

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 2010

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

Научный консультант:

Ходатаев Кирилл Викторович -доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты:

Битюрин Валентин Анатольевич -доктор физико-математических наук,
профессор

Гильденбург Владимир Борисович -доктор физико-математических наук,
профессор

Шибков Валерий Михайлович -доктор физико-математических наук,
профессор

Ведущая организация: -Институт общей физики
им.А.М.Прохорова РАН

Защита состоится « 17 » марта 2011 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 _____ 2011

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.501.001.66,
кандидат физико-математических наук

Карташов И.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1. Предмет исследований, обзор литературы

Успехи в создании генераторов мощного СВЧ излучения и развитие средств радиолокации в сороковых годах 20-го века породили новое научное направление - физику газового разряда в электромагнитном поле СВЧ диапазона. Исследования были связаны с проблемой прочности волноводных трактов и созданием коммутирующих элементов в антенных переключателях. В связи с развитием космической техники проводились исследования электрической прочности антенных систем высоколетающих аппаратов.

В начале второй половины прошлого столетия была сформулирована идея, связанная с дальней передачей энергии с помощью мощного СВЧ излучения. К исследованиям в рамках специальной программы научных исследований был привлечен ряд организаций. Важное место в этой программе занимали исследования газоразрядных явлений в мощном потоке СВЧ излучения и, в частности, разряд в фокусе СВЧ излучения, названный впоследствии свободным.

По-видимому, впервые свободный безэлектродный разряд в фокусе СВЧ излучения, удаленный от излучателя и каких-либо других элементов конструкции, был получен в 1959 году в СССР при исследовании проблемы газоразрядной безопасности бортовых антенн высоколетающих объектов [1, 2]. Фотография этого разряда, полученного в фокусе СВЧ излучения, приведена на **Рис.1**. Фокусировка излучения осуществлялась с помощью диэлектрической линзы (на фотографии- слева).

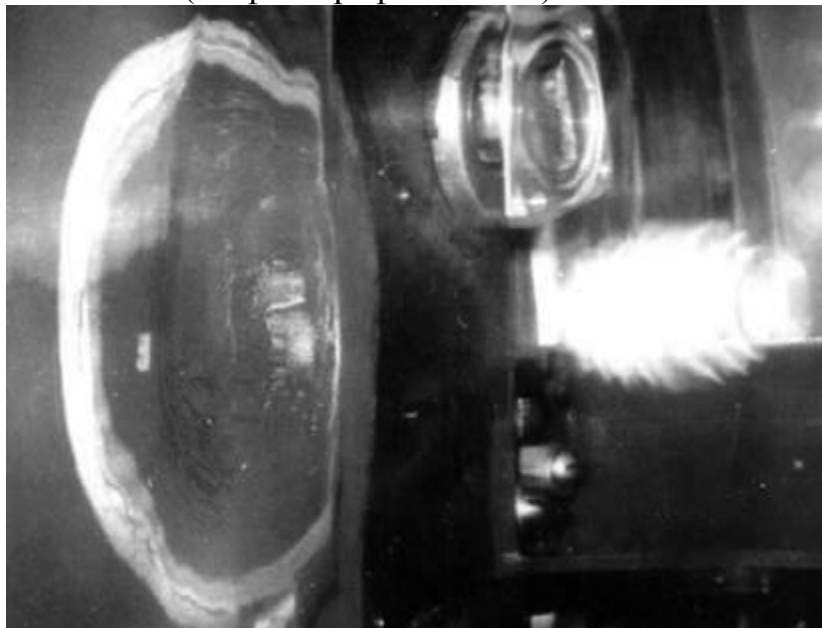


Рис.1. Фотография свободно локализованного разряда в фокусе СВЧ излучения, длина волны $\lambda=3\text{см}$, давление воздуха - 3 Torr

Схема реализации свободного безэлектродного СВЧ разряда, примененная в этом эксперименте, показана на **Рис.2**. Она стала типичной во

всех последующих исследованиях. Вместо линзы применялись также и вогнутые металлические зеркала.

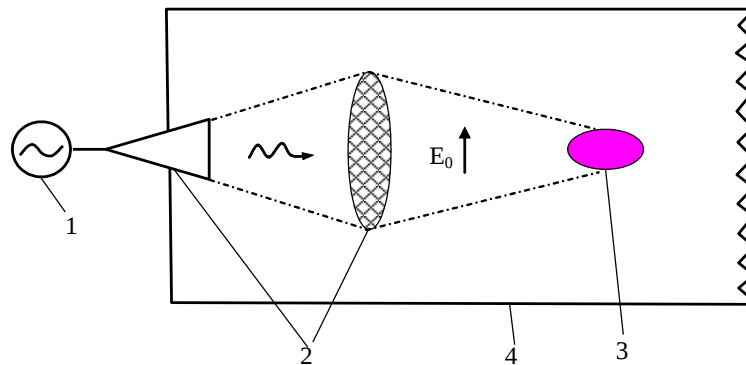


Рис.2. Схема реализации свободно локализованного СВЧ разряда: 1 - СВЧ генератор, 2 - элементы формирования сфокусированного излучения, 3- разряд, 4 - вакуумная камера

Электромагнитные колебания, создаваемые генератором 1, с помощью антенной системы 2 излучаются в виде сходящегося квазиоптического пучка с образованием фокуса 3. Термин «квазиоптический пучок» подразумевает, что в направлениях, поперечных вектору распространения ЭМ поля, он имеет характерный размер в несколько полуволн. В безэховой камере 4, откачиваемой до заданного давления, в фокусе, где амплитуда электрического поля максимальна, возникает разряд.

Несколько позднее в 1962 году независимо был получен разряд в фокусе излучения на длине волны 3 см в аргоне при мощности генератора 2 kW [3].

В число основных организаций, привлеченных к исследованиям разряда в потоке мощного СВЧ излучения, входили НИИ Радиоприборостроения (г.Москва), ФГУП «МРТИ РАН» (г.Москва), ИОФ РАН (г.Москва), ИПФ РАН (Нижний Новгород), МГУ им. М.В.Ломоносова, МГТУ им. Н.Э.Баумана (г.Москва), ОИВТ РАН (г.Москва), ФТИ им. А.Ф.Иоффе (Санкт-Петербург). В этих институтах были созданы специализированные установки, среди которых особо можно отметить уникальную по своим параметрам многофункциональную установку ДОР-2 [4], на которой были получены важные данные о свободных разрядах в фокусе излучения с длиной волны 4.3 см.

К началу 90-х годов был накоплен большой массив наблюдательных и теоретических данных о свободном разряде в СВЧ волновых полях в диапазоне длин волн $0.8 \div 10$ см, давления $0,1 \div 760$ Торг, длительности импульса излучения $1 \div 800$ μ s, и плотности потока энергии в фокусе $10^1 \div 10^5$ W/cm². Результаты исследований нашли отражение в обзорных работах, монографиях и сборниках [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Полученные сведения коротко можно свести к следующему.

Для разных длин волн сантиметрового диапазона получены зависимости пробойного уровня поля от давления, длительности импульса,

при программированном воздействии и пр.[13]. Полученные данные не противоречат данным, приведенным в работе [14].

Определена зависимость скоростей реакций ионизации электронным ударом и других важных констант в СВЧ поле от параметра E/p [15, 16], где E - амплитуда колебаний электрического поля, p - давление газа (преимущественно воздуха) при комнатной температуре.

Вид разряда сильно меняется в зависимости от давления газа и длительности импульса. С ростом давления разряд при длительности импульса короче 100 μ s меняется от диффузного в виде почти однородных плазмоедов, возникающих в максимумах поля в районе фокуса, к многоплазмоедному [17] и далее к многонитевому [18, 19]. Граничные значения давления, разделяющие типы разрядов, тем выше, чем короче длина волны, и зависят от сорта газа.

Названные типы разрядов проявляются в различных газах, что свидетельствует об универсальности механизмов развития разряда.

Происхождение филаментации диффузионного разряда связывается с механизмом ионизационно-перегревной неустойчивости, теория которой [20] модернизирована применительно к однородной плазме в однородном волновом поле [21, 22, 23, 24, 25, 26, 19, 27, 28, 29, 30, 31]. В слабостолкновительной плазме ($v/\omega < 1$, малые давления) взаимодействие с полем, определяемое рефракцией, приводит к образованию характерных чашеобразных плазмоедных структур, наблюдаемых в экспериментах на всех используемых длинах волн [32].

Стримерный разряд способен распространяться в поле, уровень которого много меньше пробойного (критического) значения и может быть инициирован созданием локального увеличения поля на остриях металлических предметов, в качестве которых использовалась т.н. "метелка" [33, 34], снижением плотности газа с помощью искрового разряда (электродного или лазерного [35]) или за счет возбуждения молекул газа.

Развитие импульсного стримерного разряда сопровождается его распространением в основном в сторону источника излучения со скоростью несколько километров в секунду [27, 36].

Оценки и частные измерения указали на высокую температуру газа в каналах инициированного разряда вплоть до нескольких тысяч Кельвин при радиусе большем или порядка 0.01 см. Ионизация в них может достигать величины порядка 1% [37,34].

Стримерные каналы окружены плазменным ореолом, происхождение которого предположительно объясняется либо линейчатым, либо тормозным ультрафиолетовым излучением [38, 39].

В случае линейной поляризации поля филаментарный и стримерный типы разрядов развиваются преимущественно в плоскости, перпендикулярной вектору магнитного поля. При круговой поляризации такой асимметрии не наблюдается [28].

Нагрев продуктов развитого стримерного разряда последующим излучением малого (сильно подкритического) уровня большой длительности

приводит к общему нагреву всей фокусной области, занятой разрядом, так что разряд переходит в форму однородного плазмоида, названного свободно локализованным равновесным СВЧ разрядом [40, 41, 42]. Скорость распространения такого разряда мала и определяется мощностью нагрева и теплопроводностью [43]. Результаты экспериментальных исследований физических механизмов распространения СВЧ разрядов как в волноводах так и в пучке излучения обобщены в [44].

Наблюдаемые пространственные формы каналов подкритического стримерного разряда навели на мысль об аналогии с антенными системами [45, 46, 47, 48, 49]. Классификация форм СВЧ импульсного разряда была дополнена подкритическим типом разрядов с приближенным определением области его существования для излучения с длиной волны 4.3 см [50].

Полуаналитические модели и неполное численное моделирование начальной стадии развития разряда высокого давления свидетельствуют в пользу высказанного предположения о стримерной природе его распространения [51, 46].

Распространение внешних (по отношению к разряду) ударных волн в продуктах импульсного подкритического стримерного разряда сопровождается их сильной деструкцией.

СВЧ разряды способны оказывать существенное влияние на физико-химические процессы в газовых смесях, в частности, на процессы горения [52].

Проведенные исследования дали основание для формулирования ряда предложений по использованию СВЧ разрядов, опирающихся на возможность их дальнего воздействия [5].

Дальнейшее развитие физики СВЧ разрядов в значительной мере происходило в рамках сформировавшегося направления плазменной аэродинамики. В работу в формирующемся направлении исследований постепенно подключились научные организации США, Великобритании, Франции и других стран [53].

Технология стримерных разрядов в проблемах плазменной аэродинамики могут сыграть исключительно важную роль, поскольку импульсные стримерные СВЧ разряды сопровождаются газодинамическими процессами, тем более мощными, чем выше давление [54, 55, 56].

Формулирование задач аэрокосмических приложений стимулировало проведение целенаправленных исследований физики СВЧ разрядов, их свойств в условиях, типичных для приложений.

Работы, обобщенные в диссертации, выполнялись в русле этого направления. Результаты исследований, включенные в диссертацию, отражены в публикациях, список которых приведен в разделе **Список публикаций соискателя по теме диссертации**.

2. Цели исследований

Целью исследований являлось изучение свойств СВЧ разрядов с позиций возможности их применения в решении прикладных проблем.

Помимо имевшихся к началу работ большого объема экспериментальных и теоретических данных потребовались дополнительные исследования.

