

На правах рукописи

ЕСАКОВ Игорь Иванович

**Разряд в газах среднего и высокого давления в
квазиоптическом пучке электромагнитных волн
СВЧ-диапазона**

Специальность 01.04.08 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук**

Москва - 2009

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии
«Московский радиотехнический институт РАН»

Научный консультант:

Ходатаев Кирилл Викторович - доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты:

Лебедев - доктор физико-математических наук,
Юрий Анатольевич профессор

Скворцов - доктор технических наук
Владимир Владимирович

Никулин - доктор физико-математических наук,
Михаил Григорьевич профессор

Ведущая организация: Объединенный институт высоких температур РАН

Защита состоится «17» декабря 2009 г. в _____ часов

на заседании диссертационного совета Д 501.001.66 при Московском
Государственном Университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991,
г.Москва, Ленинские горы, Московский Государственный университет,
Физический факультет, аудитория

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического факультета
МГУ им. М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан _____ 2009

Ученый секретарь
диссертационного совета

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Предмет исследований. В 60-е годы двадцатого века произошел существенный прогресс в технике генерирования мощных электромагнитных (ЭМ) колебаний в гигагерцовом диапазоне частот f . Это позволило начать физические исследования газовых электрических разрядов в СВЧ-диапазоне длин волн λ ЭМ-излучения, зажигаемых в «свободном» пространстве при газовых давлениях p , соответствующих восходящей ветви зависимости поля пробоя от давления.

Условная схема реализации таких разрядов показана на **Рис.1**.

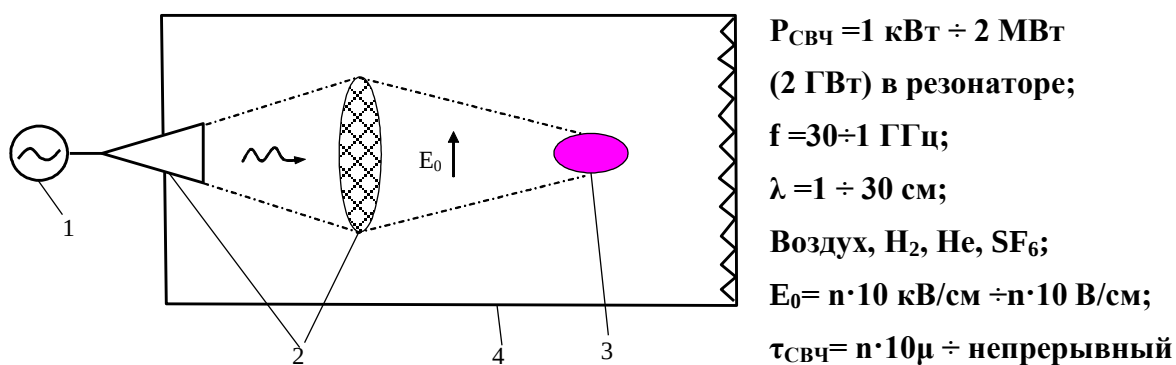


Рис.1. Условная схема реализации СВЧ - разряда в квазиоптическом ЭМ-пучке

На схеме цифрой **1** обозначен СВЧ-генератор. Цифрой **2** условно обозначены элементы, которые в опытах формируют квазиоптический ЭМ-пучок с заданной пространственной конфигурацией.

Термин «квазиоптический пучок» подразумевает, что в направлениях, поперечных вектору распространения ЭМ-поля $\vec{P}$, он имеет характерный размер в несколько единиц $\lambda/2$.

В области максимального поля этого пучка, существенно (в длинах волн λ) удаленной как от элементов, формирующих ЭМ-пучок, так и от окружающих предметов, и возникает СВЧ-разряд **3**. В опытах, как правило, область максимального поля пучка находится в герметичной электродинамически «безэховой» камере **4**, давление газа p в которой можно изменять.

Результаты исследований, выполненных в ходе настоящей работы, могут быть использованы в диапазоне частоты f ЭМ-колебаний примерно от 30 GHz до 1 GHz, что при распространении ЭМ-волны в свободном пространстве приблизительно соответствует диапазону λ от 1 до 30 см. Ключевые физические механизмы, определяющие развитие и параметры разрядов, изученные в данном диапазоне, вероятно, работают и при длинах волн несколько более 30 см. Но при таких λ вступают в силу габаритные ограничения на создание экспериментальных установок. Исследования разрядов технически трудноосуществимы и в рамках данной работы не проводились. Для разрядов возбуждаемых λ , существенно короче 1 см, определяющими становятся другие физические механизмы, и полученные результаты не могут быть полноценно использованы.

В ходе диссертационной работы разряд зажигался, в основном, в воздухе атмосферного состава при p от сотых долей до нескольких атмосфер. При этом в реализующейся разрядной плазме частота столкновений плазменных электронов с молекулами ν_c примерно равна или существенно больше круговой частоты колебаний поля ω , т.е. плазма является столкновительной. В этом смысле говорят о СВЧ-разряде при средних или высоких давлениях газа. Ряд экспериментов проводился и с другими газами, такими как гелий, водород и элегаз. В указанных диапазонах f и p свойства этих разрядов качественно сохранялись, хотя количественные отличия, естественно, фиксировались.

В опытах мощность ЭМ-пучков $P_{СВЧ}$ была в диапазоне от единиц мегаватт до единиц киловатт. При высоком уровне $P_{СВЧ}$ реализовывался только моноимпульсный режим генерации при длительности импульса $\tau_{СВЧ}$ от единиц до десятков микросекунд. (Здесь термин «моноимпульсный» подразумевает, что длительность паузы между импульсами позволяла не учитывать изменений свойств газа, вызванных предыдущим разрядом.) При малых $P_{СВЧ}$ разряд в опытах создавался и в квазинепрерывном режиме при $\tau_{СВЧ}$ в десятые доли секунды.

Как уже указывалось, поперечный размер ЭМ-пучка в разрядной области, как правило, был равен нескольким величинам $\lambda/2$. В результате при приведенных значениях $P_{\text{СВЧ}}$ в области разряда обеспечивалась амплитуда электрической составляющей исходного ЭМ-поля E_0 от десятков V/cm до десятков??? kV/cm. При больших значениях E_0 в газах даже сравнительно высокого p мог осуществляться самостоятельный безэлектродный электрический пробой газа. В дальнейшем минимальный уровень пробойного поля для данного газа будем называть критическим полем пробоя E_{cr} . При малых же E_0 или больших p , когда $E_0 < E_{\text{cr}}(p)$, в опытах СВЧ-пробой газа должен был быть инициирован. Для этого в рамках выполненных исследований была разработана система инициации газового пробоя с помощью линейных и кольцевых ЭМ - вибраторов.

Цель работы. На начальном этапе настоящих работ данный тип электрического газового разряда был практически неизученным объектом. Особенно это касалось высоких газовых давлений p . Это обстоятельство и определило приоритетные цели исследований. Прежде всего – реализация СВЧ - разряда в квазиоптическом ЭМ - пучке в различных исходных условиях; экспериментальное определение возможной трансформации вида разряда в диапазонах E_0 - p и, основное, оценка энергетической эффективности взаимодействия разрядной плазмы с возбуждающим её ЭМ - полем. Последнее в значительной мере определяет практическую ценность СВЧ-разряда, а, следовательно, и необходимость подробного исследования его свойств.

В то же время конкретные цели исследований определялись уже в ходе получения фактических данных. Эти цели были, в основном, связаны с выявлением определяющих физических механизмов, ответственных за формирование структуры разряда и его свойств. Так, в результате полученных опытных данных и их анализа было выявлено влияние на отдельные области разряда на разных временных этапах их развития ионизационно-полевых процессов, ионизационно-полевых и ионизационно-перегревных

неустойчивостей разрядной плазмы, «стримерных» механизмов роста разрядных каналов, электродинамических резонансов на отдельных плазменных участках, перетяжной и изгибной неустойчивостей плазменных токовых каналов и т.п.

Конечной целью выполненных исследований являлось получение данных, необходимых для анализа возможности реализации данного типа СВЧ-разряда с нужными свойствами в зависимости от мощности СВЧ-пучка $P_{\text{СВЧ}}$ или уровня исходного поля E_0 в разрядной области при конкретной длине волны излучения λ , длительности ЭМ-излучения $\tau_{\text{СВЧ}}$, давления p и состава газа. В значительной мере эта цель была достигнута, хотя, конечно, и перед опытно-конструкторской разработкой конкретных устройств или изучении возможности применения данного типа разряда в практической схеме могут потребоваться экспериментальные исследования в реальной геометрии ЭМ-пучка и при заданных элементах конструкции.

Научная новизна. В данной диссертационной работе впервые систематически изложены результаты экспериментальных исследований СВЧ-разряда в воздухе и ряде других газов в квазиоптическом пучке с бегущими и стоячими ЭМ-волнами.

Экспериментально показано, что рассматриваемый тип разряда реализуется в существенно отличающихся видах в различных исходных диапазонах E_0 - p . С ростом p разряд из диффузного вида трансформируется в стримерный вид. Впервые отмечено, что положение границы перехода из диффузного вида в стримерный по давлению зависит от длины волны ЭМ излучения λ и сорта газа. С уменьшением λ она сдвигается в сторону больших p . Впервые показано, что если в диффузном виде СВЧ - разряд энергетически слабо взаимодействует с возбуждающим его ЭМ-полем, то СВЧ-разряд в стримерном виде, напротив, взаимодействует с возбуждающим его полем с высокой эффективностью. Это свойство СВЧ-разрядов, обнаруженное при исследовании разрядов на высоких p , открывает широкие возможности для

поиска путей его практического применения и стимулирует исследования его свойств. В опытах выяснилось, что стримерный вид разряда может реализовываться и в полях, меньших и существенно меньших минимального, критического поля пробоя E_{cr} , необходимого для безэлектродного пробоя газа при конкретном значении p . Впервые было показано, что глубоко подкритический СВЧ-разряд также взаимодействует с возбуждающим его ЭМ-полем с высокой эффективностью.

В ходе исследований были выявлены физические механизмы, ответственные за трансформацию диффузного вида разряда в стримерный вид, и свойства последнего стимулировали исследования различного рода неустойчивостей в разрядной плазме СВЧ-диапазона ЭМ-колебаний. Так в работе показано, что ионизационно-перегревные процессы ответственны за формирование плазменных каналов в исходном диффузном фоне СВЧ-разряда. Стримерный механизм ответственен за рост и формирование этих каналов. Взаимное электродинамическое влияние задает траекторию прорастания каналов в пространстве. Электродинамические резонансы на их отдельных участках определяют эффективность взаимодействия разряда с ЭМ-полем. Впервые экспериментально показано, что резонансный рост тока в каналах определяет их перетяжечную и изгибающую неустойчивость. Все эти механизмы, хорошо изученные, например, в постоянных полях, являются «новыми» в СВЧ-диапазоне ЭМ-колебаний.

На защиту выносятся следующие положения

1. Результаты исследования пространственной структуры, динамики развития и основных свойств СВЧ-разряда стримерного вида в квазиоптическом ЭМ-пучке.
2. Классификация видов разряда СВЧ-диапазона при среднем и высоком давлении воздуха и области их существования в координатах: уровень поля – давление воздуха.

