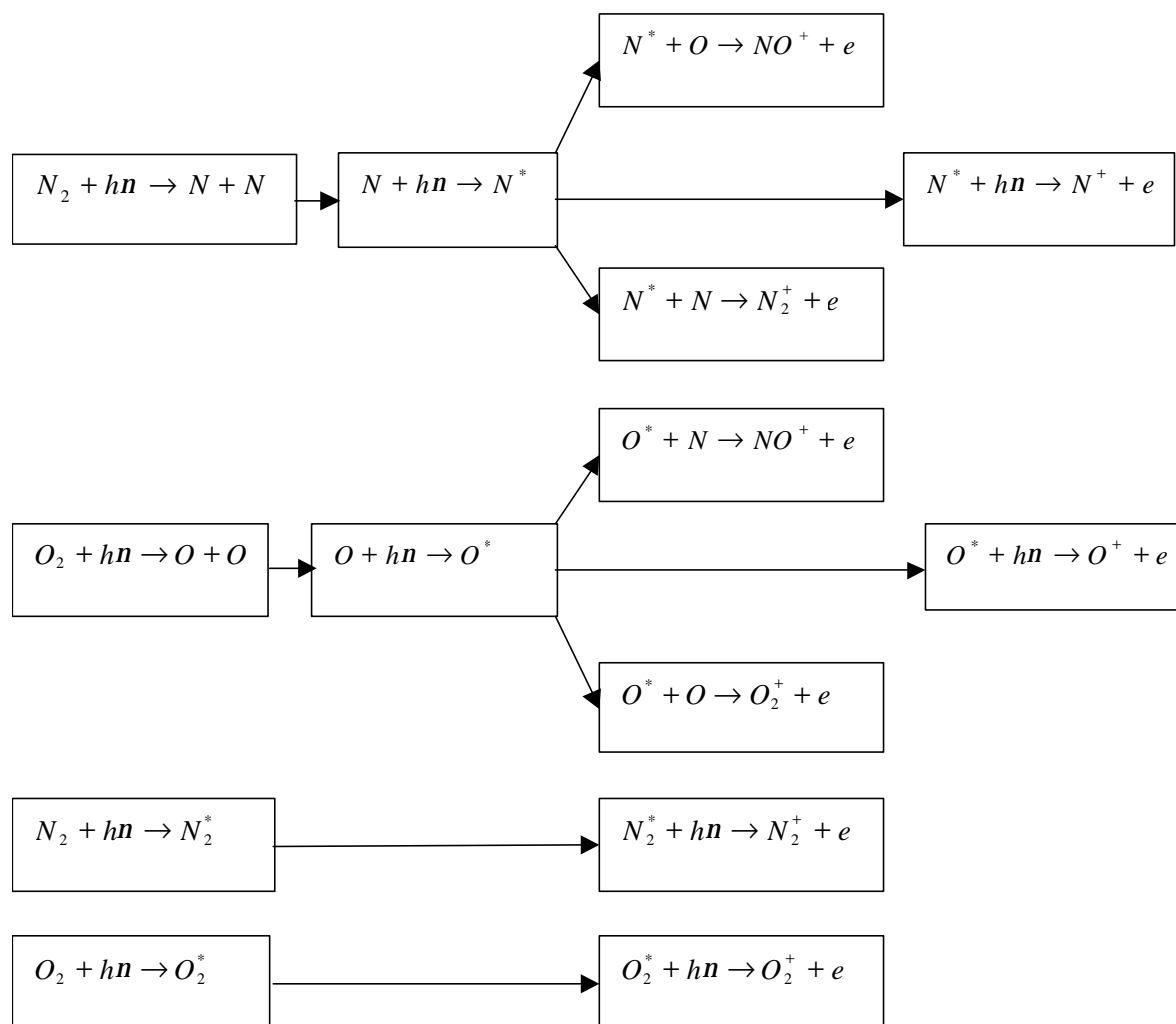
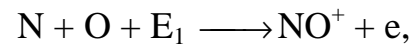
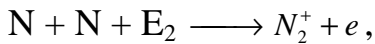


Рис. 8. Процессы, приводящие к образованию плазмы при облучении воздуха ультрафиолетовым излучением