Особенно это касалось высоких газовых давлений, поскольку этот диапазон диктовался условиями ряда возможных актуальных приложений. Прежде всего, потребовалась реализация СВЧ разряда в квазиоптическом ЭМ пучке в различных исходных условиях и определение энергетической эффективности взаимодействия разрядной плазмы с возбуждающим её ЭМ полем, поскольку этот параметр в значительной мере определяет практическую ценность СВЧ разряда, а, следовательно, необходимость подробного исследования его свойств в зависимости от длины волны излучения в различных условиях (в скоростных потоках реального воздуха и горючих смесей, в струях при инжекции, в объеме и на поверхности), а также выявление определяющих физических механизмов, ответственных за формирование структуры разряда и его свойств, знание которых необходимо для построения адекватных теоретических моделей СВЧ разрядов, обладающих сложной структурой.

3. Положения, выносимые на защиту

1. **Результаты исследований импульсного разряда в надкритическом СВЧ поле на $\lambda = 8.9$ см.** Показано, что развитие надкритического импульсного СВЧ разряда на $\lambda = 8.9$ см в диапазоне $v/\omega = 1 \div 100$ начинается с быстрого распространения диффузной формы с заполнением области надкритического поля с последующим формированием нитевидной структуры. В диапазоне $1 < v/\omega < 50$, наблюдения полностью коррелируют с наблюдениями на более коротких λ при тех же значениях v/ω .
2. **Результаты исследования физического явления: самосжатия СВЧ тока в резонансном стримерном канале магнитным давлением (СВЧ пинч-эффект) и крупномасштабных МГД неустойчивостей плазменного канала.** Впервые наблюдался СВЧ пинч-эффект при разряде в открытом высокочастотном резонаторе при высоком давлении на $\lambda = 8.9$ см и $\lambda = 4.3$ см. Развитие разряда в этом случае начинается ростом вытянутого вдоль E канала, развивающегося со скоростью, до 100 km/s, в полном соответствии с представлением о стримерном механизме развития разряда высокого давления в надкритическом поле. Стример достигает резонансной длины, и почти полностью опустошает резонатор. Темп опустошения резонатора, свидетельствует о резонансном характере взаимодействия разряда с полем. При уровне поля в резонаторе, превышающем критическое, и давлении газа превышающем пороговое значение, развитие разряда сопровождается образованием перетяжки (одной или более). При давлении водорода выше 5 атмосфер наблюдается развитие змейковой моды возмущения, не приводящей к развалу токового канала. Развитие наблюдаемых неустойчивостей качественно и количественно объясняется проявлением самосжатия токового СВЧ

канала усредненным магнитным полем тока, наведенного в стримере при достижении электродинамического резонанса.

3. **Результаты исследования методов калиброванной инициации разряда в подкритическом и глубоко подкритическом поле СВЧ волны.** Предложен и разработан метод калиброванной инициации разряда пассивным прямолинейным (или кольцевым) ЭМ вибратором или системой ЭМ вибраторов и на его основе создан простой метод измерения абсолютного значения напряженности СВЧ поля с помощью калиброванного вибратора (проще всего, металлического шарика малого размера), облучаемого УФ, помещаемого в точку измерения.
4. **Результаты исследования пространственной структуры, динамики развития и основных свойств СВЧ разряда стримерного типа в подкритическом поле квазиоптического ЭМ пучка на длинах волн 8.9 см и 2.4 см.** Определены границы существования иницированного стримерного разряда в подкритическом поле квазиоптического электромагнитного пучка на $\lambda = 8.9$ см и 2.4 см и переходной зоны от диффузного к стримерному типу. Положение середины этой зоны оценивается соотношением $p_{\text{dif}} \cdot \lambda \approx 250$ Торр·см. Полученные данные относительно границ существования подкритического стримерного разряда для разных длин волн согласуется с результатами теоретической оценки, основанной на ограниченности способности стримера создавать необходимую надкритичность поля на его голове.
5. **Результаты исследования разряда, иницированного в глубоко подкритическом поле.** Глубоко подкритический разряд выделен в отдельный тип разряда. Исследована эффективность взаимодействия прямолинейного резонансного вибратора, нагруженного глубоко подкритическим разрядом, с СВЧ полем. Определено сечение поглощения системы вибратор - глубоко подкритический разряд в свободном пространстве и присутствии рефлектора. Показана и частично исследована способность глубоко подкритического разряда, иницированного прямолинейным резонансным вибратором, выполненным в виде инжектора топливной смеси, иницировать и поддерживать горение смеси массовым коэффициентом избытка топлива, большим 0.2. Исследованы свойства глубоко подкритического разряда, иницированного кольцевым резонансным вибратором. Показано, что такой разряд способен квазистационарно существовать в потоке воздуха атмосферного давления, создавая зону энерговыведения размером около 0.1 см, поднимая температуру в следе в приповерхностном слое.
6. **Результаты исследования СВЧ подкритических разрядов, иницированных на поверхности диэлектрика.** Порог пробоя на поверхности диэлектрика с инициатором или без него совпадает с порогом пробоя в отсутствие диэлектрика. Область существования поверхностного разряда совпадает с областью существования объемного подкритического стримерного разряда. Свойства стримерных каналов поверхностного разряда идентичны при прочих равных условиях

свойствам каналов объемного стримерного разряда. Структура стримерной сети поверхностных разрядов в отличие от структуры объемных разрядов характеризуется образованием ячеек с размерами $\lambda/4$ вдоль вектора E и $\lambda/8$ поперек вектора E . При малой подкритичности и угле падения излучения на поверхность с инициатором большим нуля, наблюдается одновременное развитие поверхностного и объемного разрядов. Свойства поверхностного подкритического стримерного разряда не зависят от материала и толщины диэлектрика, что свидетельствует о несущественности влияния физико-химических процессов на развитие разряда по поверхности диэлектрика.

7. **Результаты исследований по контролю газодинамических потоков с помощью СВЧ разрядной технологии.** Экспериментально показана возможность снижения лобового сопротивления тела в сверхзвуковом потоке за счет выделения СВЧ мощности перед головной УВ и в донной части, возможность создания боковой силы на профиле, обтекаемом скоростным потоком воздуха, за счет энерговыделения в поверхностном подкритическом разряде. Получена зависимость силы от выделяемой мощности. Экспериментально показано, что распространение УВ через область стримерного разряда после его завершения сопровождается ее деструкцией.
8. **Результаты исследований по инициации и стабилизации горения в скоростных потоках горючих смесей.** Экспериментально показана способность подкритического и глубоко подкритического разрядов инициировать и поддерживать горение в модельной горючей смеси при скорости потока смеси до 200 м/с.

4. Формальные основания представления диссертации

Актуальность проблемы

Известно, что одной из ключевых проблем сдерживающих развитие перспективных летательных аппаратов (ЛА) являются трудности, связанные проблемой организации высокоскоростного горения топливных смесей и проблемами управления полетом ЛА. Ведущие мировые исследовательские лаборатории прилагают большие усилия по поиску новых методов зажигания и стабилизации горения смеси в скоростном потоке и управления скоростными потоками. В международном научном сообществе с нарастающей активностью обсуждаются методы воздействия **плазмы газовых разрядов** на параметры горения в каналах силовых установок и течения вокруг ЛА. Большое место отводится обсуждению этой проблемы на самых авторитетных конференциях по аэронавтике и аэрокосмонавтике (в частности, на регулярных конференциях Американского Института Аэронавтики и Аэрокосмонавтики, AIAA, во Франции, ONERA, на Международной конференции European Conference for Aerospace Sciences, состоявшейся в Москве в 2005 г. под патронажем ONERA). Работы в этом направлении ведутся в США (AF, NASA), Франции (ONERA), Великобритании (British Aerospace, University of Liverpool, University of

Bristol) и во многих других научных центрах. Наиболее интенсивно работы ведутся в США (Boeing Inc., John Hopkins University, NASA Langley Research Base, NASA Dryden Flight Research Base, Princeton University, Old Dominion University, Wright-Patterson AF Base, State University of New Jersey, Northrop Grumman Corporation, Eagle Aeronautics Inc, Lockheed Martin Aeronautics, Air Force Research Laboratory, Rutgers University, Orbital Research Inc., Naval Research Laboratory, AF Space Command/XPY, Naval Surface Warfare Center, NASA Glenn Research Center, US AF Academy, AF Office of Scientific Research и др.)

Зарубежные исследователи в своих работах для создания газоразрядной плазмы обычно используют различные типы электрических разрядов. Это разряды постоянного тока в потоке, барьерные разряды (DBD), эрозионные разряды, микроволновые разряды и др.

В России также идут работы по изучению физических основ методов воздействия плазмы газовых разрядов на параметры горения в силовых установках. Они проводятся в ФГУП «МРТИ РАН», МГУ им. М. В. Ломоносова, Московский Физико-технический институт (г.Долгопрудный), ИВТАН, Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе (С-Петербург) и др. В них также обычно используются все вышеперечисленные типы электрических разрядов. Результаты исследований в данном направлении, известные к настоящему времени, указывают на то, что наибольшие перспективы применения имеют СВЧ разряды.

Научная новизна

В диссертационной работе систематически изложены результаты экспериментальных исследований СВЧ разряда в воздухе и ряде других газов в квазиоптическом пучке на длинах волн 8.9 см и 2.4 см и в открытом двухзеркальном резонаторе на длине волны 8.9 см и 4.3 см.

Впервые получен и исследован СВЧ пинч-эффект - удержание плазмы стримерного канала усредненным магнитным полем наведенного в нем СВЧ тока и магнитогидродинамические неустойчивости, свойственные токовому каналу в условиях магнитного самосжатия.

Показано, что подкритический стримерный СВЧ разряд и глубоко подкритический СВЧ разряд взаимодействует с возбуждающим его ЭМ полем с высокой эффективностью.

Показан резонансный характер взаимодействия подкритического стримерного разряда с полем как отдельных фрагментов его структуры, так структуры в целом. Выявлена принципиальная необходимость ветвления стримерных каналов для развития в волновом поле и причины распространения ему навстречу.

Исследованы свойства подкритического и глубоко подкритического разрядов в условиях, типичных для ряда приложений. Показана принципиальная возможность снижения лобового сопротивления тела в сверхзвуковом потоке с КПД, превышающем единицу, и создания боковой силы с помощью СВЧ разряда. Показана и исследована способность подкритических и глубоко подкритических СВЧ разрядов инициировать и

поддерживать горение в топливных смесях в различных вариантах инжекции в диапазоне коэффициента избытка топлива.

Практическая значимость

Практическая ценность выполненных исследований определяется выявленной высокой энергетической эффективностью взаимодействия стримерного подкритического и глубоко подкритического СВЧ разрядов с ЭМ полем квазиоптического ЭМ пучка, что явилось основанием для развертывания поисковых работ по их применению в ряде конкретных предложений по использованию этих видов СВЧ разряда в практических устройствах. В ходе этой проработки на существующих установках выполнен ряд экспериментов, показывающих на количественном уровне реальность этих предложений.

Данные типы разрядов могут быть использованы в плазменной газодинамике для управления характеристиками как дозвуковых, сверхзвуковых, так и гиперзвуковых 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.

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 полученного в эксперименте факта поджига бедной горючей смеси подкритическим стримерным разрядом сформулировано предложение по использованию этого разряда в поршневых двигателях внутреннего сгорания нового поколения.

На основании полученных экспериментальных данных ведутся исследования возможности использования СВЧ разряда в плазмотронах с вихревой подачей газа и по использованию СВЧ разряда в установках по газификации низкокалорийных углей и бытовых отходов.

Достоверность полученных результатов

Исследования проводились на нескольких установках с разными длинами волн в широком диапазоне значений параметров и при разных условиях. Сопоставление данных, полученных на разных установках с участием автора и установках других исследовательских групп, показали отсутствие противоречий. Результаты экспериментов многократно обсуждались с ведущими отечественными и зарубежными специалистами. Эксперименты проведены в постоянном сопоставлении с результатами численного моделирования, осуществляемого К.В.Ходатаевым. Работа поддерживается в течение ряда лет грантами ISTC и CRDF. Все это свидетельствует о достоверности полученных результатов.

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 Ionized 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 и 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting (January 2009, 2010, Orlando, Florida). Сборники трудов этих конференций опубликованы.

5. Личный вклад автора и публикации

К личному вкладу соискателя следует отнести следующее. (Соответствующие ссылки на публикации будут даны в основных главах диссертации.)

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 исследованы универсальные виды СВЧ разряда в квазиоптическом ЭМ пучке. В этих экспериментах в воздухе был реализован стримерный вид пространственно-развитого СВЧ разряда в надкритическом поле и в подкритическом поле на длине волны 8.9 см. 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 СВЧ разряда среднего давления путем зондирования его слабой ударной волной.