3. Физические механизмы, определяющие формирование пространственной структуры и параметры СВЧ-разрядов в квазиоптическом пучке бегущей и стоячей ЭМ-волны:
- ведущая роль ионизационно-перегревной неустойчивости СВЧ-плазмы в зарождении плазменных каналов;
 - стримерный механизм развития структуры плазменных каналов СВЧ-разряда в пространстве;
 - электродинамический резонанс плазменных каналов СВЧ-разряда при взаимодействии с ЭМ-излучением;
 - магнитное сжатие плазменных каналов СВЧ-разряда.
4. Свойство высокой поглощающей способности СВЧ- стримерных разрядов, обусловленное электродинамическим резонансным взаимодействием структуры разряда с СВЧ-излучением.
5. Обнаруженное впервые физическое явление: пинч-эффект магнитного сжатия СВЧ-тока и СВЧ крупномасштабные МГД неустойчивости в безэлектродном уединенном резонансном короткоимпульсном стримерном разряде сверхвысокого давления.
6. Оригинальные методы и устройства для измерения параметров СВЧ-излучения и газа:
- метод локального измерения величины электрической составляющей ЭМ-поля в различных точках линейно поляризованного квазиоптического СВЧ-пучка с помощью инициации пробоя воздуха проводящим шариком;
 - метод акустического зондирования области свободно локализованного СВЧ-разряда для измерения средней газовой температуры при среднем и высоком давлении.
7. Способ инициации газового пробоя в подкритическом и глубоко подкритическом поле СВЧ-волны пассивным прямолинейным (или кольцевым) ЭМ- вибратором.

8. Ряд оригинальных схем разработанных и созданных при ведущем участии соискателя экспериментальных установок, позволяющих проведение комплексных исследований СВЧ-разрядов в широком спектре условий в сверхзвуковом и дозвуковом газовых потоках.

Личный вклад автора.

К личному вкладу соискателя следует отнести следующее.

При непосредственном участии автора диссертации были проведены эксперименты, связанные с разработкой локального метода измерения поля E_0 в квазиоптических ЭМ-пучках. Анализ экспериментальных данных и их сопоставление с развитой К.В.Ходатаевым теорией позволил определить характер плазменной диффузии, который необходимо учитывать при использовании данного метода. В экспериментах наглядно выявилась роль «начальных» электронов на процесс развития электрического разряда.

Соискатель является соавтором авторских свидетельств, основанных на результатах экспериментов, на способ инициации СВЧ-пробоя в подкритическом и глубоко подкритическом поле ЭМ-волны и совместного с ЦИАМ авторского свидетельства на способ и устройство для инициации СВЧ-разряда и генерации высокотемпературной струи плазмы.

При непосредственном участии автора диссертации в экспериментах были выявлены универсальные виды СВЧ-разряда в квазиоптическом ЭМ-пучке. В этих экспериментах был впервые в воздухе реализован стримерный вид пространственно-развитого СВЧ-разряда в надкритическом поле. Практически одновременно с исследователями с ИОФ РАН автором был реализован инициированный пространственно-развитый стримерный СВЧ-разряд в подкритическом поле. В экспериментах с участием соискателя был реализован стримерный глубоко подкритический привязанный к инициатору СВЧ-разряд в воздухе. В опытах было показано, что выявленные виды СВЧ-

разрядов являются универсальными и для других газов, с некоторыми их особенностями.

Соискателем был разработан и использован в экспериментах способ измерения средней по объему газовой температуры T свободно локализованного СВЧ-разряда среднего давления p путем зондирования его слабой ударной волной (УВ).

При непосредственном участии автора диссертации были экспериментально определены границы $E_0 - p$ областей реализации различных видов СВЧ-разряда в воздухе в квазиоптических ЭМ-пучках при $\lambda = 8.9$ см. Под руководством соискателя в опытах эти границы были определены и для других длин волн ЭМ-излучения, и выявлены характерные количественные тенденции.

Изучение динамики развития стримерного вида инициированного подкритического СВЧ-разряда с пространственно-развитой структурой позволило определить роль СВЧ стримерного механизма в ее формировании. В процессе этих исследований было также выявлено влияние электродинамических факторов и связанных с ними резонансных явлений на конкретную геометрию подкритического СВЧ-разряда и способность этого вида разряда и глубоко подкритического СВЧ-разряда энергетически эффективно взаимодействовать с возбуждающим разряд ЭМ-полем.

В процессе выполняемых при непосредственном участии автора диссертации или под его непосредственным руководством опытов и их анализа была убедительно продемонстрирована роль ионизационно-перегревной неустойчивости СВЧ-плазмы СВЧ-разряда в трансформации диффузного вида разряда в стримерный с ростом давления газа.

Выполненные при непосредственном участии соискателя эксперименты по исследованию безэлектродного СВЧ-разряда в воздухе в открытом резонаторе подтвердили выполненные ранее сотрудниками НИИ

Радиоприборостроения и ИОФ РАН эксперименты, показывающие характер распределения поглощенной резонансным разрядным каналом энергии ЭМ-поля по длине этого канала. При участии соискателя была выявлена роль перетяжечной неустойчивости токового плазменного СВЧ-канала в воздухе на это распределение. Эксперименты показали роль этой неустойчивости и в плазменном резонансном канале СВЧ-разряда в водороде. При участии соискателя было впервые обнаружено явление изгибной неустойчивости резонансного плазменного токового СВЧ-канала в воздухе и в водороде.

При непосредственном участии соискателя была восстановлена и модернизирована установка ДОР-2 с $\lambda = 8.9$ см. При этом соискателем были проведены на ней ряд оригинальных исследований СВЧ-разряда в режиме «стоячей» волны в квазиоптическом двухзеркальном резонаторе. Кроме того, эта установка была модернизирована для проведения исследований в режиме «бегущей» квазиоптической ЭМ-волны. Под руководством и при непосредственном участии соискателя были созданы новые экспериментальные установки с $\lambda = 2.5$ см и $\lambda \approx 12.5$ см. При участии соискателя уникальная установка с $\lambda = 4.3$ см, работающая в режиме бегущей волны, была модернизирована для проведения опытов с СВЧ-разрядами в режиме стоячей волны с высокочастотным открытым двухзеркальным резонатором.

Указанные достижения были получены лично автором диссертации, при его личном участии и под его руководством как начальника сектора. Соискатель являлся и является руководителем Проектов МНТЦ (ISTC) № 1840, № 2429, №3572 и Проектов АФГИР (CRDF) по программам GAP и FSTM: UKE2-1508A-KV-05, UKE2-1518A-KV-07 и RUP2-005071-MO-07.

Апробация работы. Результаты исследований, положенных в основу настоящей диссертации, докладывались на различных всероссийских и международных конференциях. В их числе: III Всесоюзная конференция “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики” (1989, г.Новосибирск); 2-й международный симпозиум по теоретической и

прикладной плазмохимии (май, 1995 г., Иваново); 4-я Международная конференция «Strong microwaves in plasma» (август 1999 г., Нижний Новгород); Международное совещание по магнитоплазменной аэродинамике в аэрокосмических приложениях (Москва, ИВТАН, 2000 г., 2003 г.); III - VI Международный симпозиум «Термохимические и плазменные процессы в аэродинамике» (Санкт-Петербург, 2002 г., 2004 г., 2006 г., 2008 г.); 32nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference and 4th Weakly Ionised Gases Workshop (11-14 June 2001, Anaheim, CA), 41st - 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting (January 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008) Reno, NV; 2nd International Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPAC) (19-21 September 2006, 2007 и 2008 г. Quality Inn Governor Falls Church, Virginia, U.S.A.); Восьмая международная школа-семинар «Модели и методы аэродинамики», Евпатория, 4-13 июня 2008, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting (January 2009, Orlando, Florida). Сборники трудов этих конференций опубликованы.

Практическая ценность работы. Практическая ценность выполненных исследований определяется, прежде всего, выявленной энергетической эффективностью взаимодействия с ЭМ-полем СВЧ-разряда в квазиоптическом ЭМ-пучке в виде стримерного подкритического и глубоко подкритического разряда. В настоящее время изучается ряд конкретных предложений по использованию этих видов разряда в практических устройствах. В ходе этой проработки на существующих установках выполнен ряд экспериментов, показывающих на количественном уровне реальность этих предложений.

Данный тип разряда может быть использован в плазменной газодинамике для управления характеристиками как дозвуковых (ДЗ), сверхзвуковых (СЗ), так и гиперзвуковых (ГЗ) летательных аппаратов. Выполненные эксперименты показали влияние этих разрядов на лобовое сопротивление модели и на боковые управляющие силы. В этой связи с участием автора диссертации в настоящее время ведутся исследования различного вида стримерных СВЧ-

разрядов на поверхности диэлектрика. При этом, естественно, используется тот научный задел, который ранее получен автором.

Используемые в исследованиях для оценки температуры плазменных каналов СВЧ-разряда опыты по его зажиганию в модельной горючей смеси показали возможность поджига и стабилизации горения этой смеси в режиме ее высокоскоростного течения по разрядной области. При этом поджигается и весьма бедная смесь. Эти наработки позволяют рассматривать возможность применения таких разрядов в прямоточных реактивных двигателях и в наземных газотурбинных установках.

На основе зарегистрированного факта поджига бедной горючей смеси подкритическим стримерным разрядом сформулировано предложение для использования этого разряда в поршневых двигателях внутреннего сгорания нового поколения.

В возглавляемом соискателем коллективе были проведены исследования по возможности использования этого типа разряда в плазмотронах и, например, в плазмотроне с возвратно-вихревым течением воздуха в нем.

В этом же коллективе проводятся исследования по использованию глубоко подкритического стримерного СВЧ-разряда в установках по газификации низкокалорийных углей и бытовых отходов.

Публикации. Основные результаты исследований соискателя опубликованы в 39 статьях в различных отечественных и зарубежных журналах («Физика плазмы», «Известия СО АН СССР, Сер. технических наук», «Радиотехника и электроника», «Прикладная физика», «ЖТФ», «Письма в «ЖТФ», «Applied physics letters», «IEEE Transactions on Plasma Sciences») и итоговых отчетах по Проектам МНТЦ № 1840, № 2429, №2820.

Объем и структура работы. Основное содержание диссертации изложено на 356 страницах. Работа состоит из введения, 11 глав и заключения, Список литературы диссертации насчитывает 187 ссылок. Он построен по

главам, с неизбежным пересечением некоторой части ссылок. Работа содержит 5 таблиц и 194 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** сформулирован предмет исследований, цель диссертации, ее научная новизна, перечислены положения, выносимые на защиту, отмечен личный вклад автора кратко излагается содержание диссертации и показана практическая ценность работы.