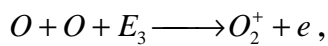
В частности, в воздухе основным каналом ионизации является ассоциативная ионизация. Большие энергии диссоциации некоторых молекулярных ионов NO^+ (10,9 эВ), O_2^+ (6,7 эВ), N_2^+ (8,7 эВ) обуславливает высокую эффективность ассоциативной ионизации



$$E_1 = 2,8 \text{ эВ}$$



$$E_2 = 5,8 \text{ эВ}$$



$$E_3 = 6,91 \text{ эВ}.$$

Рассмотрены кинетические процессы, происходящие в фотоплазме в воздухе и показано, что преобладающими ионами в воздухе являются гидратированные кластеры: $H^+ \cdot (H_2O)_n$, $NO^+ \cdot (H_2O)_n$, $O_2^+ \cdot (H_2O)_n$, $O_2^- \cdot (H_2O)_n$, $OH^- \cdot (H_2O)_n$, $NO_2^- \cdot (H_2O)_n$, $CO_3^- \cdot (H_2O)_n$ и скорость деионизации воздуха определяется рекомбинацией этих ионов.

В §4.2 описана разработанная методика определения напряженности электрического поля и потенциала двойного электрического слоя на фронте УВ. Решетка искровых разрядников, расположенных в одной плоскости и срабатываемых одновременно, формирует плоскую УВ, которая распространяется в фотоплазме. На фронте волны вследствие поляризации плазмы образуется двойной электрический слой, распространяющийся со скоростью волны. Импульс поля двойного слоя определялся системой из двух мелкоячеистых сеток, расположенных параллельно друг другу на расстоянии 0,5 мм.

При прохождении фронта волны через сетки двойной слой разряда вызывает появление меняющегося потенциала на измерительной сетке и появление соответствующего тока через резистор R , т.е. $C_0 \frac{dj(t)}{dt} = I(t)$, здесь j - потенциал сетки относительно земли, C_0 - емкость системы сеток. С учетом скорости распространения ударной волны V получим $\frac{dj(t)}{dt} = -V \frac{dj}{dx} = VE$ ($E = -\frac{dj}{dx}$ - напряженность электрического поля двойного слоя). $C_0 VE \cdot R = I \cdot R = U$, U - измеряемый осциллографом сигнал.

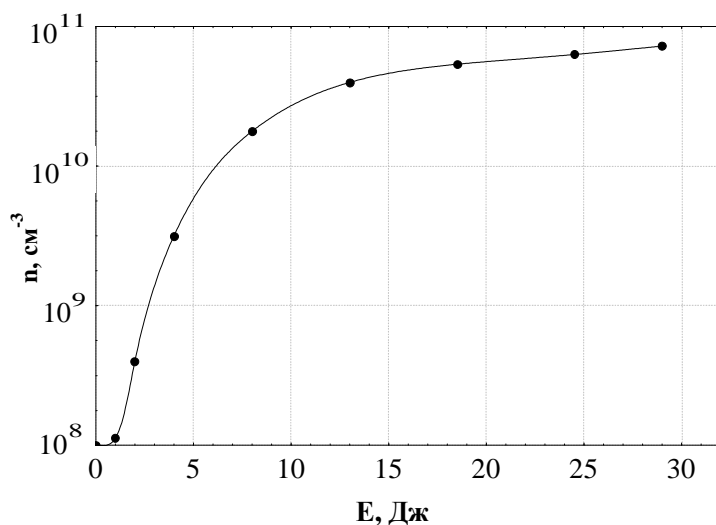


Рис.9. Зависимость плотности заряженных частиц от энерговклада в источник УФ излучения

Таким образом, по измеренному сигналу $U(t)$ можно вычислить напряженность поля двойного слоя на фронте ударной волны. Использование интегрирующей цепочки позволяет определить и распределение потенциала.

Масштаб разделения зарядов в двойном слое $\approx 1,0$ мм, значение напряженности поля $\approx 10^2$ В/см, что соответствует избыточной концентрации электронов $\approx 10^8$ см⁻³.

Зависимость концентрации заряженных частиц от энерговклада в источник излучения на расстоянии 3 см от решетки искровых разрядов в воздухе показана на рис.9. Эта зависимость имеет сложный характер. В начале концентрация резко возрастает до значения $\approx 10^{10} \text{см}^{-3}$, далее с ростом энерговклада рост концентрации замедляется и кривая выходит на насыщение. Таким образом, при энерговкладах $E > 30$ Дж концентрация ионов на не очень больших расстояниях ($x < 6$ см) от решетки искровых разрядов будет величиной постоянной $\approx 10^{11} \text{см}^{-3}$.