При непосредственном участии автора диссертации были экспериментально исследованы границы областей реализации различных видов СВЧ разряда в воздухе в квазиоптических ЭМ пучках при $\lambda=8.9$ см. Под руководством соискателя 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.

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 перетяжной 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 с использованием оборудования установки ДОР-2 с $\lambda=8.9$ см была создана установка И-8 и ее модификация ИР-8, на которых соискателем был проведен ряд оригинальных исследований СВЧ разряда в режиме бегущей квазиоптической ЭМ волны и в режиме стоячей волны в квазиоптическом двухзеркальном резонаторе соответственно. Под руководством и при непосредственном участии соискателя были созданы новые экспериментальные установки с $\lambda=2.5$ см (И-2) и $\lambda\approx 12.5$ см (СЗ-12 и ДЗ-12). При участии соискателя оборудование старой установки с $\lambda=4.3$ см [4] было восстановлено, и на его основе была создана установка ИР-4 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. 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.

В экспериментальных работах в течение многих лет основными соратниками были Л.П.Грачев, К.В.Александров, В.В.Федоров, Г.И.Мишин, М.П.Князев, Б.А.Шарай. Н.И.Грицов, М.Ю.Никитин, В.В.Цыпленков и др. Всем им автор приносит искреннюю благодарность.

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»), итоговых отчетах по Проектам МНТЦ и АФГИР (см. раздел **Список публикаций соискателя по теме диссертации**).

6. Структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, 9 глав, Заключения, списка литературы.

Во **Введении** дан обзор литературы, сформулирован предмет исследований и цели диссертации, изложены положения, выносимые на защиту, и формальные основания представления диссертации, отмечен личный вклад автора, кратко изложена структура диссертации.

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-8) и режим стоячей волны в высокочастотном квазиоптическом двухзеркальном резонаторе (ИР-8). Установки с $\lambda=2.5$ см (И-2) и $\lambda=12.3$ см (СЗ-12 и ДЗ-12) работают в режиме бегущей волны. Они оснащены устройствами для создания в рабочей части высокоскоростного потока воздуха или его горючей смеси с пропаном при скорости до 500 м/с. Квазиоптический ЭМ пучок во всех установках создается в герметичной рабочей камере, давление в которой можно менять от единиц Торр до атмосферного давления. Установка с $\lambda=4.3$ см (ИР-4) имела герметичную камеру высокого давления с радиопрозрачным окном. Это позволило провести экспериментальные исследования СВЧ разрядов с использованием высокочастотного квазиоптического СВЧ резонатора в воздухе, водороде и в дейтерии при избыточном давлении до 10 атм.

В **Главе 2** описываются эксперименты, в ходе которых были определены характерные виды безэлектродных СВЧ разрядов в воздухе в надкритическом поле квазиоптического ЭМ пучка на $\lambda=8.9$ см. Описывается динамика их пространственного развития при различных давлениях. Приводятся результаты измерения основных параметров плазмы этих разрядов, таких как электронная концентрация плазмы, газовая температура и т.д.

Результаты исследований феноменологии СВЧ импульсного разряда в надкритическом СВЧ поле на длине волны $\lambda=8.9$ см в диапазоне средних значений давления воздуха ($1 < \nu/\omega < 50$) полностью коррелируют с выполненными ранее наблюдениями на более коротких длинах волн.

Зондирование области разряда слабой ударной волной показало:

-в плазмоиде диффузного разряда малого давления плотность газа после разряда меняется мало, свидетельствуя о слабом энергетическом взаимодействии с излучением, проявляющемся, в основном, в рефракции;

-распространение ударной волны через область стримерного разряда после его завершения сопровождается ее полной деструкцией.

Глава 3 посвящена исследованию надкритического разряда высокого давления в открытом двухзеркальном резонаторе. Приведен расчет открытого двухзеркального сферического СВЧ резонатора, применяемого в эксперименте, метод настройки резонатора на нужную моду колебаний (**Рис.4**) и данные экспериментальной проверки результатов расчета.

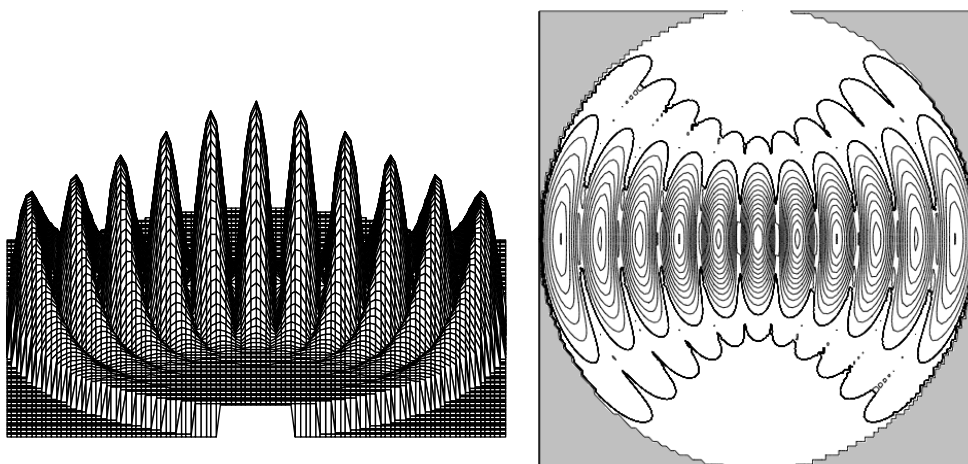


Рис.4. Пространственное распределение амплитуды электрического поля в двухзеркальном открытом резонаторе, $q=11$. а) – поверхность $E(r, 0, z)$, б) – линии равного уровня

Описываются экспериментально реализованные в открытом резонаторе безэлектродные импульсные надкритические разряды и их основные свойства в воздухе, водороде и дейтерии при высоких давлениях в фокусной области высокочастотного резонатора.

Исследования показали, что малая частота появления свободных электронов в газе, обусловленная естественным фоном, приводит к возможности реализации пробоя при амплитуде электрического поля, существенно большей критического значения. Получена зависимость предельной величины пробойного поля от максимального поля в резонаторе в отсутствие пробоя и длительности фронта импульса накачки при известном критическом значении поля. Чем выше давление, тем меньше частота появления свободных электронов.

Развитие разряда в резонаторе начинается с единичного электрона с образованием вытянутого вдоль поля канала, концы которого развиваются со скоростью, нарастающей от 10 до 100 km/s, в полном соответствии с

представлением о стримерном механизме развития разряда высокого давления в надкритическом поле. Стример достигает длины, близкой к резонансной, и почти полностью опустошает резонансный накопитель. Темп, в котором происходит опустошение накопителя, свидетельствует о резонансном характере взаимодействия стримерного разряда с полем.

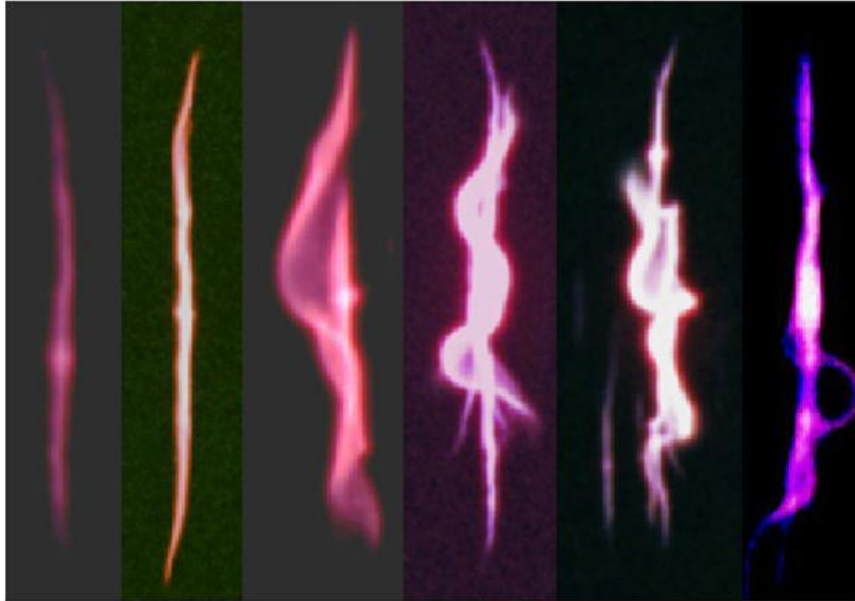


Рис.5. Фотографии открытым объективом разряда в водороде при начальном давлении 1,2,3,5,6 и 8 atm (слева направо). Размер яркой части стримера $\sim \lambda/3 = 1.3$ см

При давлении водорода в резонаторе в несколько атмосфер и поле, превышающем пороговое значение, развитие разряда сопровождается образованием перетяжки в центральной области (одной или более) со следами повышенного энергосвечения в ней. При давлении водорода выше 5 atm наблюдается развитие змейковой моды возмущения большой амплитуды, не приводящее к развалу токового канала.

На **Рис.5** приведена серия фотографий стримерного разряда в резонаторе с $\lambda = 4.3$ см при значениях начального давления от 1 до 8 atm. Видно, что при начальном давлении, меньшем 3 atm, успевает развиваться перетяжечная мода.

Однако, при начальном давлении 3 atm и выше происходит мощное развитие изгибной моды $m=1$. Она развивается на фоне состоявшейся уже перетяжечной неустойчивости. Ее пространственный период Λ уменьшается с ростом начального давления приблизительно обратно пропорционально (см. **Рис.6**).

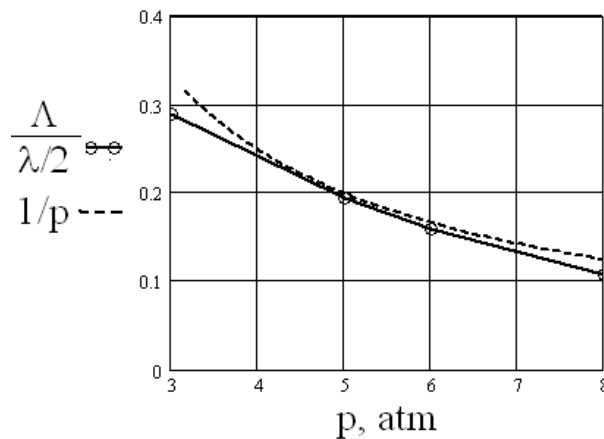


Рис.6. Зависимость периода изгибной неустойчивости от начального давления (водород, $\lambda=4.3$ см). Сплошная линия с точками - эксперимент

Результаты проведенных измерений радиуса стримерных разрядов в зависимости от p воздуха или водорода в диапазоне (70÷760) Torr можно приближенно аппроксимировать зависимостью

$$a \approx \frac{0.015}{P_{[atm]}}, \text{ см} \quad (1)$$

Отсюда следует, что величина $ka=2\pi a/\lambda$, от которой зависит инкремент неустойчивостей, слабо зависит от давления и по оценке равна ~ 0.25 .

При большом начальном давлении параметры плазмы в канале достигают экстремально высоких значений на время сжатия порядка 3 ps.

Развитие наблюдаемых неустойчивостей качественно и количественно объясняется проявлением самосжатия токового СВЧ канала усредненным магнитным полем тока, наведенного в стримере при достижении электродинамического резонанса. Данные наблюдений сопоставляются с результатами расчетов и численного моделирования [57]. Параметры плазмы в токовом канале резко возрастают с увеличением давления газа. Пинч-эффект в безэлектродном СВЧ стримерном разряде получен впервые.