В **Главе 1** описываются используемые в опытах экспериментальные установки, их основные характеристики и средства диагностики. Они отличаются по длинам волн используемого ЭМ-излучения: $\lambda = 8.9$ см, $\lambda = 2.5$ см, $\lambda = 12.3$ см и $\lambda = 4.3$ см. При этом установка с $\lambda = 8.9$ см использована в двух режимах: режим «бегущей» волны ЭМ-пучка и режим стоячей волны с высокодобротным квазиоптическим двухзеркальным резонатором. Установки с $\lambda = 2.5$ см и $\lambda = 12.3$ см работают в режиме бегущей волны. Они оснащены устройствами для создания в рабочей части высокоскоростного потока воздуха или его горючей смеси с пропаном в диапазоне скорости до 500 м/с. Характерной особенностью большинства установок является то, что квазиоптический ЭМ-пучок в них создается в герметичной рабочей камере, давление в которой можно менять от единиц Торг до атмосферного давления. Установка с $\lambda = 4.3$ см имела герметичную камеру высокого давления с радиопрозрачным окном, которая была рассчитана на рабочие давления около 10 atm. Это позволило провести экспериментальные исследования СВЧ-разрядов с использованием высокодобротного квазиоптического СВЧ-резонатора в воздухе, водороде и в дейтерии при избыточных газовых p до нескольких атмосфер.

В **Главе 2** экспериментально и теоретически рассмотрен безэлектродный электрический пробой газов в квазиоптическом ЭМ-пучке.

В этой главе вводятся основные характеристики, определяющие плазмохимические процессы в СВЧ-разрядной плазме воздуха, и даются

простейшие, не противоречащие выполненным экспериментам аналитические выражения, которые можно использовать для их количественных оценок:

$E_{cr} = 30 \cdot p \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + (\omega/\nu_c)^2}$; V/cm – амплитуда критического поля пробоя, где в этом и в аналогичных выражениях давление p имеет размер Торг, ω ; $1/s$ – круговая частота поля, и $\nu_c = 4 \cdot 10^9 \cdot p$; $1/s$ – частота столкновений электронов с молекулами воздуха; $\nu_a = 2 \cdot 10^4 \cdot p$; $1/s$ – эффективная частота прилипания плазменных электронов; $\nu_i = \nu_a \cdot (E_0/E_{cr})^\beta$; $1/s$ – частота ионизации, где $\beta = 5.34$; $D_e = 1.6 \cdot 10^6 / p$; cm^2/s – коэффициент электронной диффузии; $D_a = 1.4 \cdot 10^4 / p$; cm^2/s – коэффициент амбиполярной диффузии; $\nu_{a1} = (10 \cdot p)^2$; $1/s$ – частота трехтельного прилипания электронов; и т.п. Еще раз отметим, что использование этих оценок при анализе получаемых экспериментальных результатов подтвердило их правомочность.

В результате проведения экспериментов выяснилась существенная роль наличия начальных свободных электронов в пробойной области. При естественном уровне начальной ионизации газа и пробое в импульсных полях наблюдается статистический разброс пробойного уровня поля E_{br} и некоторой особенности процесса пробоя в нарастающем во времени t поле. На **Рис.2** приводятся иллюстрирующие это опытные данные. **Рис.2a** соответствует работающей в режиме бегущей волны установке с $\lambda = 8.9$ см, а **Рис.2b** – работающей в режиме открытого резонатора установке с $\lambda = 4.3$ см.

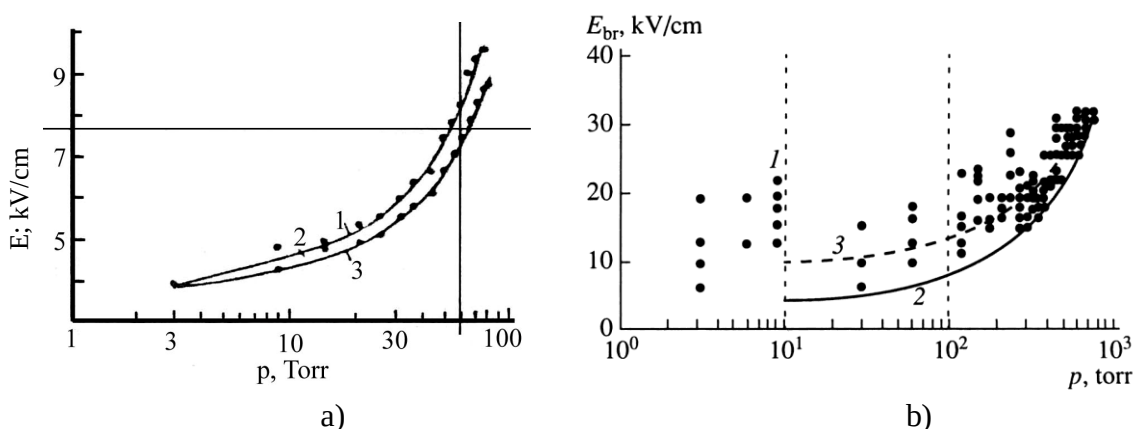


Рис.2. Поле пробоя воздуха при естественном уровне его начальной ионизации

В **Главе 3** описываются эксперименты по выявлению характерных видов безэлектродного СВЧ-разряда в воздухе в надкритическом поле квазиоптического ЭМ-пучка на $\lambda = 8.9$ см. Описывается динамика их пространственного развития при различных p . Приводятся результаты измерения основных параметров плазмы этих разрядов, таких, например, как электронная концентрация плазмы n_e , ее газовая температура T , порог по p развития ИП-каналов и т.д.

На **Рис.3** приведены характерные фотографии СВЧ-разрядов в диффузном виде при $p \approx 30$ Торг (левая) и стримерном виде при $p \approx 100$ Торг. На них излучение поступает слева, вектор E_0 вертикален, характерный поперечный размер разрядной области имеет масштаб десяти сантиметров.

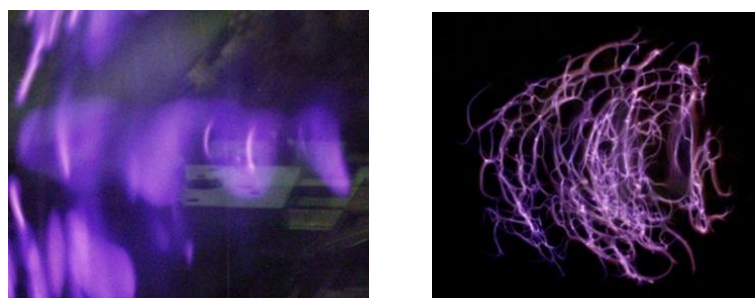


Рис.3. Диффузный и стримерный безэлектродный свободно локализованный СВЧ-разряд в фокусе квазиоптического ЭМ-пучка

В этой главе описываются результаты экспериментального исследования некоторых свойств таких СВЧ-разрядов. Так, измерения средней n_e по разрядной области при величинах p от 12 до 120 Торг дали ее значения от $3.5 \cdot 10^{11}$ до $3.5 \cdot 10^{12}$ 1/см³, соответственно. Рост температуры газа ΔT в области диффузного вида разряда имеет масштаб нескольких десятков градусов. Температура газа T в шнуровых каналах имеет масштаб тысяч градусов.

На **Рис.3** в диффузных областях разряда низкого p видны относительно яркие вытянутые вдоль E_0 каналы. Теоретический анализ показал, что они являются результатом ИП-неустойчивости СВЧ-разрядной плазмы. С ростом p именно эти каналы и ответственны за формирование стримерного вида СВЧ-разряда.

В **Главе 4** приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования способа локального измерения электрической составляющей ЭМ-поля E_0 в квазиоптическом СВЧ-пучке. Используемый при этом металлический шарик инициирует СВЧ-разряд в подкритическом ЭМ-поле, и в измерениях фиксируется максимальное давление воздуха p_{br} , при котором реализуется такая инициация. В линейном приближении решается уравнение баланса электронной концентрации n_e в воздухе в зависимости от амплитуды СВЧ-поля E_0 . Оно сводится к уравнению Эйри, решение которого с учетом требуемых граничных условий дает связь поля E_0 с давлением p_{br} и радиусом шарика a :

$$\frac{0.84}{a \cdot p} = \frac{[(E_0 / E_{cr})^{5.34} - 1]^{3/2}}{7.2 \cdot 5.34 \cdot (E_0 / E_{cr})^{5.34}},$$

где E_{cr} – критическое поле пробоя при данном p , a – имеет размерность см, а p – Торг. На **Рис.4** приведен график этой зависимости и точками показаны результаты экспериментов. Видно, что теория адекватна опытам при значениях $0 \leq [0.84/(a \cdot p)] \leq 0.35$.

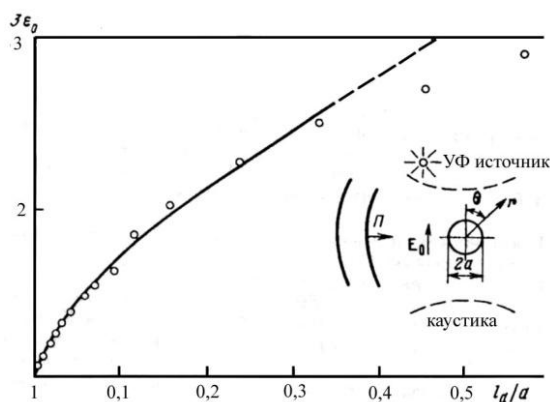


Рис.4. Зависимость локального значения поля пробоя от давления воздуха при помещении металлического шарика в исследуемую точку СВЧ-пучка

Переход к цилиндрическому инициатору, помещаемому в ЭМ-пучок параллельно его вектору E_0 , позволил в экспериментах инициировать СВЧ-разряд не только в подкритическом ($E_0 < E_{cr}$), но и в глубоко подкритическом ($E_0 \ll E_{cr}$) поле. В этой главе приводится полученное по результатам опытов оценочное выражение для поля на вершине такого ЭМ-вибратора E_{pol} с диаметром $2a$ и длиной $2L$, существенно меньшей резонансной длины:

$$\frac{E_{pol}}{E_0} = 1 + \frac{1 - n^*}{n^*} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{2L/2a}} \cdot \left[1 + \left(\frac{2L}{\lambda/2} \right)^2 \right],$$

где коэффициент формы $n^* = \frac{1 - e^2}{2 \cdot e^3} \cdot \left(\ln \frac{1 + e}{1 - e} - 2 \cdot e \right)$ и эксцентриситет $e = \sqrt{1 + (2a/2L)^2}$. На графиках, помещенных на **Рис.5**, сплошной линией показаны результаты экспериментов, пунктирной – указанная зависимость, а остальными линиями – более грубые приближения.

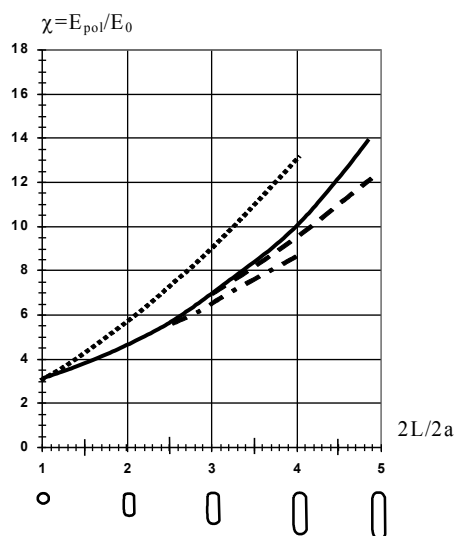


Рис.5. Зависимость от длины и диаметра «короткого» ЭМ-вибратора поля на его вершине при его помещении в исследуемую точку ЭМ-пучка, параллельно электрической составляющей поля

В опытах исследована и способность инициировать СВЧ-разряд ЭМ-вибратором с длиной, близкой к резонансной длине. Полученные результаты обработаны теоретически.