Расположение системы сеток на различных расстояниях и регистрация времени прохождения УВ дает значение скорости УВ. Скорость УВ при различных энерговкладах показана на рис.10.

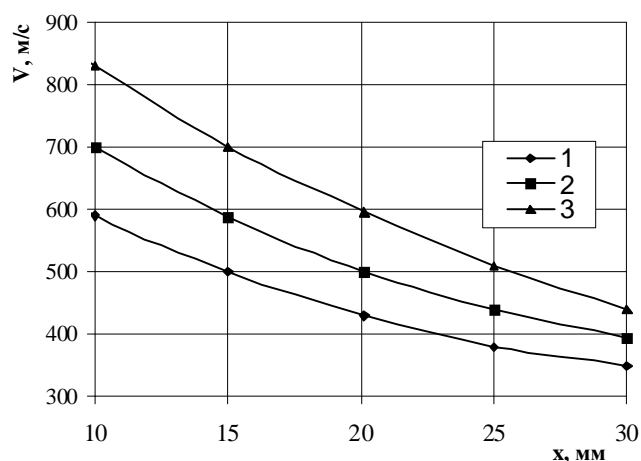
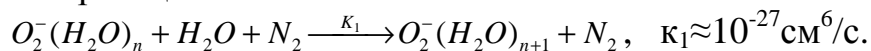


Рис. 10. Значение скорости ударной волны при различных энерговкладах (1 – 12,25 Дж, 2 – 20,25 Дж, 3 – 51,25 Дж).

В §4.3 показано, что прохождение УВ через слабоионизованную плазму сопровождается поглощением энергии на фронте волны, что в свою очередь влияет на скорость УВ. Для воздуха при не очень больших скоростях УВ $\gamma = 1,25$, и при $M = 2,5$, $T_1 = 2T_0$. Увеличение температуры газа на фронте волны приведет к разрыву кластерных связей и распаду

отрицательных ионов.

Так, например, энергия прилипания электрона к иону O_2^- составляет всего 0,44 эВ. К одним из основных отрицательных ионов, регистрируемых в фотоплазме в воздухе относятся ионы типа $O_2^-(H_2O)_n$. Образование этих ионов объясняется большим значением константы трехчастичной реакции:



Дальнейший процесс кластеризации этого типа ионов ограничивает обратные процессы: $O_2^-(H_2O)_{n+1} + N_2 \xrightarrow{k_2} O_2^-(H_2O)_n + H_2O + N_2$, где константа k_2 зависит от температуры газа. С уменьшением числа молекул в кластерном ионе энергия отрыва электрона от отрицательного иона уменьшается.

Таким образом, нагрев газа на фронте УВ приводит к разрушению сложных ионов и образованию свободных электронов. Этот процесс идет со скоростью газодинамических столкновений.

По известной скорости УВ на различных расстояниях от решетки искровых разрядов определили величину энергии, выделяемой на фронте волны

$$\Delta e = \frac{2c^2}{g(g+1)^2} \left(\frac{gM^4 - (g-1)M^2 - 2}{M^2} \right). \quad (6)$$

При $M > 2$, $\Delta e \approx \frac{2}{(g+1)^2} u^2 = 0,4u^2$.

В наиболее общем виде энергия волны $E = krV^2$, а величина энергии, выделяемой на фронте также пропорциональна квадрату скорости. Следовательно, энергия волны должна уменьшаться по экспоненциальному закону, что и показывает эксперимент.

Основные результаты и выводы

1) Исследованы физические закономерности переноса фронта УВ по слабоионизованной плазме, развивающейся из области расширяющегося катодного пятна при взрывных процессах на катоде. Показано, что с термодинамической точки зрения процесс расширения катодного пятна носит адиабатический характер. За время адиабатического охлаждения плазмы катодного пятна $\sim 10^{-8}$ с, при начальном размере взрывоэмиссионного центра $\sim 10^{-6}$ м, фронт УВ переносится на расстояние $\sim 10^{-3}$ м.