В Главе 4 приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования способов пассивной инициации подкритических разрядов. На примере использования малого, по сравнению с длиной волны, металлического инициатора предложен и исследован метод локального измерения электрической составляющей ЭМ поля E_0 в квазиоптическом СВЧ пучке. Исследованы поправки, связанные с учетом диффузионных потерь электронов на инициатор. Это дает возможность проводить абсолютные измерения величины внешнего поля с использованием инициатора малых размеров. В общем случае выражение (2) определяет величину электрического поля в месте расположения инициатора

$$\frac{l_a(p)}{a} = \frac{\left[\left(\Phi \frac{E}{E_{cr}(p)} \right)^\beta - 1 \right]^{3/2}}{7.2\beta \left(\Phi \frac{E}{E_{cr}(p)} \right)^\beta} \quad (2)$$

где Φ - коэффициент увеличения поля инициатором, a - минимальный радиус кривизны инициатора, l_a - диффузионная длина прилипания, $\beta \approx 5.34$. Для металлической сферы $\Phi=3$. Сопоставление зависимости (2) с измерениями приведено на **Рис.7**

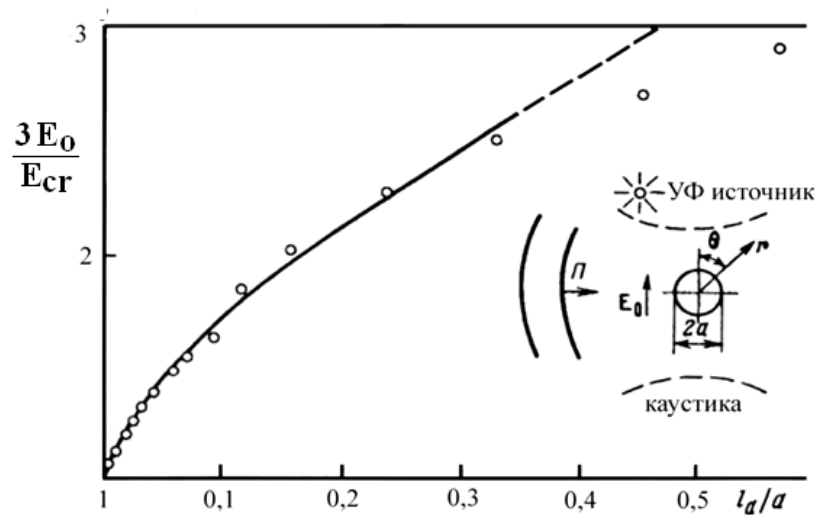


Рис.7. Зависимость величины пробойного поля E_0 от отношения диффузионной длины прилипания электронов l_a к радиусу шара a (здесь $\chi=E_0/E_{cr}$)

Для повышения вероятности пробоя инициатор облучался УФ излучением искрового источника для обеспечения фотоэмиссии электронов с его поверхности. В этих условиях диффузионная длина прилипания определяется коэффициентом амбиполярной диффузии. Эксперимент показал хорошее соответствие результатов измерений с теорией.

Резонансные инициаторы, прямолинейные или кольцевые, позволяют инициировать разряд не только в подкритическом, но и в глубоко подкритическом поле. На **Рис.8** приведена схема реализации разряда, инициированного кольцевым вибратором в ЭМ волне с $\lambda \approx 12.5$ см, и фотографии его внешнего вида в воздухе атмосферного давления при скорости потока воздуха над поверхностью 0, 15 и 25 м/с (сверху вниз). На них СВЧ излучение поступает сверху, и его вектор E_0 параллелен скорости потока.

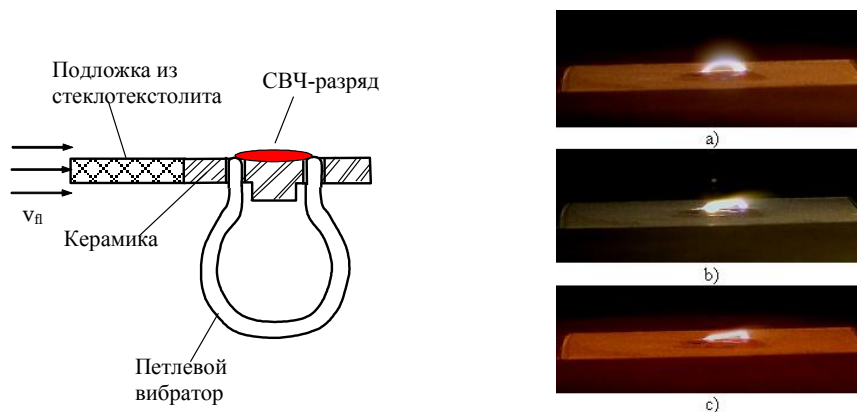


Рис.8. Поверхностный глубоко подкритический СВЧ разряд, инициированный резонансным кольцевым ЭМ вибратором

По результатам измерений получены оценочные соотношения для увеличения поля на вершине как резонансных, так и дорезонансных инициаторов.

В Главе 5 приведены результаты исследования подкритического импульсного разряда при длине волны излучения 8.9 см и 2.5 см. По результатам исследования описывается динамика развития разряда от диффузной стадии к стримерной развитой структуре в зависимости от давления. Отмечаются и обсуждаются особенности структурообразования разряда в воздухе и других газах. Исследуются свойства стримерного подкритического разряда в скоростном потоке газовых смесей. Показывается стримерный механизм роста формирующих их плазменных каналов и определяется скорость их роста. Высокое ее значение демонстрируется 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.

На начальной стадии инициации подкритического разряда в зоне надкритического поля около головки инициатора идет интенсивная ионизация до уровня, при котором амплитуда поля в этой зоне снижается до критического значения. Проводимость плазмы разряда на этом этапе поднимается до уровня порядка $\omega/4\pi$. Дальнейшее развитие происходит с участием тепловых процессов, следствием которых является появление одного или нескольких выделенных каналов в зависимости от уровня начальной надкритичности поля у инициатора. Радиус формирующихся каналов сохраняется при последующем формировании стримеров на уровне диффузионной длины прилипания.

Падение концентрации газа в формирующихся каналах в результате омического нагрева приводит к росту проводимости в канале стримера до значений, соответствующих равенству скин-слоя и радиуса канала. Следствием является рост поля в голове канала до надкритического значения, обеспечивающего дальнейшее развитие стримера.

Развитие стримеров до длины, превышающей полудлину волны СВЧ излучения, происходит исключительно путем ветвления с формированием

системы каналов, обладающей резонансными свойствами на каждом этапе развития.

Подкритический стримерный разряд, в отличие от надкритического, распространяется со скоростью, определяемой темпом нагрева каналов, происходящим в основном в голове развивающихся стримеров. Измеренные значения скорости распространения удовлетворительно согласуются с оценочным соотношением (3) (см. **Рис.9**)

$$V_s = 2 \frac{E_{cr}^2}{C_p p} \cdot \frac{L}{2\lambda\Lambda} \cdot \frac{c}{\ln\left(\frac{E_{cr}}{E_0}\right)}, \quad \Lambda \equiv \ln\left(\frac{LV_s}{8D_e}\right) \quad (3)$$

Поскольку скорость развития стримеров составляет несколько километров в секунду, они могут развиваться и сверхзвуковым потоке, который не препятствует их инициации. Вид разряда в потоке не претерпевает заметных изменений, что видно на **Рис10**.

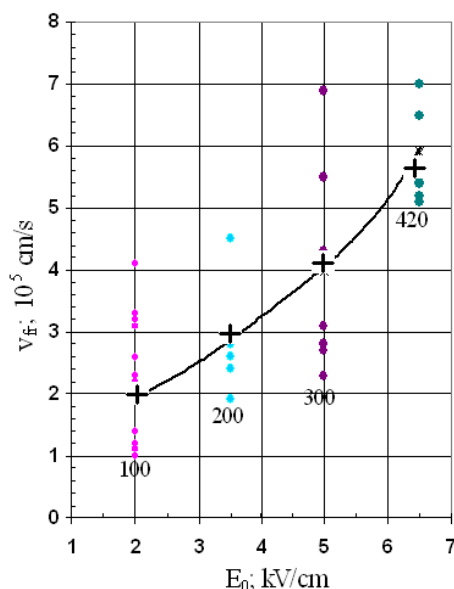


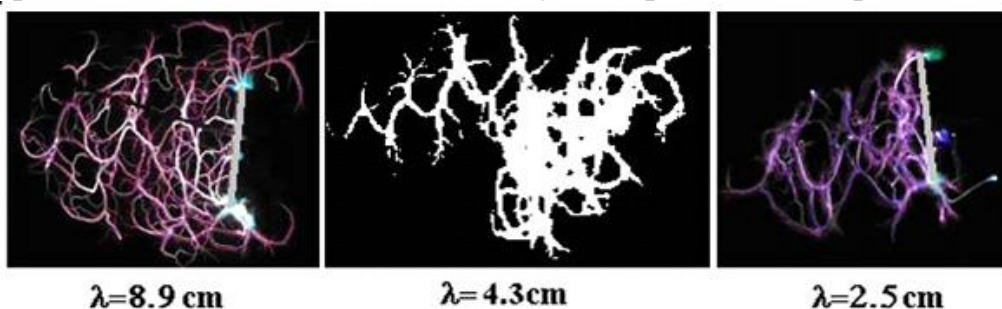
Рис.9. Зависимость скорости распространения фронта СВЧ разряда от уровня поля E_0 в диапазоне давлений от 100 до 400 Torr и $3E_0=E_{cr}$. Прямые кресты - среднее по измерениям, сплошная линия - зависимость (3)

Отмеченные свойства подкритических разрядов, исследованные в основном в воздухе, проявляются и в других газах.



Рис.10. Вид разряда в потоке при давлении в камере 100 Torr и $E_0=5.5$ kV/см. Сверхзвуковой поток направлен снизу вверх. $\lambda=8.9$ см

Подкритический стримерный разряд, как и любая другая нелинейная диссипативная открытая система с протоком энергии, обладает свойством самоорганизации, то есть, формирования распределенной системы с параметрами, обеспечивающими максимум потребления энергии.



$\lambda=8.9$ см

$\lambda=4.3$ см

$\lambda=2.5$ см

Рис.11. Образование змееобразной структуры с ветвями в подкритическом разряде (фотография разряда при $\lambda=4.3$ см заимствована из [50])

На Рис.11 и Рис.12 показаны типичные элементы структурных образований подкритического разряда.

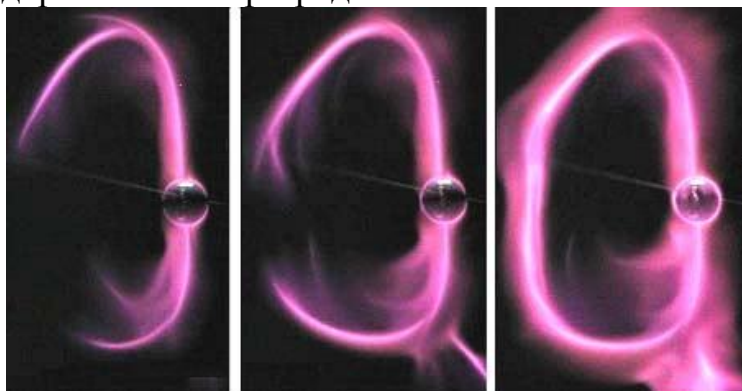


Рис.12. Фотографии стримерного разряда, инициированного металлической сферой с радиусом 0.5 см, при длительности импульса (a) - 15, (b) - 20, (c) - 35 μ s, $E=1.0 \cdot E_{br}$. Излучение направлено слева направо. $\lambda=8.9$ см, $p=200$ Torr

Полученные экспериментальные данные о подкритических стримерных разрядах послужили основой для разработки теоретических моделей инициации и развития развитых стримерных структур в подкритическом поле, качественно и количественно раскрывающих их основные свойства [58, 59, 60, 61].

В **Главе 6** описываются результаты экспериментальных и теоретических исследований инициированных глубоко подкритических СВЧ разрядов в скоростном потоке воздуха и воздушно-пропановой смеси при длине волны излучения $\lambda \approx 12$ см (**Рис.13**).

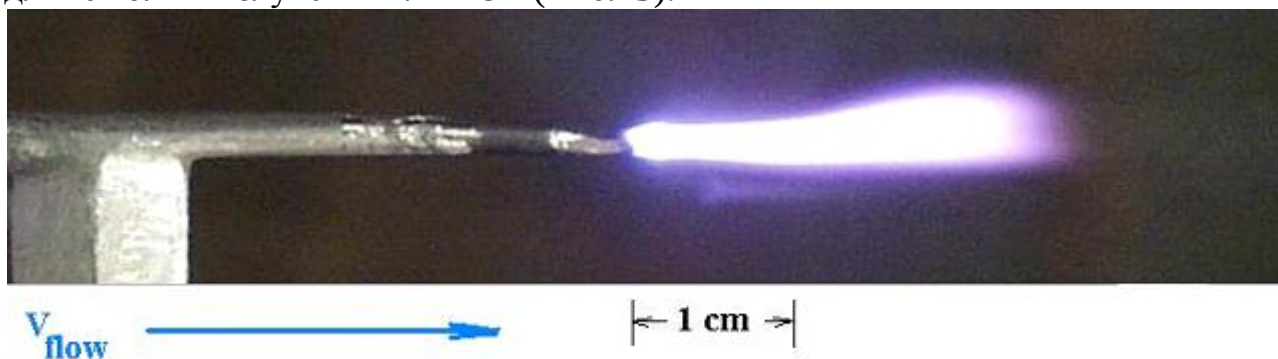


Рис.13. Глубоко подкритический стримерный СВЧ разряд непрерывного действия, инициированный вибратором в сверхзвуковой струе воздуха. $p=97$ Torr, $M=2$

Инициированный глубоко подкритический разряд выделен в самостоятельный тип разряда как представляющий особый интерес с точки зрения приложений. Исследована эффективность взаимодействия прямолинейного резонансного вибратора, нагруженного глубоко подкритическим разрядом, с СВЧ полем. Показывается энергетическая эффективность взаимодействия плазмы инициированного линейным ЭМ вибратором разряда такого вида с ЭМ полем.