В **Главе 5** описываются экспериментально определенные E_0 - p области реализации различных видов инициированного подкритического СВЧ-разряда в воздухе: с привязанной к инициатору и объемно-развитой стримерной структурой. В ней сравниваются границы этих областей для $\lambda = 8.9$ см и $\lambda = 2.5$ см. Соответствующие иллюстрации приведены на **Рис.6**.

На **Рис.6** линия 1 является зависимостью $E_{cr}(p)$. Линия 2 обозначает граничную область между диффузными и стримерными видами СВЧ-разряда. Линия 3 отделяет область IV подкритического вида разряда от области V глубоко подкритического вида разряда. Кроме того, на **Рис.6** область I есть область надкритического разряда диффузного вида, область II –

надкритического стримерного вида и область **III** – подкритического диффузного вида. На фотографии, иллюстрирующей последний вид разряда, он инициирован шариком, а на иллюстрирующих фотографиях областей **IV** и **V** – линейным ЭМ-вибратором. Из рисунка следует, что с уменьшением λ граница **2** смещается в сторону больших p , а граница **3** – в сторону больших E_0 .

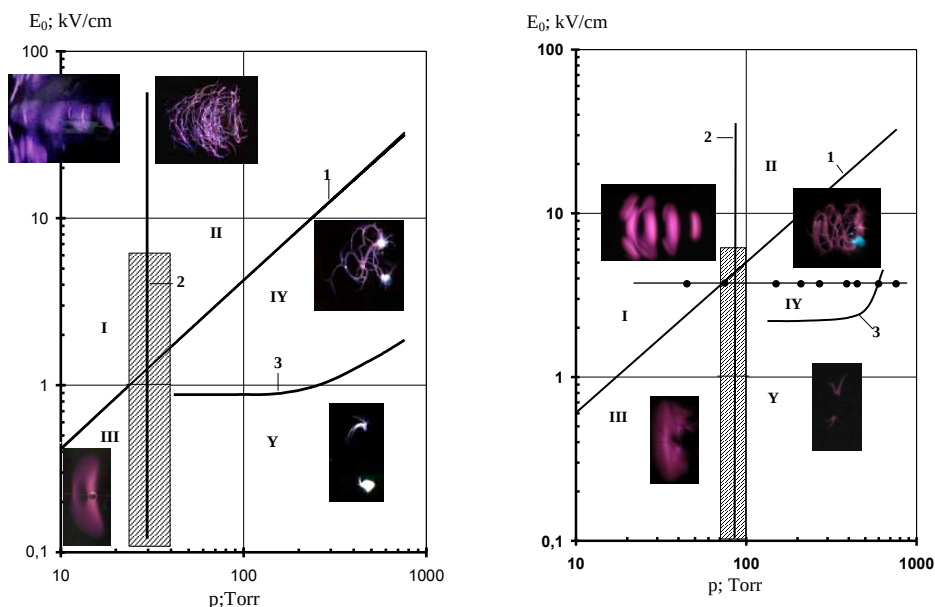


Рис.6. Области реализации различных видов СВЧ-разряда в зависимости от уровня поля E_0 и давления воздуха p при $\lambda = 8.9$ см (левая) и $\lambda = 2.5$ см

В **Главе 6** описываются результаты экспериментальных и теоретических исследований инициированных подкритических СВЧ-разрядов в воздухе с объемно-развитой стримерной структурой. Рассматривается динамика их развития при различных p воздуха. Обосновывается стримерный механизм роста формирующих их плазменных каналов и определяется скорость их роста.

Для примера на **Рис.7** помещены фотографии стримерного вида СВЧ-разряда в воздухе при $p = 120$ Torr и длительности СВЧ-импульса $\tau_{\text{СВЧ}} = 4, 7$ и $17 \mu\text{s}$ (левые) и при $p = 300$ Torr и $\tau_{\text{СВЧ}} = 36 \mu\text{s}$. Разряд инициирован шариком диаметром $2a = 2.5$ mm. На фотографиях ЭМ-излучение поступает справа, а вектор E_0 – вертикален. Они иллюстрируют рост и ветвление стримерных каналов. Оцененная по фотографиям их средняя скорость роста $v_{\text{стр}} \approx 6 \cdot 10^5$ cm/s

при $p = 120$ Torr, а при $p = 300$ Torr скорость фронта распространения разрядной области навстречу ЭМ-излучению $v_{fr} \approx 2.5 \cdot 10^5$ cm/s.

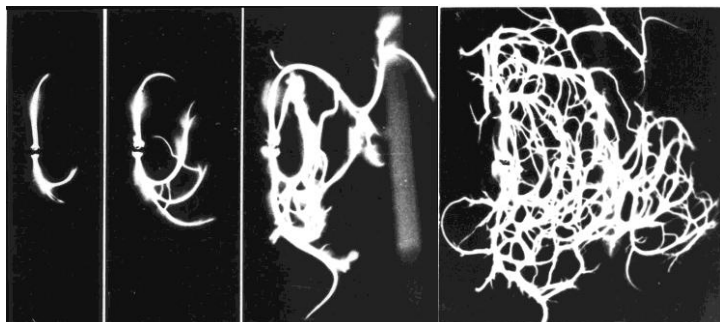


Рис.7. Динамика развития иницированного стримерного подкритического СВЧ-разряда

На **Рис.8** приведены полученные в экспериментах значения v_{fr} в диапазоне E_0 и p воздуха. В работе, используя выражения для диффузионной и дрейфовой скорости распространения волны ионизации и опытные данные, получена оценочная формула для v_{fr} :

$$v_{fr} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (3 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{p} + 1.7 \cdot 10^{-2} \cdot E_0 \cdot p \cdot \lambda) \text{ cm/s},$$

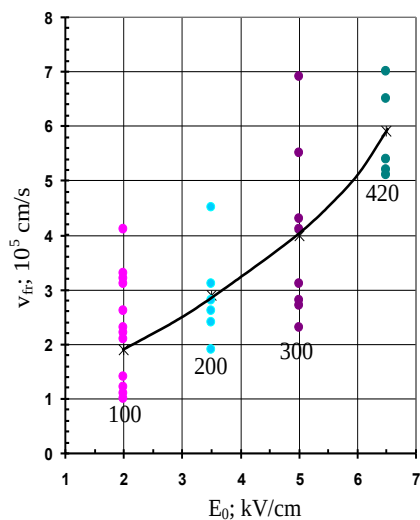


Рис.8. Скорость распространения навстречу СВЧ-излучению фронта подкритического стримерного СВЧ-разряда

где размерность p – Torr, E_0 – V/cm и λ – см. Рассчитанные по ней значения v_{fr} для опытных условий на **Рис.16** соединены сплошной линией.

Высокие значения v_{str} демонстрируются в опытах по зажиганию данного вида разряда в СЗ-потоке воздуха.

Опыты по скоростной фоторазвертке разрядной области

выявляют резонансный характер взаимодействия отдельных участков плазменных каналов с СВЧ-полем. Характерная покадровая фоторазвертка СВЧ-разряда при $p = 330$ Torr и $E_0 = 5.5$ kV/cm, иницированного шариком с

$2a = 2.5 \text{ mm}$, помещена на **Рис.9**. На ней время экспозиции равно $1.5 \text{ } \mu\text{s}$, а время между кадрами – $1.9 \text{ } \mu\text{s}$. Кадры пронумерованы последовательно по времени. На них по разрядному фронту фиксируются яркие резонансные участки плазменных каналов, которые и ответственны за энергетическую эффективность взаимодействия разрядной области с ЭМ-излучением. Полученные в опытах результаты обработаны теоретически.

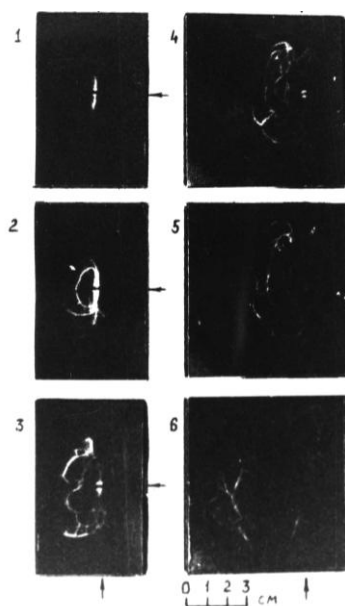


Рис.9. Покадровая фоторазвертка, демонстрирующая динамику развития иницированного подкритического стримерно-шнурового СВЧ-разряда

В этой главе также показывается роль ИП-неустойчивости разрядной плазмы в СВЧ-поле на процесс трансформации диффузного вида разряда в стримерно-шнуровой с ростом p . На **Рис.10** помещена соответствующая иллюстрация при $p = 60 \text{ Torr}$ и $E_0 \approx E_{br}$. На нем кадры по времени в каждом ряду расположены слева направо и сверху вниз по рядам. Их время экспозиции $0.2 \text{ } \mu\text{s}$, а расстояние между кадрами – $0.2 \text{ } \mu\text{s}$.

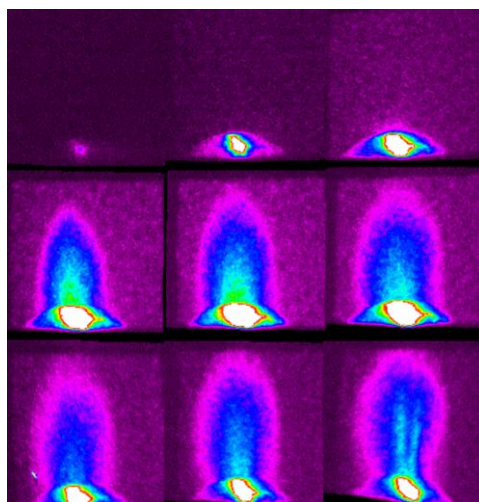


Рис.10. Развитие ИП-каналов в начальной диффузионной разрядной области

Развитая в работе теория определяет инкремент развития данной неустойчивости и характерный поперечный размер формирующегося ИП-канала.

Глава 7 посвящена описанию результатов исследований СВЧ-разрядов на поверхности радиопрозрачного диэлектрика при $\lambda = 8.9$ см и $\lambda = 2.5$ см.

На **Рис.11а** показана схема эксперимента, при котором удастся получить поперечный тип поверхностного СВЧ-разряда. Для этого на пути распространения подкритического СВЧ-разряда с объемно-развитой стримерной структурой необходимо поместить радиопрозрачную диэлектрическую пластину, перпендикулярную вектору Пойнтинга Π ЭМ-излучения. При этом инициатор электрического пробоя воздуха может быть расположен как вне пластины, так и на ее поверхности. На **Рис.11б** показан характерный внешний вид такого разряда.