2) Исследовано влияние параметров разрядного контура и внешнего продольного магнитного поля с напряженностью до 250 кЭ на эффективность энерговыклада в разряд, интенсивность и структуру фронта формирующейся при расширении искрового канала УВ. Показано, что вследствие роста ширины релаксационного слоя на фронте УВ и замедления скорости релаксационных процессов в присутствии магнитного поля распределение энергетической яркости свечения в радиальном направлении становится более однородным. Гашение интенсивности УВ со временем до значений, при котором кинетическая энергия газодинамического движения частиц плазмы становится меньше энергии ионизации частиц, в магнитном поле ускоряется примерно на 100 нс.

3) Исследовано взаимодействие УВ со слабоионизованной фотоплазмой в воздухе. Установлено, что при распространении УВ по слабоионизованной ион-ионной плазме на фронте волны возникает двойной электрический слой, что объясняется разрушением отрицательных ионов в результате нагрева плазмы вследствие ее взаимодействия с УВ.

4) Разработана методика определения напряженности поля и потенциала двойного электрического слоя на фронте УВ с помощью плоского конденсатора, образованного двумя сетчатыми электродами.

5) Изучена роль диссипативных процессов в гашении интенсивности УВ. Экспериментально показано, что скорость диссипации энергии волны пропорциональна интенсивности УВ.

Основные работы по теме диссертации

1. *Ахмедова Х.Г., Хачалов М.Б.* Роль диссипативных процессов в гашении интенсивности ударной волны в слабоионизированной плазме. //В сб.: Труды региональной конференции по компьютерным технологиям в экономике, в науке и образовании. Махачкала. 2005. С.36-37.
2. *Ахмедова Х.Г., Хачалов М.Б.* Взаимодействие слабоионизированной плазмы в воздухе с плоской ударной волной. //В сб.: тез. докл. XXXIII Международной конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2006. С.204.
3. *Ахмедова Х.Г., Хачалов М.Б., Рагимханов Г.Б.* Влияние магнитного поля на поперечный перенос фронта ионизации в импульсном разряде высокого давления. //В сб.: Материалы IV Всероссийской конференции по физической электронике. Махачкала, 2006. С.87-89.
4. *Ахмедова Х.Г., Хачалов М.Б.* Взаимодействие слабоионизированной плазмы в воздухе с плоской ударной волной. //Вестник ДГУ. Махачкала, 2006. В.1. С.34-37.
5. *Хачалов М.Б., Ахмедова Х.Г.* Особенности формирования ударных волн при разряде в аргоне во внешнем магнитном поле. //ТВТ. 2007. Т.45. №7. С. 957-960.
6. *Хачалов М.Б., Ахмедова Х.Г.* Роль взрывных процессов в формировании разряда в аргоне. //ТВТ. 2007. Т.45. №4. С. 632-634.
7. *Ахмедова Х.Г., Хачалов М.Б.* Потенциал двойного слоя на фронте ударной волны. //В сб.: Труды Международной конференции по фазовым переходам и нелинейным явлениям в конденсированных средах. Махачкала, 2007. С. 601-604.
8. *Ахмедова Х.Г., Хачалов М.Б.* Расширение искрового канала в аргоне во внешнем магнитном поле. //Вестник ДГУ. Махачкала, 2007. В.4. С.16-21.
9. *Ахмедова Х.Г., Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А.* Характеристики фотоплазмы в воздухе. // В сб.: Материалы V Всероссийской конференции по физической электронике. Махачкала, 2008. С. 109-112.
10. *Ахмедова Х.Г., Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А.* Формирование и распространение фронта ударной волны в слабоионизированной фотоплазме.// В сб.: Материалы V Всероссийской конференции по физической электронике. Махачкала, 2008. С. 105-108.
11. *Ахмедова Х.Г., Омарова Н.О., Омаров О.А., Хачалов М.Б.* Диссипация энергии ударной волны в слабоионизированной плазме. //В сб.: тез. докл. XXXVI Международной конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2009. <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXVI/L.html>

Подписано к печати «11» апреля 2009 г. Печать офсетная.
Формат бумаги 60x84 1/16. Заказ 514. Тираж 100 экз.

Издательско-полиграфический центр ДГУ
Махачкала, ул. М. Ярагского, 59-а.