Эксперименты по зажиганию такого разряда в скоростном потоке воздуха позволили оценить эффективное сечение его энергетического взаимодействия с ЭМ полем. Определена площадь сечения поглощения системы вибратор - глубоко подкритический разряд в присутствии рефлектора, равная $0.2 \cdot \lambda^2$ и превышающая сечение вибратора, оптимально нагруженного присоединенным разрядом в свободном пространстве, равная $0.15 \cdot \lambda^2$ [62]. На **Рис.14** помещена фотография глубоко подкритического СВЧ разряда в воздухе при $p = 27$ Torr 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 m/s. ЭМ волна поступает на инициатор сверху, ее вектор E_0 – горизонтален.

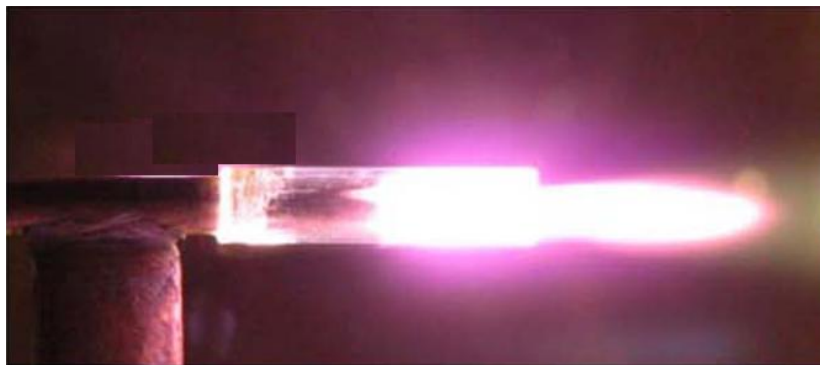


Рис.14. Инициированный глубоко подкритический СВЧ разряд в высокоскоростной струе воздуха, выдуваемой через внутренний канал трубчатого инициатора с насадкой из кварцевого стекла

Показана и частично исследована способность глубоко подкритического разряда, инициированного прямолинейным резонансным вибратором, выполненным в виде инжектора топливной смеси, инициировать и поддерживать горение смеси с массовым коэффициентом избытка топлива, большим или равным 0.24. На **Рис.15** помещена фотография, демонстрирующая поджиг и горение воздушно-пропановой струи, инжектированной через трубчатый инициатор. Рядом с ней дана осциллограмма с термопарного датчика, измеряющего температуру торможения потока.

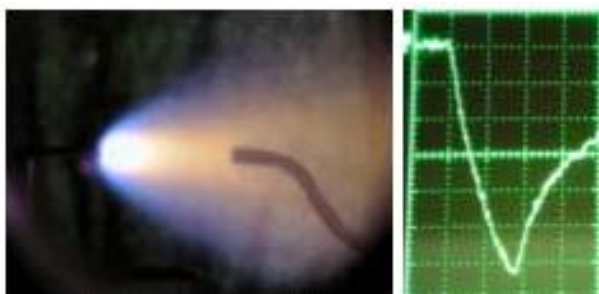


Рис.15. Горение струи пропан-воздушной смеси, подожженной иницированным линейным ЭМ вибратором глубоко подкритическим СВЧ разрядом

Исследованы свойства глубоко подкритического разряда, инициированного кольцевым резонансным вибратором. Показано, что двухэлектродный разряд способен квазистационарно существовать в потоке воздуха атмосферного давления, создавая локальную зону энерговыделения с характерным размером порядка 0.1 см, поднимая температуру в следе на ~ 100 К в приповерхностном слое диэлектрической поверхности, обтекаемой потоком.

Глава 7 посвящена описанию результатов исследований СВЧ разрядов на поверхности радиопрозрачного диэлектрика. В ней представлены основные схемы получения поверхностных СВЧ разрядов поперечного и продольного типа. Приведены результаты экспериментов по реализации поперечного и продольного типов поверхностных СВЧ разрядов в условиях экспериментальных установок И-8 с $\lambda=8.9$ см и И-2 с $\lambda=2.5$ см.

Постановка экспериментов поясняется на **Рис.16**.

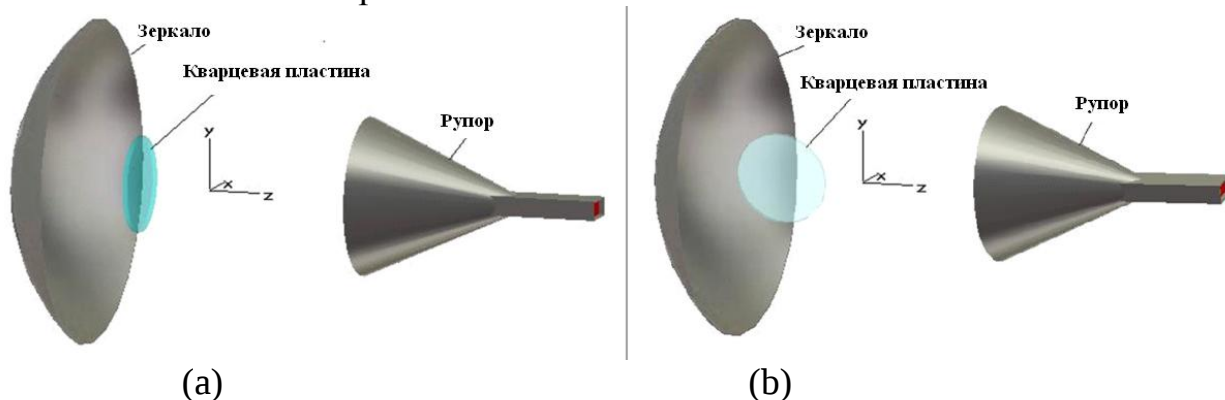


Рис.16. Схема формирования фокуса излучения на установке $\lambda=8.9\text{ см}$ и варианты размещения диэлектрических образцов: (а) – поперечное размещение, (б) – продольное размещение

Типичный вид продольного поверхностного разряда приведен на **Рис.17**. Структура стримерной сети поверхностных разрядов отлична от структуры объемных разрядов и характеризуется образованием ячеек с размерами $\lambda/4$ вдоль вектора электрического поля и $\lambda/8$ поперек вектора электрического поля.



Рис.17. Структурные свойства разряда не зависят от материала и толщины диэлектрической пластины: (а) – полиэтиленовая пленка, 0.02 см толщины, (б) – стеклотекстолит, 0.2 см, (в) – кварцевое стекло, 1.0 см

Приводятся и обсуждаются результаты опытов по изучению свойств таких разрядов в различных условиях в диапазоне параметров газа и излучения. Получены экспериментальные данные, подтверждающие электромагнитную природу преимущественного распространения стримерных подкритических разрядов по поверхности диэлектрического тела.

Порог пробоя на поверхности диэлектрика с инициатором или без него совпадает с порогом пробоя в отсутствие диэлектрика независимо от ориентации поверхности диэлектрика относительно вектора Пойнтинга падающего излучения.

Свойства стримерных каналов поверхностного разряда (радиус, интенсивность свечения, скорость распространения) идентичны при прочих равных условиях свойствам каналов объемного стримерного разряда.

Скорость распространения разряда навстречу потоку СВЧ энергии при продольном размещении поверхности с инициатором несколько выше, чем у объемного разряда. На **Рис.18** приведена покадровая развертка поверхностного разряда при продольном размещении диэлектрической пластины.

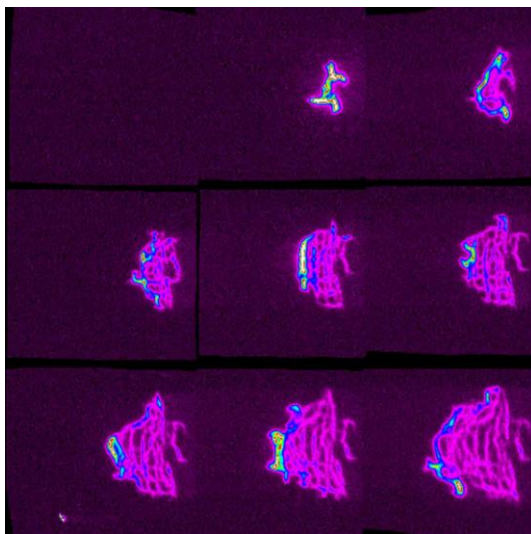


Рис.18. Покадровая развертка продольного поверхностного иницированного ЭМ вибратором подкритического СВЧ разряда с $\lambda=8.9$ см; ($\tau_{\text{exp}}=0.1$ μs ; $\tau_p=2$ μs). Зеркало - слева

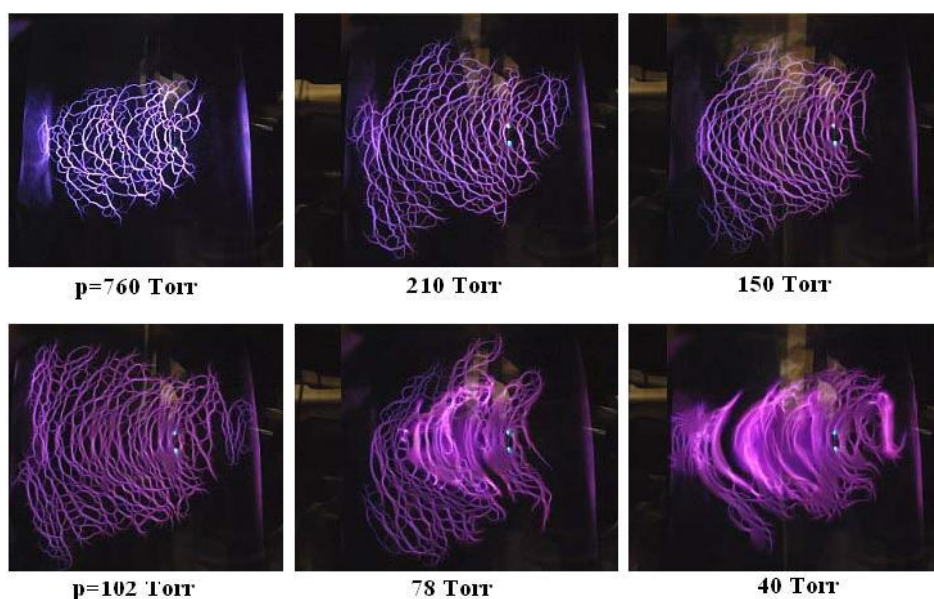


Рис.19. Переход от стримерной формы «продольного» поверхностного разряда к диффузной. $E_0=4$ кВ/см, $\lambda=8.9$ см

Область существования поверхностного разряда совпадает с областью существования объемного подкритического стримерного разряда. Переходная зона на шкале давлений от диффузной формы к стримерной у поверхностного разряда расположена там же, что и у объемного (**Рис.19**).

При малой подкритичности ($E_{\text{cr}}/E_0 < 2$) и угле падения волны излучения на поверхность с инициатором, большем нуля, наблюдается одновременное развитие поверхностного и объемного стримерного разряда (**Рис.20**).