Схема реализации продольного поверхностного СВЧ-разряда показана на **Рис.12а**. Для этого на пути распространения подкритического СВЧ-разряда с объемно-развитой стримерной структурой необходимо поместить радиопрозрачную диэлектрическую пластину, вдоль вектора Пойнтинга Π ЭМ-излучения. Инициатор электрического пробоя воздуха расположен на ее поверхности. На **Рис.12б** показан характерный внешний вид такого разряда для $\lambda = 8.9$ см.

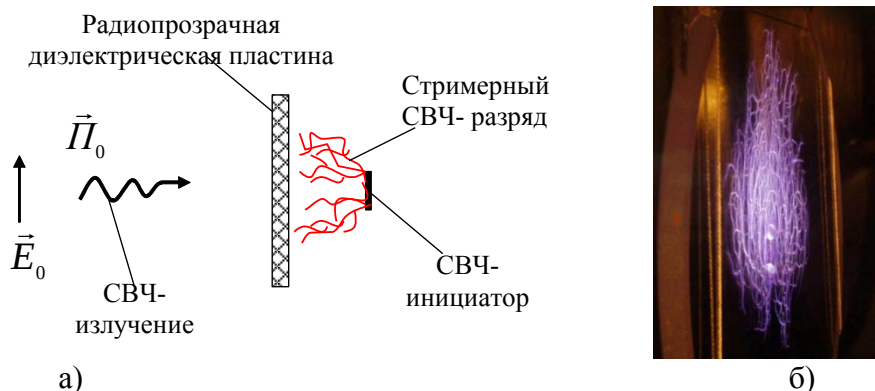


Рис.11 Схема реализации (а) поперечного поверхностного СВЧ-разряда и его характерный внешний вид для $\lambda = 8.9$ см (б)

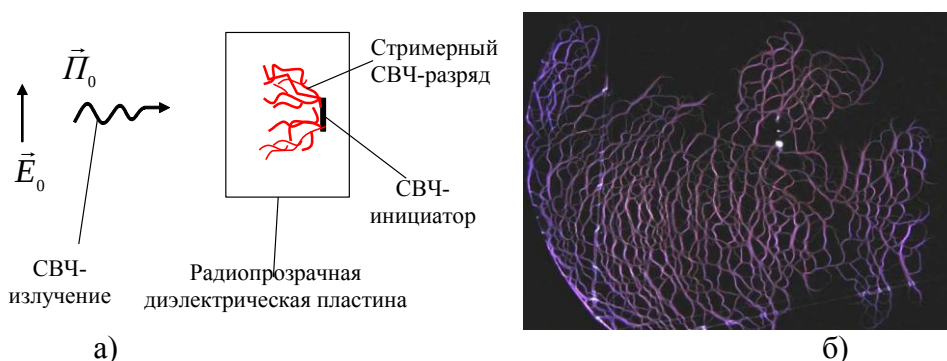


Рис.12 Схема реализации (а) продольного поверхностного СВЧ-разряда и его характерный внешний вид $\lambda = 8.9$ см (б).

Приведены результаты экспериментов по реализации поперечного и продольного типов поверхностных СВЧ разрядов в условиях экспериментальных установок с $\lambda = 8.9$ см и $\lambda = 2.5$ см. Приводятся и обсуждаются результаты опытов по изучению свойств таких разрядов в различных условиях в диапазоне параметров излучения и газа, в том числе и в скоростном потоке. Показано, что основные механизмы, отвечающие за развитие структуры и основные параметры поверхностного СВЧ-разряда, в частности, определяющие его высокую энергетическую эффективность, те же, что и для разрядов объемного типа. В тоже время все процессы локализованы в тонком приповерхностном слое газа. Это открывает широкие возможности применения разряда такого типа в практических приложениях.

В **Главе 8** описываются результаты исследований привязанных к инициатору глубоко подкритических СВЧ-разрядов в воздухе.

В ней показывается энергетическая эффективность взаимодействия плазмы инициированного линейным ЭМ-вибратором разряда такого вида с ЭМ-полем. Эксперименты по его зажиганию в потоке воздуха и анализ измеренных параметров спутного следа разряда позволили оценить эффективную площадь его энергетического взаимодействия с ЭМ-полем. Эта площадь оказалась существенно большей площади продольного сечения разрядной области. Полученные результаты осмыслены теоретически.

На **Рис.13** помещена фотография глубоко подкритического СВЧ-разряда в воздухе при $p = 27$ Торг и его исходной $T = 110$ °К. Разряд горит в кормовой области инициирующего разряд трубчатого ЭМ-вибратора с кварцевой насадкой в струе воздуха при его скорости 600 м/с. ЭМ-волна поступает на инициатор сверху, ее вектор E_0 – горизонтален.



Рис.13. Иницированный трубчатым вибратором глубоко подкритический СВЧ-разряд в высокоскоростной струе воздуха

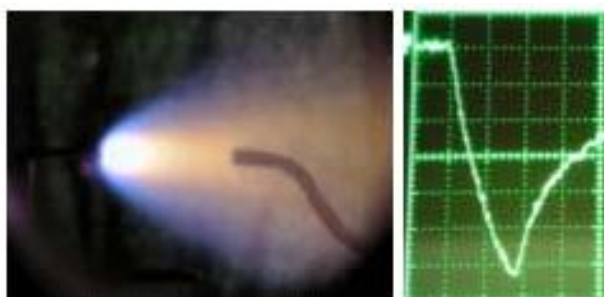


Рис.14. Горение струи пропан-воздушной смеси, подожженной инициированным линейным ЭМ-вибратором глубоко подкритическим СВЧ-разрядом

Опыты показали, что такой разряд поджигает пропан-воздушную горючую смесь, в том числе и в высокоскоростном ее потоке. При этом область горения стабилизируется, и поджигается смесь с коэффициентом избытка горючего, существенно меньшим его

значения, ограничивающего ее область воспламенения. Для примера на **Рис.14** помещена фотография, демонстрирующая поджиг и горение пропан-воздушной струи. Рядом с ней дана осциллограмма с термопарного датчика, измеряющего температуру торможения потока.

В этой главе описывается также способ инициации глубоко подкритического СВЧ-разряда с помощью резонансного кольцевого инициатора в неподвижном воздухе и в его скоростном потоке. На **Рис.15** дана схема реализации такого разряда в ЭМ-волне с $\lambda \approx 12.5$ см и фотографии его внешнего вида в воздухе атмосферного p при $v_{fl} = 0, 15$ и 25 м/с (сверху вниз). На них СВЧ-излучение поступает сверху, и его вектор E_0 параллелен v_{fl} .

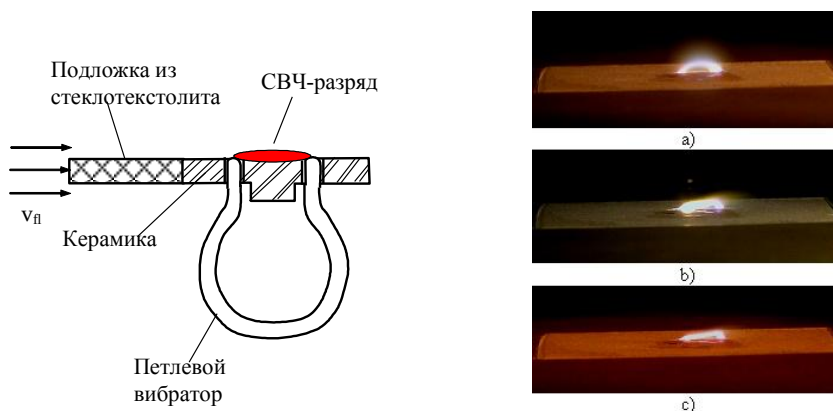


Рис.15. Поверхностный глубоко подкритический СВЧ-разряд, иницированный резонансным кольцевым ЭМ-вибратором

В **Главе 9** приведен расчет открытого сферического резонатора, применяемого в эксперименте. Расчет проведен на основе известной теории открытого высокочастотного СВЧ-резонатора с соосно расположенными двумя сферически вогнутыми зеркалами. Проанализированы возможные типы колебаний ЭМ-волны в нем, оптимальная связь с генератором, добротность, накопленная энергия и т.д. Подобные резонаторы в настоящее время изучены еще недостаточно, поэтому сравнение результатов расчета по вышеупомянутой теории с результатами экспериментов имеют самостоятельную ценность.

На **Рис.16** помещена фотография СВЧ-разрядов в центральной области открытого резонатора. Они расположены вдоль его горизонтальной оси в пучностях СВЧ-поля и демонстрируют осевое распределение этого поля для простейшего типа колебания ЭМ-волны в резонаторе.

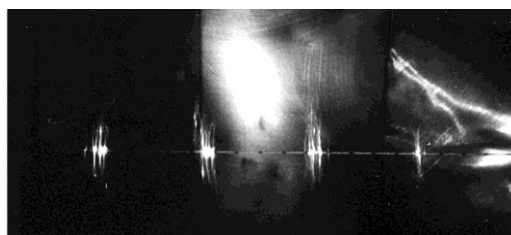


Рис.16. СВЧ-разряды в пучностях ЭМ-волны вдоль оси открытого двухзеркального квазиоптического резонатора

В главе также описываются экспериментально реализованные в открытом СВЧ-резонаторе безэлектродные разряды и их основные свойства в воздухе, водороде и дейтерии при высоких давлениях p в фокусной области высокочастотного открытого двухзеркального резонатора. Рассматривается их динамика, влияние на свойства разряда надкритичности исходного поля, влияние ИП - и изгибной неустойчивостей на формирование структуры и свойств разряда и т.д.

На **Рис.17** приведены характерные фотографии таких разрядов в воздухе при $p = 760$ Торг (левая) и в водороде при $p = 10^3$ Торг на установке с $\lambda = 8.9$ см.

На них вектор E_0 вертикален. Длина плазменных каналов равна примерно двум сантиметрам.

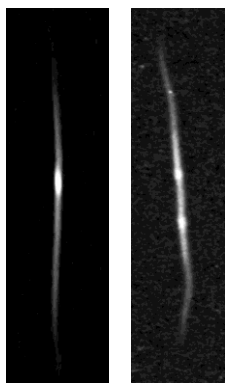


Рис.17. Безэлектродные свободно локализованные СВЧ-разряды в фокусе квазиоптического двухзеркального открытого резонатора

На **Рис.17** видно, что такие разряды имеют яркие ядра. Измерения газовой температуры ядра разряда в воздухе при атмосферном p дали $T_{\text{я}} \approx 7 \cdot 10^3$ °К при $n_e \approx 4.5 \cdot 10^{14}$ 1/см³. Фоторазвертка показала, что такой разряд, начинаясь с «точки»,

вытягивается вдоль E_0 с экспоненциально возрастающей скоростью. Теоретический анализ развития такого вида разряда показал, что фиксируемые ядра являются результатом перетяжечной неустойчивости сжатого собственным магнитным полем токового плазменного канала. В этих ядрах и выделяется основная энергия ЭМ-поля, «перехватываемая» резонансным

разрядным плазменным ЭМ-вибратором.