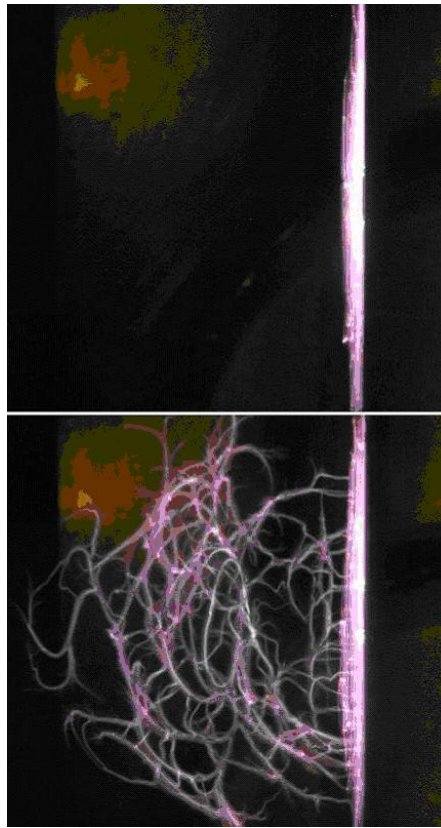


Рис.20. Фотографии инициированного «поперечного» разряда на полиэтиленовой пленке при напряженности электрического поля 3.7 kV/cm и давлении воздуха 200 Torr (наверху) и 150 Torr (внизу)

Свойства поверхностного подкритического стримерного разряда не зависят от материала и толщины диэлектрика (**Рис.17**). Это свидетельствует о несущественности влияния физико-химических процессов на предпочтительность распространения разряда по поверхности диэлектрика и указывает на электродинамическую природу свойства стримерного разряда распространяться по поверхности диэлектрических тел [63].

В **Главе 8** описываются экспериментально определенные области существования на плоскости E_0 - p импульсных инициированных подкритических СВЧ разрядов с объемно-развитой стримерной структурой и глубоко подкритических СВЧ разрядов, привязанных к инициатору. Границы получены для воздуха при длинах волны излучения 8.9 cm и 2.5 cm .

На **Рис.21** 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.21** 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 .

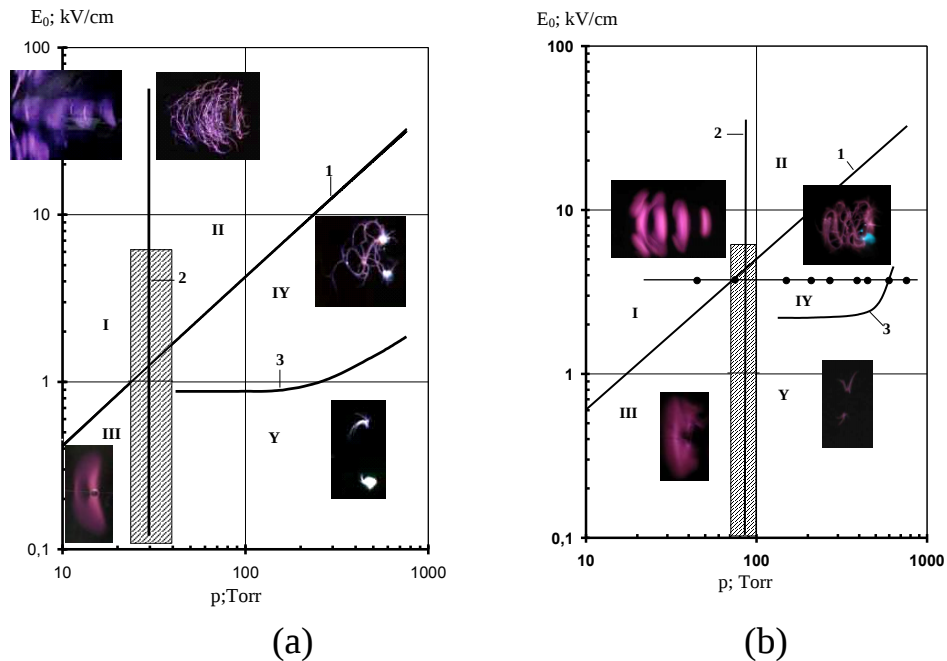


Рис.21. Области реализации различных видов СВЧ разряда в зависимости от уровня поля E_0 и давления воздуха p при $\lambda = 8.9$ см (a) и $\lambda = 2.5$ см (b)

Проводится сопоставления с известными данными для длины волны излучения 4.3 см.

Полученные данные относительно границ существования подкритического стримерного разряда для разных длин волн вполне удовлетворительно согласуются с результатами теоретической оценки, основанной на ограниченности способности стримера создавать необходимую надкритичность поля на его голове (**Рис.22**) [59].

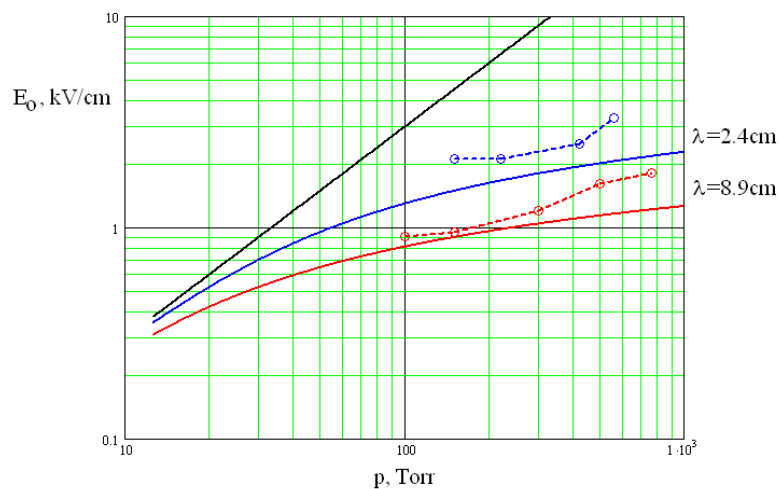


Рис.22. Оценка границы, разделяющей подкритический от глубокоподкритического разряда. Пунктир с точками - эксперимент, сплошные линии - оценка (4)

Указанный в работе [49] уровень поля с $\lambda=4.3$ см, примерно равный 1 kV/cm, ниже которого стримерный подкритический разряд теряет способность к распространению, вполне согласуется с полученными результатами для $\lambda=8.9$ см и $\lambda=2.4$ см (**Рис.22**) и оценкой (4) [59]

$$\frac{E_{V/cm} \cdot \sqrt{\lambda_{cm}}}{\sqrt{\ln\left(\frac{30 \cdot p_{Torr}}{E_{V/cm}}\right)}} = 2 \cdot 10^3. \quad (4)$$

В **Главе 9** приводятся результаты экспериментов, направленных на выяснение перспектив применения СВЧ разрядной технологии в интересах плазменной аэродинамики и плазменного горения. Приводятся схемы возможного применения в прямоточных двигательных установках для повышения скорости и стабильности горения; на летательных аппаратах для повышения управляемости и стабильности полета; результаты экспериментов, демонстрирующие перспективность применения СВЧ разрядной технологии в указанных областях техники.

Экспериментально показана теоретически предсказанная [64,65,66] возможность: 1) снижения лобового сопротивления тела в сверхзвуковом потоке за счет выделения СВЧ мощности в донной части (**Рис.23**); 2) создания боковой силы на профиле, обтекаемом скоростным потоком воздуха, за счет энерговыделения в поверхностном подкритическом разряде (получена зависимость силы от выделяемой мощности) (**Рис.24**); 3) снижения лобового сопротивления тела в сверхзвуковом потоке за счет выделения СВЧ мощности перед головным скачком с КПД, существенно большем единицы (**Рис.25**).

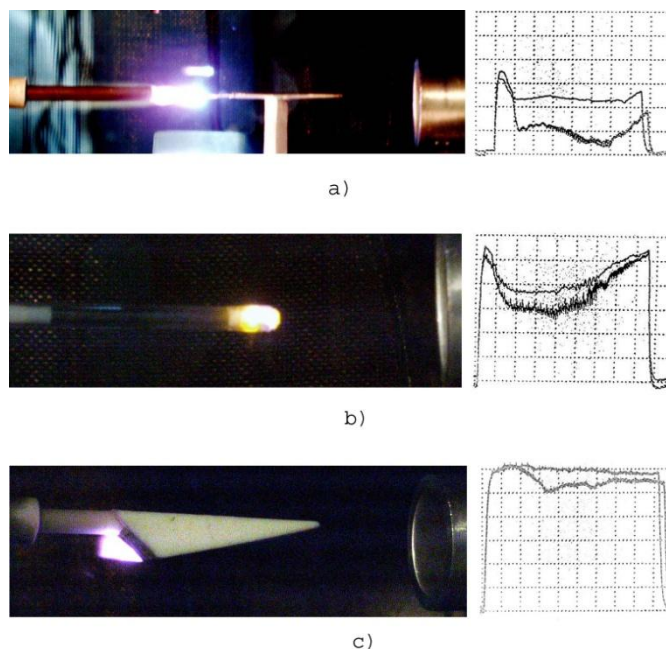


Рис.23. Фотографии разряда при его зажигании : а) перед головной УВ; б) за головной УВ; в) в кормовой части модели и соответствующие им осциллограммы измеряемых F_x . Сопло Лаваля - справа

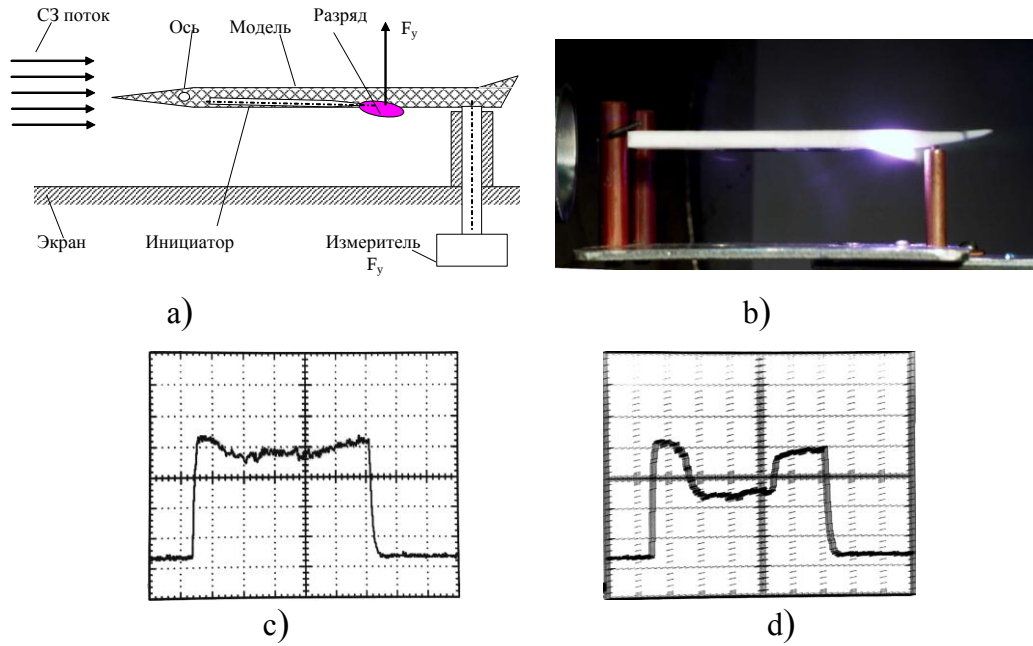


Рис.24. Эксперимент по созданию подъемной силы F_y с помощью СВЧ разряда, созданного на поверхности модели, противоположной падающему излучению: а) схема эксперимента; б) фотография модели с горящим разрядом; в) и д) осциллограммы измеряемой F_y без разряда и с разрядом

Количественные измерения сил, возникающих под действием СВЧ глубоко подкритического разряда находятся в полном соответствии с результатами расчетов и численного моделирования по боковой силе [67] и лобовому сопротивлению [68]. Эксперименты подтвердили утверждение о доминирующей роли теплового влияния газоразрядной плазмы на газодинамические процессы [69].

Экспериментально показана способность подкритического и глубоко подкритического разрядов инициировать и поддерживать горение в модельной горючей смеси при скорости потока смеси до 200 м/с.