На **Рис.18** приведены фотографии свободно локализованных СВЧ-разрядов в водороде в фокусе двухзеркального резонатора на установке с $\lambda = 4.3$ см. Слева направо они соответствуют давлению газа 2.5, 4, 5 и 8 atm. На фотографиях вектор E_0 по-прежнему вертикален, а длина разрядов равна приблизительно 1 см. Теоретический анализ показал, что фиксируемая продольная геометрия таких разрядов есть результат изгибной неустойчивости «самосжатых» токовых плазменных каналов. На **Рис.18** при $p = 4$ atm фиксируется и результат локальной перетяжечной неустойчивости такого канала.

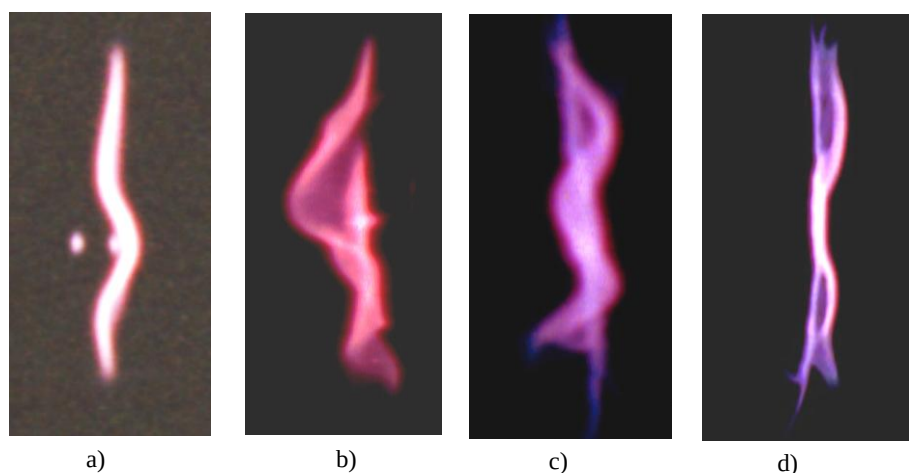


Рис.18. Свободно локализованные СВЧ-разряды в водороде в фокусе двухзеркального резонатора

В **Главе 10** описываются результаты экспериментов по исследованию свободно локализованных надкритических и инициированных подкритических разрядов в квазиоптических ЭМ-пучках в водороде, гелии и элегазе. По их результатам констатируется универсальность характерных для воздуха видов СВЧ-разряда данного типа и в других газах, естественно, при учете количественных различий. Для примера на **Рис.19** показан подкритический стримерный СВЧ-разряд при $\lambda = 8.9$ см, $\tau_{\text{СВЧ}} = 10 \mu\text{s}$ и $E_0 = 5 \text{ kV/cm}$ в элегазе (SF_6) при $p = 90 \text{ Torr}$, водороде H_2 при $p = 300 \text{ Torr}$ и гелии He при $p = 300 \text{ Torr}$ (слева направо). Разряд инициирован шариком с $2a = 2.5 \text{ mm}$.

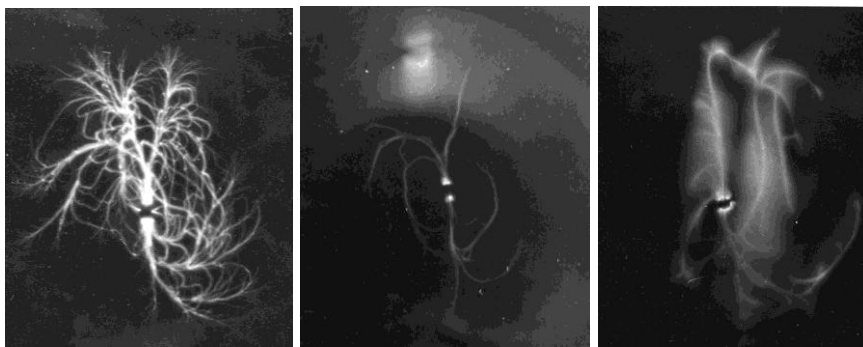


Рис.19. Иницированный шариком стримерный подкритический СВЧ-разряд в элегазе, водороде и гелии

В Главе 11 перечисляется ряд рассматриваемых в настоящее время направлений практического применения данного типа разряда. Они иллюстрируются соответствующими схемами и результатами предварительных опытов. В частности, рассматривается возможность применения подкритического и глубоко подкритического СВЧ-разряда в прямоточных реактивных двигателях и газотурбинных установках различного назначения. Приводятся результаты экспериментов по использованию глубоко подкритического разряда в установках для газификации низкокалорийных углей. Изучена возможность реализации безынерционного управления аэродинамическими параметрами сверхзвуковых и дозвуковых летательных аппаратов и, в частности, использование для этого подкритического СВЧ-разряда с развитой стримерной структурой на поверхности диэлектрика.

На *Рис.20* помещена схема эксперимента на установке с $\lambda = 2.5$ см, демонстрирующего объемный поджиг пропан-воздушной затопленной струи воздуха при $v_{\text{н}} = 500$ м/с с использованием подкритического стримерно-шнурового СВЧ-разряда с объемно-развитой структурой. На ней же слева направо даны фотографии области горения бедной, стехиометрической и богатой смеси.

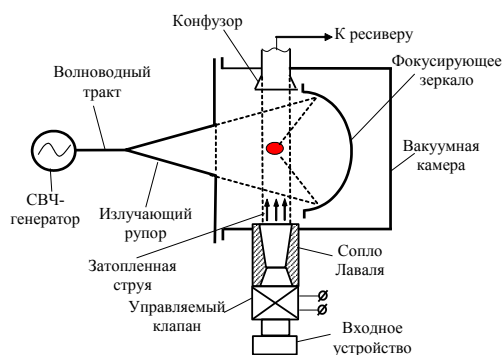


Рис.20 Поджиг сверхзвуковой затопленной струи пропан-воздушной смеси подкритическим СВЧ-разрядом с объемно-развитой стримерно-шнуровой структурой

На **Рис.21** показано горение глубоко подкритического СВЧ-разряда, инициированного линейным проволочным ЭМ-вибратором, в ЭМ-волне с $\lambda \approx 12.5$ см в потоке угольно-водной эмульсионной смеси.



Рис.21. Глубоко подкритический СВЧ-разряд в потоке угольно-водной эмульсионной смеси

На **Рис.22** слева направо помещены фотографии рабочей части установки с $\lambda \approx 12.5$ см, работающей в режиме измерения силы лобового сопротивления, донного сопротивления и подъемной силы моделей, обдуваемых затопленной СЗ-струей воздуха. Помещенные ниже осциллограммы демонстрируют уменьшение этих сил при зажигании в соответствующих областях глубоко подкритического СВЧ-разряда.

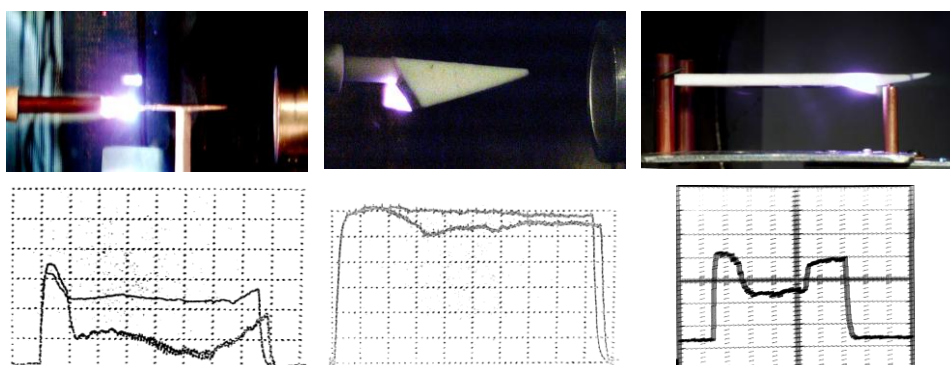


Рис.22 Эксперименты, демонстрирующие влияние глубоко подкритического СВЧ-разряда на силу лобового сопротивления, силу донного сопротивления и подъемную силу

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведено исследование нового физического явления – электрического разряда в газах среднего и высокого давления в квазиоптических ЭМ-пучках СВЧ-диапазона длин волн.

Разряд реализован на специально созданных оригинальных экспериментальных установках вдали как от элементов, формирующих ЭМ-пучок, так и от элементов конструкции. Он исследовался как в поле бегущей ЭМ-волны, так и в поле стоячей волны высокочастотных квазиоптических резонаторов. Исследования проводились в различных условиях. Так, давление газов в разрядной области варьировалось от единиц Торг до нескольких атмосфер. При этом, кроме воздуха, изучались водород, азот и гелий. В экспериментах варьировалась влажность воздуха и использовалась смесь воздуха с водным аэрозолем. Разряд зажигался в неподвижном воздухе, в его модельной горючей смеси с пропаном и в скоростном потоке воздуха и горючей смеси.

В экспериментах осуществлялась интегральная фоторегистрация разрядной области. В них исследовалась динамика пространственного развития разряда с помощью скоростной непрерывной и кадровой фоторегистрации; измерялась скорость распространения плазменной разрядной границы; оценивалась средняя по объему электронная концентрация разрядной плазмы; измерялась средняя по плазменному объему газовая температура, и оценивалось ее максимальное локальное значение.

Разработанный метод локального измерения величины поля ЭМ-пучка позволил реализовывать данный тип разряда в импульсном режиме при подкритическом уровне поля. Модернизация этого способа инициации электрического пробоя газа позволила зажечь такой разряд и в глубоко подкритическом поле в квазинепрерывном режиме его горения.

В процессе исследований выяснилось, что данный тип разряда в различных областях уровня поля и давления газа реализуется в существенно

различных видах: в сравнительно пространственно-однородном диффузном виде, стримерном объемном виде в подкритическом поле, стримерном привязанном к инициатору виде в глубоко подкритическом поле и в виде поверхностного разряда на радиопрозрачном диэлектрике.

Выявлено значение ионизационно-полевых и ионизационно-перегревных явлений в процессе формирования структуры СВЧ-разрядов различного вида. При этом показана роль ионизационно-перегревного плазменно-разрядного физического явления на процесс трансформации диффузного вида разряда в стримерный. Данное явление проанализировано теоретически и определены границы исходных параметров, необходимых для его реализации. Определена зависимость этих границ в воздухе от длины волны ЭМ-излучения. Выводы теории согласуются с результатами экспериментов. Установлено, что указанные виды разряда являются универсальными для различных газов с соответствующими количественными различиями.

Получены теоретические оценочные выражения для скорости роста плазменных каналов на основе СВЧ-стримерного механизма их роста. Эти формулы проверены в опытах, в которых продемонстрированы сверхзвуковые масштабы скорости роста стримерных каналов. Эти выражения позволяют оценить и среднюю скорость движения границы распространения разрядной области, состоящей из прорастающих и ветвящихся плазменных каналов. Выявлен резонансный механизм взаимодействия различных участков плазменных каналов с возбуждающим разряд СВЧ-полем. Этот механизм ответственен за высокую эффективность энергетического взаимодействия разрядной плазмы стримерного вида как в подкритическом, так и в глубоко подкритическом поле. При этом температура газа в плазменных каналах достигает нескольких тысяч градусов.