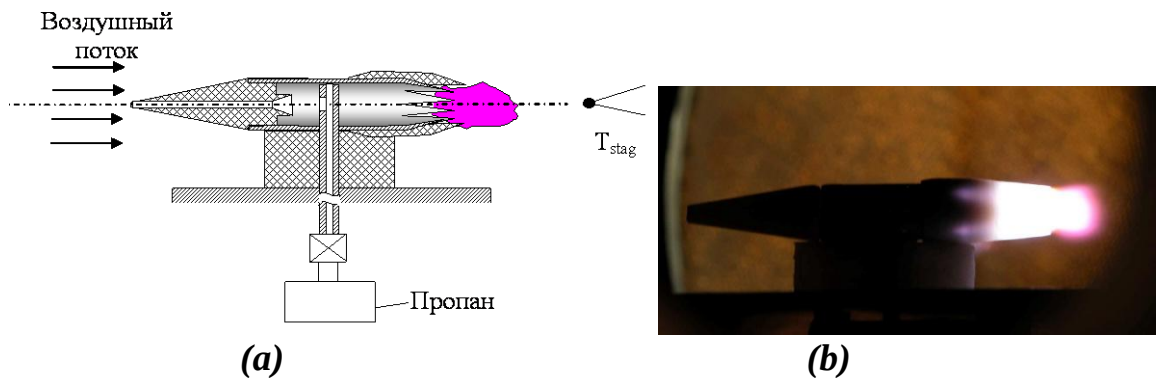


Рис.25. Схема (а) и реализация (б) горелки в скоростном потоке

Рассматривается возможность безынерционного управления аэродинамическими параметрами сверхзвуковых и дозвуковых летательных

аппаратов и, в частности, использование для этого стримерного подкритического СВЧ разряда с развитой структурой на поверхности диэлектрика.

Заключение

Проведено комплексное исследование различных типов газового разряда в потоке СВЧ излучения на разных длинах волн сантиметрового диапазона в широком диапазоне давления газа и уровня плотности потока энергии излучения в импульсном и непрерывном режимах в сложных постановках, имитирующих типичные ситуации реальных условий. Особое внимание уделялось экспериментальным исследованиям разрядов, инициированных в поле с уровнем, меньшим и много меньшим критического значения. Использование максимально возможной в лабораторных условиях длины волны излучения, при которой еще возможно воссоздавать условия квазиоптики (8.9 см и 12.3 см), позволило исследовать структурные особенности формирования подкритических стримерных разрядов и понять основные закономерности, определяющие их развитие.

Исследование феноменологии СВЧ импульсного разряда в надкритическом СВЧ поле на длине волны 8.9 см показало, что в диапазоне средних значений давления воздуха ($1 < \nu/\omega < 50$) его свойства полностью коррелируют с таковыми на более коротких длинах волн при тех же значениях ν/ω . Исследования динамики развития надкритического импульсного СВЧ разряда на длине волны 8.9 см в диапазоне значений параметра $\nu/\omega > 50$ показало, что его развитие начинается с быстрого распространения диффузной формы с заполнением области надкритического поля последующим формированием нитевидной структуры. Формирование плазмOIDных структур с четвертьволновым периодом в диффузных надкритических разрядах требует дальнейших теоретических исследований.

Использование открытого резонатора, играющего роль накопителя СВЧ энергии с высокой плотностью энергии в объеме и высоком уровне электрического поля, позволило провести исследование разрядных явлений при давлении газа в несколько атмосфер и обнаружить новое физическое явление - СВЧ пинч-эффект безэлектродного прямолинейного разряда. СВЧ пинч наблюдался при разряде в открытом высокочастотном резонаторе при давлении газа выше атмосферного на длинах волн $\lambda = 8.9$ см и $\lambda = 4.3$ см. Развитие разряда в резонаторе при высоком давлении начинается с единичного электрона с образованием вытянутого вдоль поля канала, концы которого развиваются со скоростью, нарастающей от 10 до 100 км/с при выходе на резонанс, в полном соответствии с представлением о стримерном механизме развития разряда высокого давления в надкритическом поле. Стример достигает длины, близкой к резонансной, и почти полностью опустошает резонансный накопитель. Темп, в котором происходит опустошение накопителя, свидетельствует о резонансном характере взаимодействия стримерного разряда с полем. При уровне поля в резонаторе,

превышающем пороговое значение в несколько раз и давлении в несколько атмосфер, развитие разряда сопровождается образованием перетяжки в центральной области (одной или более) со следами повышенного энерговыделения в ней. При давлении водорода выше 5 атмосфер наблюдается развитие змейковой моды возмущения большой амплитуды, не приводящее, тем не менее, к развалу токового канала. Развитие наблюдаемых неустойчивостей качественно и количественно объясняется проявлением самосжатия токового СВЧ канала усредненным магнитным полем тока, наведенного в стримере при достижении электродинамического резонанса. Параметры плазмы в токовом канале резко возрастают с увеличением давления газа. Пинч-эффект в безэлектродном СВЧ стримерном разряде получен и исследован впервые.

Для уверенной инициации подкритических и глубоко подкритических разрядов были предложены и исследованы калиброванные резонансные и дорезонансные инициаторы различной конфигурации и системы инициаторов. Для тонких вибраторов различной геометрии получены зависимости коэффициента увеличения поля и их резонансной длины от радиуса проводника. Предложен и разработан простой метод измерения абсолютного значения напряженности СВЧ поля с помощью калиброванного вибратора (проще всего, металлического шарика малого размера), облучаемого УФ, помещаемого в точку измерения. Разработана теория учета диффузионных потерь электронов на шарик, позволяющая ввести поправку.

Исследования пространственной структуры, динамики развития и основных свойств разрядов, инициированных в подкритическом поле на длинах волн 8.9 см и 2.4 см, подтвердили, в основном, полученные ранее сведения и внесли существенные дополнения, позволившие понять и промоделировать основные закономерности, определяющие распространение стримерного разряда в подкритическом поле. В результате исследований инициированных разрядов в подкритическом поле определены границы существования инициированного стримерного разряда и переходной зоны от диффузного к стримерному типу в зависимости от длины волны излучения. Середина переходной зоны от диффузного разряда к стримерному оценивается соотношением

$$p_{dif} \cdot \lambda \approx 250 \text{ Torr} \cdot \text{cm}.$$

Полученные данные относительно границ существования подкритического стримерного разряда для разных длин волн вполне удовлетворительно согласуются с результатами теоретической оценки, основанной на ограниченности способности стримера создавать необходимую надкритичность поля на его голове.

Глубоко подкритический разряд выделен в самостоятельный тип разряда, как представляющий особый интерес с точки зрения приложений. Исследована эффективность взаимодействия прямолинейного резонансного вибратора, нагруженного глубоко подкритическим разрядом, с СВЧ полем. Определено сечение поглощения системы вибратор - глубоко подкритический разряд в свободном пространстве и присутствии рефлектора

$0.24 \cdot \lambda^2$. Показана и частично исследована способность глубоко подкритического разряда, инициированного прямолинейным резонансным вибратором, выполненным в виде инжектора топливной смеси, инициировать и поддерживать горение смеси с массовым коэффициентом избытка топлива, большим 0.2. Исследованы свойства глубоко подкритического разряда, инициированного кольцевым резонансным вибратором. Показано, что двухэлектродный разряд способен квазистационарно существовать в потоке воздуха атмосферного давления, создавая локальную зону энерговыведения с характерным размером порядка 0.1 см, поднимая температуру в следе в приповерхностном слое над диэлектрической поверхностью, обтекаемой потоком

Отдельную форму инициированных подкритических разрядов представляют стримерные разряды на поверхности диэлектрических тел. Порог пробоя на поверхности диэлектрика с инициатором или без него совпадает с порогом пробоя в отсутствие диэлектрика независимо от ориентации поверхности диэлектрика относительно вектора Пойнтинга падающего излучения. Область существования поверхностного разряда совпадает с областью существования объемного подкритического стримерного разряда. Свойства стримерных каналов поверхностного разряда (радиус, интенсивность свечения, скорость распространения) идентичны при прочих равных условиях свойствам каналов объемного стримерного разряда. Структура стримерной сети поверхностных разрядов отлична от структуры объемных разрядов и характеризуется образованием ячеек с размерами $\lambda/4$ вдоль вектора электрического поля и $\lambda/8$ поперек вектора электрического поля. При малой подкритичности ($E_{cr}/E_0 < 2$) и угле падения волны излучения на поверхность с инициатором, большем нуля, наблюдается одновременное развитие поверхностного и объемного стримерного разряда. Свойства поверхностного подкритического стримерного разряда не зависят от материала и толщины диэлектрика, что свидетельствует о несущественности влияния физико-химических процессов на предпочтительность распространения разряда по поверхности диэлектрика и с указанным в работе [49] уровнем поля при длине волны излучения 4.3 см, примерно равным 1 kV/cm.

Экспериментальные исследования по контролю газодинамических потоков с помощью СВЧ разрядной технологии подтвердили теоретически предсказанную возможность снижения лобового сопротивления тела в сверхзвуковом потоке за счет выделения СВЧ мощности перед головным скачком с кпд, существенно большем единицы, и за счет выделения СВЧ мощности в донной части. Экспериментально подтверждена теоретически предсказанная возможность создания боковой силы на профиле, обтекаемом скоростным потоком воздуха, за счет энерговыведения в поверхностном подкритическом разряде, получена зависимость силы от выделяемой мощности. Зондирование области разряда слабой ударной волной показало, что распространение ударной волны через область стримерного разряда

непосредственно после его завершения сопровождается ее полной деструкцией.

Экспериментальные исследования по инициации и стабилизации горения в скоростных потоках горючих смесей показали способность подкритического и глубоко подкритического разрядов инициировать и поддерживать горение в модельной горючей смеси при скорости потока смеси до 200 м/с.

Выявленные свойства стримерных СВЧ разрядов указывают на их перспективность для различных приложений как в области плазменной аэродинамики, так и в области плазменно-стимулированного горения и позволяют рассматривать различные варианты их практического применения. Физические принципы, положенные в основу некоторых из этих вариантов, прошли проверку на лабораторном уровне, которая подтвердила их перспективность.

Список публикаций соискателя по теме диссертации

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., Князев М.П., Мишин Г.И. *Акустические свойства воздуха, возбужденного электрическим разрядом*. Препринт №1345. Ленинград, Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе АН СССР. 1989. -27 с.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В., Цыпленков В.В. *Установка для исследования импульсного безэлектродного СВЧ разряда в газах высокого и среднего давления*. Препринт N 9005. МРТИ АН СССР. М., 1990. -27 с.
9. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. *Возможность осуществления термоядерного синтеза в резонаторном стримерном СВЧ разряде высокого давления*. Препринт N 1577. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе г. Санкт-Петербург, 1992. -60 с.
10. 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.
11. 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. 34-38.

12. 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.
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. 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 (ISTARС - 95), 22 - 26 мая 1995. Иваново. - С.152-155
15. 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.
16. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин М.Г., Ходатаев К.В. *Скорость распространения ионизационно-дрейфовой волны пробоя* //ЖТФ.-1995.- Т.65, Вып.11.-С.86-92.
17. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. *Высоочастотный 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. -Т.41, № 6. -С.1-3.
19. 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.
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 Г.И., Ходатаев К.В., Мишин Г.И. *Термоядерный реактор* //Патент Российской Федерации №2076358 от 27.03.1997.
23. Ходатаев К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И. *Область существования самостоятельного стримерного микроволнового разряда в покоящемся газе* //Тезисы докладов XXV Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (2-6 марта 1998, г.Звенигород). -С.194.
24. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. *Особенности развития импульсных СВЧ разрядов в квазиоптическом пучке в различных газах* //ЖТФ. -1998. -Т.68, №4. -С.33-36.

25. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. *Стимерный СВЧ разряд в сверхзвуковом потоке воздуха* //ЖТФ. -1999. -Т.69, Вып.11. -С.14-18.
26. 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. Abstracts, IAP RAS. -P.D2.
27. Esakov I., Grachev L., Khodataev K. *The Review of Plasmagasdynamic Experiments in Russia, Conclusions and Prospects of Plasma technology Applications in Aerodynamics* //Proc. of 3th International Weakly Ionized Gases Workshop. (1-5 November 1999. Norfolk. Virginia. USA Waterside Marriott. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). -AIAA-99-4821.
28. 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.
29. 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.
30. Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V. *Plasmagasdynamic experiments in Russia and prospects of plasma technology application in aerodynamics* //Problems of Atomic Science and technology. 2000. No3. Series: Plasma Physics (5). -P.141-145.
31. 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.
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, No 3, Series: Plasma Physics (5). -P.138-140.
33. 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.
34. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. *Обзор плазмогазодинамических экспериментов в России, выводы и перспективы приложения плазменных технологий в аэродинамике* //Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому синтезу (Звенигород, 21-25 февраля 2000 г.). - С.225.
35. L.P.Grachev, I.I.Esakov, K.V.Khodataev. *Plasmagasdynamic 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. Грачев Л.П., Есаков И.И., Малык С.Г. *Сферический плазмод с нерезкой границей в линейно поляризованном квазиоптическом ЭМ поле* //ЖТФ. - 2001. -Т. 71, Вып.6. -С.23-27.
37. Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И. *Квазиоптический двухзеркальный открытый резонатор* //Радиотехника и электроника. - 2001. -Т. 46, №9. -С.1067-1077.
38. 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.
39. 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 Workshop (11-14 June/Anaheim, CA). -AIAA-2001-2939.
40. 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.
41. 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. - P.14.
42. 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, No11. -P.1964-1965.
43. 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.
44. 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*// 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.
45. 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.