Выявленные свойства стримерных СВЧ-разрядов являются уникальными и позволяют рассматривать различные варианты их практического применения.

Физические подходы для некоторых из этих вариантов опробованы на лабораторном уровне и показали их перспективность для практики.

Основные результаты диссертации представлены в следующих работах

1. Грачев Л.П., Есаков И.И., Князев М.П., Мишин Г.И., Шарай Б.А. Вероятность импульсного безэлектродного СВЧ пробоя воздуха в неоднородном поле при естественном уровне начальной ионизации // ЖТФ. 1984. Т.54. Вып.7. С. 1353-1355.
2. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Никитин М.Ю., Ходатаев К.В. Безэлектродный разряд в воздухе при средних давлениях //ЖТФ. 1985. Т.55. Вып.2. С. 389-391.
3. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Никитин М.Ю., Ходатаев К.В. Взаимодействие ударной волны с распадающейся плазмой безэлектродного СВЧ разряда // ЖТФ. 1985. Т.55. Вып.5. С. 972-975.
4. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Федотов А.Б. Динамика развития пространственной структуры безэлектродного СВЧ разряда // ЖТФ. 1989. Т.59. Вып.10. С. 149-154.
5. Есаков И.И. Взаимодействие ударной волны с распадающейся плазмой безэлектродного СВЧ разряда //Сборник материалов III Всесоюзной конференции “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”. Новосибирск. 1989. С.67.
6. Грачев Л.П., Есаков И.И., Князев М.П., Мишин Г.И. Препринт №1345 Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе АН СССР “Акустические свойства воздуха, возбужденного электрическим разрядом”. Ленинград. 1989. 27 с.
7. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В., Цыпленков В.В. Препринт N 9005 МРТИ АН СССР "Установка для исследования импульсного безэлектродного СВЧ разряда в газах высокого и среднего давления". Москва, 1990. 27 с.

8. Есаков И.И. К вопросу о взаимодействии ударной волны с распадающейся плазмой безэлектродного СВЧ разряда в воздухе //Известия СО АН СССР. Сер. технических наук. 1990. Вып.1. С. 98-102.
9. Грачев Л.П., Есаков И.И., Князев М.П., Мишин Г.И. Акустические свойства воздуха, возбужденного электрическим разрядом //ЖТФ. 1990. Т.60. Вып.11. С.183-186.
10. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. Препринт № 1577 Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе “Возможность осуществления термоядерного синтеза в резонаторном стримерном СВЧ разряде высокого давления”. Санкт-Петербург, 1992. 60 с.
11. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В., Цыпленков В.В. Высокочастотный пробой воздуха в присутствии металлического шара //Физика плазмы. 1992. Т.18. Вып.3. С. 411-413.
12. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В., Цыпленков В.В. Фоторазвертка разряда высокого давления в волновом пучке //Письма в ЖТФ. 1992. Т.18. Вып.22. С. 34-37.
13. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В., Цыпленков В.В. Эволюция структуры газового разряда в фокусе СВЧ излучения в зависимости от давления //ЖТФ. 1994. Т.64. Вып.1. С.74-88.
14. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. Разряд в воздухе в квазиоптическом СВЧ резонаторе // ЖТФ. 1994. Т.64. Вып.2. С.26-37.
15. Веденин П.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Попов Н.А. Исследование плазмохимических процессов, инициируемых мощным СВЧ разрядом в воздухе //Материалы 2-го международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии (ISTAPC - 95), 22 - 26 мая 1995. Иваново. С.152-155.
16. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. Скорость фронта стимулированного СВЧ разряда в волновом пучке //ЖТФ. 1995. Т.65. Вып.5. С.21-30.

17. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. Высокочастотный пробой воздуха в присутствии вибратора // ЖТФ. 1995. Т.65. Вып.7. С.60-67.
18. Грачев Л.П., Есаков И.И. Электрическое поле на концах СВЧ-вибратора, помещенного в ТЕМ волну // Радиотехника и электроника. 1995. Том.41, № 6, С.1-3.
19. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. Скорость распространения ионизационно-дрейфовой волны пробоя // ЖТФ. 1995. Т.65. Вып.11. С.86-92.
20. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. Стадии развития безэлектродного СВЧ разряда // ЖТФ. 1996. Т.66. Вып.7. С.32-45.
21. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. Ионизационно-перегревная неустойчивость разрядной плазмы безэлектродного СВЧ разряда // ЖТФ. 1996. Т.66. Вып.8. С.73.
22. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. Диффузный этап развития безэлектродного СВЧ разряда в воздухе среднего давления // ЖТФ. 1996. Т.66. Вып.12. С.12-20.
23. Грачев Л.П., Есаков Г.И., Ходатаев К.В., Мишин Г.И. Термоядерный реактор // Патент Российской Федерации №2076358 от 27.03.1997.
24. Ходатаев К.В., Грачев Л.П., И.И.Есаков Область существования самостоятельного стримерного микроволнового разряда в покоящейся газе // Тезисы докладов XXV Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 2-6 марта 1998 г., Звенигород. с.194
25. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. Особенности развития импульсных СВЧ разрядов в квазиоптическом пучке в различных газах // ЖТФ. 1998. Том.68. №4. С.33-36.
26. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. Инициированный подкритический стримерный сверхвысокочастотный разряд и проблема очистки атмосферы Земли от фреонов // ЖТФ. 1998. Том.68. №12. С.15-24.

27. Grachev L.P., Esakov I.I., Khodataev K.V. The pinch effect in microwave resonant streamer discharge and its possible applications” //IV International Workshop “STRONG MICROWAVES IN PLASMA”, Nizhniy Novgorod, Russia, August 2-9, 1999. Abstrakts, IAP Ras.
28. Барашенков В.С., Грачев Л.П., Есаков И.И., Костенко Б.Ф., Ходатаев К.В., Юрьев М.З. Пробой воздуха в нарастающем СВЧ поле //Сообщения ОИЯИ, Дубна, 1999. P9-99-256.
29. Esakov I., Grachev L., Khodataev K. The Review of Plasmagasdynamics Experiments in Russia, Conclusions and Prospects of Plasma technology Applications in Aerodynamics //Proc. of 3 th International Weakly Ionized Gases Workshop. (1-5 November 1999. Norfolk. Virginia.USA Waterside Marriott. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). AIAA-99-4821.
30. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. Стримерный СВЧ разряд в сверхзвуковом потоке воздуха //ЖТФ. 1999. Т.69. Вып.11. С.14-18
31. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. Диапазон существования самостоятельно развивающегося подкритического стримерного СВЧ разряда //ЖТФ. 1999. Т.69. Вып.11. С.19-24.
32. Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V. The pinch effect in microwave resonant streamer discharge //Problems of Atomic Science and technology. 2000, #3, Series: Plasma Physics (5). P.138-140.
33. Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V. Plasmagasdynamics experiments in Russia and prospects of plasma technology application in aerodynamics //Problems of Atomic Science and technology. 2000, #3, Series: Plasma Physics (5). P.141-145.
34. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. Обзор плазмагазодинамических экспериментов в России, выводы и перспективы приложения плазменных технологий в аэродинамике //Материалы XXVII Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому синтезу, 21-25 февраля 2000 г. С.225

35. Grachev L.P., Esakov I.I., Khodataev K.V. Plasmagasdynamics experiments in Russia and prospects of plasma technology applications in aerodynamics //Proc. of VIII Ukrainian Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion. Alushta, September, 16, 2000. P.152.
36. Grachev L.P., Esakov I.I., Khodataev K.V. The Pinch effect in microwave resonant streamer discharge //Proc. of VIII Ukrainian Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion. Alushta, September, 16, 2000. p.153.
37. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. Параметры плазмы в резонансном канале микроволнового стримерного разряда высокого давления //Материалы Международного совещания по магнитоплазменной аэродинамике в аэрокосмических приложениях. Москва, ИВТАН, апрель 2000 г. С. 154-162.
38. Барашенков В.С., Грачев Л.П., Есаков И.И., Костенко Б.Ф. и др. Пробой воздуха в нарастающем СВЧ поле //ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып.10. С.34-39.
39. Барашенков В.С., Грачев Л.П., Есаков И.И., Костенко Б.Ф. и др. Порог кумулятивного резонансного стримерного СВЧ разряда в газах высокого давления //ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып.11. С.31-35.
40. Грачев Л.П., Есаков И.И., Малык С.Г. Сферический плазмOID с нерезкой границей в линейно поляризованном квазиоптическом ЭМ поле //ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып.6. С.23-27.
41. Грачев Л.П., Есаков И.И., Малык С.Г., Ходатаев К.В. Двухзеркальный резонатор для исследования СВЧ безэлектродного разряда в газах высокого давления //ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып.6. С.66-74.
42. Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И. Квазиоптический двухзеркальный открытый резонатор //Радиотехника и электроника. 2001. Т 46. №9. С.1067-1077.
43. Esakov Igor I., Grachev Lev P., Khodataev Kirill V., Van Wie D.M. Investigation of the possibility of the application of the undercritical microwave streamer gas discharge for the ignition of a fuel in the jet engine //32nd AIAA Plasmadynamics

- and Lasers Conference and 4th Weakly Ionised Gases Workchop (11-14 June 2001, Anaheim, CA). AIAA-2001-2939.
44. Grachev L.P., Esakov I.I., Khodataev K.V. The pinch-effect in microwave resonant streamer discharge at high gas pressure //V International workshop "Strong microwave in plasma", Nizhny Novgorod, Russia, August 1-9, 2002. D14.
 45. Popović S., Vusković L., Esakov I.I., Grachev L.P. and Khodataev K.V. Subcritical microwave streamer discharge at the surface of a polymer foil //Applied physics letters. 2002. V.81. N.11. P.1964-1965.
 46. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. Влияние инициированного микроволнового разряда на обтекание моделей сверхзвуковым потоком //Материалы Международного симпозиума «Термохимические и плазменные процессы в аэродинамике» (Санкт-Петербург, 15-19 июля, 2002, Холдинговая компания «Ленинец» при участии НИПГС, EOARD, AFOSR). С.113-119.
 47. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. Магнитогидродинамические неустойчивости самосжатого резонансного стримерного СВЧ разряда //ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып.5. С.35-40.
 48. Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Покрас С.М., Ходатаев К.В. Импульсный СВЧ разряд в атмосферном воздухе в фокусе двухзеркального резонатора //ЖТФ. 2003. Т. 73, Вып.1. С.46-50.
 49. Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V. Creation of the thrust and the lifting force in a supersonic flow with the help of a microwave discharge //Proc. of the 5th International Workshop on Magneto- and Plasma Aerodynamics for Aerospace Applications (Moscow, 7-10 April 2003, Institute of High Temperatures of RAS). p.69-75.
 50. Esakov I.I., Grachev L.P. and Khodataev Kirill V. Investigation of an Undercritical Microwave Discharge in Air Flow near a Body and its Influence on the Aerodynamics of the Body //41st AIAA Aerospace Sciences Meeting 6-9 January 2003, Reno, NV. Paper AIAA-2003-0529.

- 51.Бычков В.Л., Грачев Л.П., Есаков И.И., Раваев А.А., Ходатаев К.В. Продольный электрический разряд постоянного тока в СЗ потоке воздуха //ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып.7. С.27-32.
- 52.Esakov Igor I., Grachev Lev P., Khodataev Kirill V., Van Wie D.M. Experiments on propane ignition in high-speed airflow using a deeply undercritical microwave discharge //42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (5-8 January 2004, Reno, Nevada). AIAA 2004-840.
- 53.Bychkov V.L., Esakov I.I., Grachev L.P. Experimental determination of the microwave field threshold parameters insuring realization of a streamer discharge of the high temperature form //42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (5-8 January 2004, Reno, Nevada). AIAA 2004-181.
- 54.Vinogradov V.A., Alexandrov A.F., Timofeev I.B., Esakov I.I. The effects of plasma formations on ignition and combustion //42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (5-8 January 2004, Reno, Nevada). AIAA 2004-1356.
- 55.Есаков И.И., Бычков В.Л., Грачев Л.П., Ходатаев К.В. Плазменно-аэродинамические силы, создаваемые микроволновым разрядом //Материалы IV Международного симпозиума «Термохимические и плазменные процессы в аэродинамике» (Санкт-Петербург, 12-14 июля 2004, Холдинговая компания «Ленинец» при участии НИПГС, EOARD, AFOSR). С.24.
- 56.Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. Устройство для генерации плазмы //Патент на изобретение №2266629. Бюл.№ 35, 20.12.2005.
- 57.Esakov Igor I., Grachev Lev P., Bychkov Vladimir L. Experimental determination of microwave undercritical discharge transition to deeply undercritical at different wavelengths //43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (10-13 January 2005, Reno, Nevada). AIAA 2005-597.
- 58.Esakov Igor I., Grachev Lev P., Khodataev Kirill V., Van Wie D.M. Efficiency of microwave discharges for propane ignition in cold high-speed airflows //43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (10-13 January 2005, Reno, Nevada). AIAA 2005-989.

- 59.Есаков И.И., Грачев Л.П., Ходатаев К.В., Бычков В.Л. Свойства микроволнового стримерного разряда в воздухе при различной его влажности и в присутствии водяного аэрозоля //Материалы V Международного симпозиума «Термохимические и плазменные процессы в аэродинамике» (Санкт-Петербург, 19-21 июня 2006, Холдинговая компания «Ленинец» при участии НИПГС, EOARD, AFOSR). С.49.
- 60.Esakov I.I., Grachev L.P., Bychkov V.L., VanWie D. Investigation of undercritical MW discharge with volumetrically developed streamer structure in propane-air supersonic stream //44rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (9-12 January 2006, Reno, Nevada). AIAA 2006-790.
- 61.Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V., Vinogradov V.A. and Van Wie David M. Efficiency of propane-air mixture combustion assisted by deeply undercritical MW discharge in cold high-speed airflow //44rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (9-12 January 2006, Reno, Nevada). AIAA 2006-1212.
- 62.Александров А.Ф., Бычков В.Л., Грачев Л.П., Есаков И.И., Ломтева А.Ю. Ионизация воздуха в околоскритическом электрическом поле //ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып.3. С.38-43.
- 63.Esakov Igor.I., Grachev Lev P., Khodataev Kirill V., Vinogradov Viacheslav A., and Van Wie David M. Propane-Air Mixture Combustion Assisted by MW Discharge in a Speedy Airflow //IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE. 2006. V.34, No.6. P.2497-2506.
- 64.Ardelyan N.V., Bychkov V.L., Denisjuk S.V., Esakov I.I., Grachev L.P. and Kosmachevskii K.V. Combined Discharges for Combustion Application //Proc. of 2nd International Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPAС) (19-21 September 2006, Quality Inn Governor Falls Church, Virginia, U.S.A.). P.31-32.
- 65.Esakov Igor I., Bychkov Vladimir L., Feldman Grigory G., Grachev Lev P., Khodataev Kirill V., Lebedev Vitaly B. Research of the streamer microwave discharge in a quasi-optical beam of electromagnetic wave with application of the

- KO11 image converter camera //Technical Program (including abstracts) of the 27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, 17-22 September, 2006, Xi'an International Conference Center, Xi'an, China, Paper 032. P.72-74.
- 66.Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Федоров В.В., Ходатаев К.В. Области реализации различных типов СВЧ-разряда в квазиоптических электромагнитных пучках //ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып.11. С.52-60.
- 67.Бычков В.Л., Грачев Л.П., Есаков И.И. Ионизационно-перегревная неустойчивость разрядной плазмы воздуха в СВЧ-поле //ЖТФ. 2007. Т.77. Вып.3. С.1-6.
- 68.Esakov I., Grachev L., Bychkov V., Van Wie D. Streamer Surface Microwave Discharge in Quasi-Optical Wave Beam //45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (8-11 January 2007, Reno, Nevada). AIAA 2007-0430.
- 69.Khodataev K., Esakov I., Grachev L. and Van Wie D. Microwave Discharge in Quasi-optical Wave Beam //45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (8-11 January 2007, Reno, Nevada). AIAA 2007-0433.
- 70.Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И. СВЧ-пробой воздуха, инициированный электромагнитным вибратором малой длины //ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып.12. С.26-30.
- 71.Бычков Д.В., Грачев Л.П., Есаков И.И. Инициированный СВЧ-разряд в сверхзвуковой струе воздуха, возбуждаемый глубоко подкритическим полем квазиоптического электромагнитного пучка //Сборник тезисов докладов XXXV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, 11-15 февраля 2008 г. С.312.
- 72.Esakov Igor I., Grachev Lev P., Khodataev Kirill V., Bychkov Vladimir L., and Van Wie David M. Surface Discharge in a Microwave Beam //IEEE TRANSACTION ON PLASMA SCIENCE. 2007. V.35. No.6. P.1658-1663.
- 73.Бычков В.Л., Есаков И.И., Ломтева А.Ю. Эффективная ионизация воздуха в околокритическом электрическом поле при высоких температурах //Химическая физика. 2008. Т. 27. №9. С.39-42.

- 74.Александров К.В., Бычков Д.В., Грачев Л.П., Есаков И.И. Порог развития ионизационно-перегревной неустойчивости в плазме безэлектродного СВЧ-разряда //ЖТФ. 2008. Т.78. Вып.7. С.35-39.
- 75.Alexandrov K., Esakov I., Grachev L., and Khodataev K. Experimental Study of Detonation in Propane-Air Mix Initiated by Pulse Microwave Discharge //46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 7-10 Jan. 2008. AIAA 2008-1406.
- 76.Esakov I., Grachev L., Khodataev K., Vinigradov V. and Van Wie D. Deeply Subcritical MW Discharge in the Submerged Stream of Propane-Air Mixture //46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 7-10 Jan. 2008. AIAA 2008-1403.
- 77.Bychkov V., Esakov I., Grachev L., and Khodataev K. A Microwave Discharge Initiated by Loop-Shaped Electromagnetic Vibrator on a Surface of Radio-Transparent Plate in Airflow //46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 7-10 Jan. 2008. AIAA 2008-1407.
- 78.Bychkov Vladimir L., Esakov Igor I., Gracev Lev P., Ravaev Alexander A., Khodataev Kirill V., Yurchenko Nina F. Initiated Surface MW discharge in Experimental Investigations of a New Boundary-Layer Control Method //VI Int.Symp “Thermochemical Processes in Plasma Aerodynamics, May 12-14, 2008, St-Petersburg. P.27-29.
- 79.Юрченко Н., Парамонов Ю., Жданов А., Виноградский П., Павловский Р., Есаков И., Ходатаев К., Раваев А., Грачев Л., Александров К. Аэродинамический комплекс для междисциплинарных исследований// Материалы Восьмой международной школа-семинар «Модели и методы аэродинамики», Евпатория, 4-13 июня 2008, С.159-160.
- 80.Alexandrov K.V., Bychkov V.L., Gracev L.P., Esakov Igor I., Khodataev Kirill V., Alexander A.Ravaev, Matveev I.B. Subcritical Streamer Microwave Discharge in Reverse Vortex Combustion Chamber //4th International Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPAС), 16-19 September 2008, Best Western Falls Church Inn, Virginia, USA. P.22-25.

- 81.Макаров Б.А., Есаков И.И. Инновационные технологии МРТИ РАН для медицины и промышленности на основе мощных электро- и радиофизических устройств //Материалы VII отраслевой научно-технической конференции «Инновационные технологии радиоэлектронного комплекса – регионам России», 23-25 сентября, 2008, Санкт-Петербург. С.158-165.
- 82.Бычков Д.В., Грачев Л.П., Есаков И.И. Возбуждаемый полем квазиоптического электромагнитного пучка глубоко подкритический СВЧ-разряд в сверхзвуковой струе воздуха //ЖТФ. 2009. Т.79. Вып.3. С.39-45.
- 83.Bychkov Dmitry V., Esakov Igor I., Grachev Lev P., Khodataev Kirill V., Van Wie D.M. Electrical discharge in deeply subcritical field of MW beam in a high-speed air stream and in propane-air mixture //47th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Orlando, USA, 7-10 Jan. 2009. AIAA Paper 2009-1551.
- 84.Alexandrov Konstantin V., Alfeev Eugeny B., Grachev Lev P., Esakov Igor I., Khomenko Alexei I., Khodataev Kirill V., Vinogradov Vyacheslav A. Experimental investigation of a surface discharge in focused beam of microwave radiation at wavelength of 2.5 cm and 8.9 cm //47th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Orlando, USA, Jan. 2009. AIAA Paper 2009-0845.
- 85.Esakov Igor I., Gracev Lev P., Ravaev Alexander A., Khodataev Kirill V., Yurchenko Nina F., Vinogradskyy P., Zhdanov A. Initiated Surface MW Discharge as an Efficient Active Boundary-Layer Control Method //47th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Orlando, USA, Jan. 2009. AIAA Paper 2009-0889.
- 86.Dvinin S., Bychkov V., Esakov I. DC Discharge Description with Nonlinear Reaction-Diffusion Equation in Air Mixture //47th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Orlando, U.S.A, Jan. 2009. AIAA Paper 2009-1228.
- 87.Bychkov V.L., Chernikov V.A., Esakov Igor I., Ershov Aleksei P., Kostiuk Andrey A., Il'chenko Daniil S. Corona Discharge over a Surface of a Liquid //47th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Orlando, U.S.A, Jan. 2009. AIAA Paper 2009-1554.

88. Yurchenko N., Paramonov Yu., Vynogradsky P., Pavlovsky R., Zhdanov A., Esakov I., Ravaev A. Control of Flow Characteristics using localized plasma Discharges //47th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Orlando, USA, Jan. 2009. AIAA Paper 2009-1227.
89. Виноградов В.А., Ходатаев К.В., Есаков И.И., Грачев Л.П. Способ и устройство для инициации СВЧ-разряда и генерации низкотемпературной струи плазмы //Патент на изобретение №2346418. Бюл.№ 4. 10.02.2009.
90. Бычков Д.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Раваев А.А., Северинов Л.Г. Электрический разряд в глубоко подкритическом поле СВЧ-пучка в высокоскоростной струе воздуха и его смеси с пропаном //ЖТФ. 2009. Т.79, Вып.9. С.33-40.