- 46.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.
- 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.Бычков В.Л., Грачев Л.П., Есаков И.И., 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.
- 49.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* //42rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (5-8 January 2004, Reno, Nevada). Paper AIAA 2004-840.
- 50.Vinogradov V.A., Alexandrov A.F., Timofeev I.B., Esakov I.I. *The effects of plasma formations on ignition and combustion* //42rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (5-8 January 2004, Reno, Nevada). AIAA 2004-1356.
- 51.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* //42rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (5-8 January 2004, Reno, Nevada). AIAA 2004-840.
- 52.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.
- 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.* 42rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (5-8 January 2004, Reno, Nevada). AIAA 2004-181.
- 54.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.

- 55.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.
- 56.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
- 57.Esakov Igor I., Bychkov Vladimir L., Feldman Gregory 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.
- 58.Esakov I.I., Grachev L.P., Bychkov V.L., Van Wie 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
- 59.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. -December 2006.-V.34, No.6. -P.2497-2506.
- 60.Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V., Vinogradov V.A. and Van Wie David M. *Combustion efficiency in deeply undercritical MW discharge area in cold high-speed airflow* //44rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (9-12 January 2006, Reno, Nevada). -AIAA 2006-1212.
- 61.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.
- 62.Ardelyan N.V., Bychkov V.L., Denisyuk 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 (IWEPAC), (19-21 September 2006, Quality Inn Governor Falls Church, Virginia, U.S.A.). -P.31-32.
- 63.Khodataev K., Esakov I., Grachev L. and Van Wie D. *Microwave Discharge in Quasi-optical Wave Beam*: 45rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (8-11 January 2007, Reno, Nevada). -AIAA 2007-0433.

- 64.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.
- 65.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.
- 66.Esakov, L. P.Grachev, K.V. Khodataev, V. L. Bychkov, D.M.Van Wie. *Surface Discharge in a Microwave Beam* //IEEE Transactions on Plasma Science. - Vol.35, No.6. -December 2007. -P.1658-1663.
- 67.Igor I.Esakov, Lev P.Grachev, Vladimir L. Bychkov, Dave M. Van Wie/*Surface microwave discharge in quasi-optical wave beam* //45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit/ 8-11 January 2007, Reno, Nevada, USA. -Paper AIAA 2007-430.
- 68.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.
- 69.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* //46rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 7-10 Jan. 2008. -AIAA 2008-1407.
- 70.Бычков В.Л., Есаков И.И., Грачев Л.П., Раваев А.А., Ходатаев К.В., Юрченко Н.Ф. *Инициированный поверхностный СВЧ разряд в экспериментальных исследованиях нового метода управления пограничным слоем* //VI Int. Symp. "Thermochemical Processes in Plasma Aerodynamics", May 12-14, 2008, St-Petersburg. -P.27-29.
- 71.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* //46rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 7-10 Jan. 2008. -AIAA 2008-1407.
- 72.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. -С.312
- 73.Бычков В.Л., Есаков И.И., Грачев Л.П., Раваев А.А., Ходатаев К.В., Юрченко Н.Ф. *Инициированный поверхностный СВЧ разряд в экспериментальных исследованиях нового метода управления пограничным слоем* //VI Международный симпозиум "Thermochemical

- Processes in Plasma Aerodynamics”, May 12-14, 2008. St-Petersburg. -P.27-29.
- 74.Бычков В.Л., Есаков И.И., Грачев Л.П., Раваев А.А., Ходатаев К.В., Юрченко Н.Ф. *Инициированный поверхностный СВЧ-разряд в экспериментальных исследованиях нового метода управления пограничным слоем* //VI Международный симпозиум “Thermochemical Processes in Plasma Aerodynamics”, May 12-14, 2008. St-Petersburg. -P.27-29.
- 75.Vladimir L. Bychkov, Igor I.Esakov, Lev P.Grachev, Kirill V.Khodataev. *A microwave discharge initiated by loop-shaped electromagnetic vibrator on a surface of radiotransparent plate in airflow*. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting 7-10 January 2008, Reno, NV, USA. -Paper AIAA-2008-1407.
- 76.Бычков В.Л., Есаков И.И., Грачев Л.П., Раваев А.А., Ходатаев К.В., Юрченко Н.Ф. *Инициированный поверхностный СВЧ разряд в экспериментальных исследованиях нового метода управления пограничным слоем* //VI Int. Symp. «Thermochemical Processes in Plasma Aerodynamics», May 12-14, 2008, St-Petersburg. -P.27-29.
- 77.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 школы-семинара «Модели и методы аэродинамики», Евпатория, 4-13 июня 2008. -С.159-160.
- 78.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.
- 79.Igor I. Esakov, Lev. Grachev, Kirill V. Khodataev, Alexander A.Ravaev, Nina F. Yurchenko, Pavel Vynogradskyy, Alexander Zhdanov. *Initiated Surface Microwave Discharge as an Efficient Active Boundary-Layer Control Method*. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition. 5-8 January 2009, Orlando, Florida. -Paper AIAA 2009-889.
- 80.Konstantin V. Alexandrov, Eugeny B. Alfeev, Lev P. Grachev, Igor I Esakov, Alexei I. Khomenko, Kirill V. Khodataev, Vyacheclav A. Vinigradov. *Experimental investigation of a surface discharge in focused beam of microwave radiation at wavelength of 2.5cm and 8.9cm* //47th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition. 5-8 January 2009, Orlando, Florida. -Paper AIAA 2009-845.
- 81.Konstantin K. Aleksandrov, Igor I. Esakov, Lev P. Grachev, Kirill V. Khodataev, Pavel B. Lavrov, Alexander A. Ravaev. *Boundary-Layer Control*

Based on Localized Plasma Generation: Development of the Microwave System //48th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition. 4-8 January 2010, Orlando, Florida. -Paper AIAA 2010- 1003.

82. Konstantin V. Alexandrov, Eugeny B. Alfeev, Lev P. Grachev, Igor I Esakov, Alexei I. Khomenko and Kirill V. Khodataev. *Experimental study of surface-volumetric discharge transition at various polarization and angle of falling of microwave radiation* //48th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition. 4-8 January 2010, Orlando, Florida. -Paper AIAA 2010-1193.

Список цитируемой литературы

1. Ходатаев Ю.В. *Проблемы газоразрядной безопасности бортовых антенн высоколетающих объектов*: Дис. кандидата технических наук. (Научн. рук. академик А.М.Будкер) -М.: НПО «Космическое приборостроение». -1959.
2. Ходатаев Ю.В. Авторское свидетельство №17426. Приоритет от 12 июля 1957 г.
3. Allison J., Cullen A.L., Zerody A. *A microwave plasma discharge* //Nature.-1962, v.193, #4811.- p.72.
4. Бацких Г.И., Хворостяной Ю.И. *Экспериментальная установка для формирования мощного сфокусированного потока СВЧ излучения в свободном пространстве* //Радиотехника и электроника.-1992. -№ 2. -С.311-315.
5. Батанов Г.М., Грицинин С.И., Косый И.А., Магунов А.Н., Силаков В.П., Тарасова Н.М. *СВЧ разряды высокого давления* //Сб. научн. тр. Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР. -1985. -Т.160. -С.174-203.
6. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. -М.: Наука, 1987. -591 с.
7. *Высокочастотный разряд в волновых полях*. Сб. научн. тр. ИПФ АН СССР. Отв. ред. А.Г.Литвак. Горький. 1988. -297 с.
8. *Радиофизика*. //Сб. научн. тр. МРТИ АН ССР. -М.: МРТИ, 1991. -291с.
9. *Физика и химия газовых разрядов в пучках СВЧ волн* //Сб.научн. тр. Института общей физики РАН. -М.: Наука, 1994. -Том 47. -144 с.
10. Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. *Свободно локализованный СВЧ разряд в воздухе*. – М.: Нефть и газ. 1996. -204 с.
11. Esakov I., Grachev L., Khodataev K. *The Review of Plasmagasdynamics Experiments in Russia, Conclusions and Prospects of Plasma technology Applications in Aerodynamics* //Proc. of 3th International Weakly Ionized Gases Workshop. (1-5 November 1999. Norfolk. Virginia.USA Waterside Marriott. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). -AIAA-99-4821.
12. Гильденбург В.Б. *Сверхвысокочастотные разряды*. В кн. "Энциклопедия низкотемпературной плазмы", т. II, раздел IV.6.1., с.165-171. М. Наука. 2000.

13. Вихарев А.Л., Еремин Б.Г. *СВЧ разряд в квазиоптическом резонаторе* //ЖЭТФ. -1975. -Т.68, Вып.2. -С.452-455.
14. Мак-Доналд А. *Сверхвысокочастотный пробой в газах*. -М.: Мир, 1969. -212 с.
15. Mayhan J.T. *Comparison of various microwave breakdown prediction models* //J. Appl. Physics. -1971. -vol. 42. -p.5362-5368.
16. Лупан Ю.А. *Об одной возможности уточнения результатов элементарной теории ВЧ разряда в воздухе* //ЖТФ. -1976. -т.46, в. 11. -с. 2321-2326.
17. Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Ким А.В., Колыско А.Л. *Формирование мелкомасштабной структуры СВЧ разряда в газе высокого давления* //Физика плазмы. -1992. -Т.18, Вып.8. -С.1064-1075.
18. Вихарев А.Л., Гильденбург В.Б. //Физика плазмы. -1984.-Т.10. -С. 165.
19. Грицинин С.И., Косый И.А., Силаков В.П., Тарасова Н.М., Терехин В.Е. *Несамостоятельный СВЧ разряд в азоте при высоком давлении* //ЖТФ. -1987. -Т.57, Вып.4. -С.681-686.
20. Велихов Е.П., Новобранцев И.В., Письменный В.Д. и др. *К вопросу о комбинационной накачке газовых лазеров* //Докл. АН СССР. -1972. -т.205, №6. -с.1328-1331.
21. Гильденбург В.Б., Ким А.В. *Ионизационные неустойчивости электромагнитной волны* //ЖЭТФ. -1978. -Т.74, Вып.1. -С.143-146.
22. Ким А.В., Фрайман Г.М. *О нелинейной стадии ионизационно-перегревной неустойчивости в высокочастотном разряде высокого давления* //Физика плазмы. -1983. -Т. 9, Вып.3.- С.613-617.
23. Ховатсон А.М. *Введение в теорию газового разряда*. -М.:Атомиздат, 1980. -182 с.
24. Гильденбург В.Б., Ким А.В. *Ионизационно-перегревная неустойчивость высокочастотного разряда в поле электромагнитной волны* //Физика плазмы. -1980. Том 6, Вып.4. -с.904-909.
25. Быков Ю.В., Голубев С.В., Гольденберг А.Л., Зорин В.Г. *Об использовании разряда, поддерживаемого мощным электромагнитным излучением диапазона миллиметровых волн, в плазмохимии* //ЖТФ. -1984. -Т.54, вып.4. -С.723-726.
26. Вяхирев А.Л., Гильденбург В.Б., Голубев С.В., Еремин Б.Г., Иванов О.А., Литвак А.Г., Степанов А.Н., Юнаковский А.Д. *Нелинейная динамика свободно локализованного СВЧ разряда в пучке электромагнитных волн* //ЖЭТФ.-1988.-Т.94, вып.4.-С.136-145.
27. Богатов Н.А., Бродский Ю.Я., Голубев С.В., Грицинин С.И., Зорин В.Г., Косый И.А., Тарасова Н.М. *Быстрая волна ионизации, возбуждаемая в газовой среде электромагнитным лучом* //Краткие сообщения по физике. - 1984. -№ 9. -С.32-35.
28. Грицинин С.И., Косый И.А., Тарасова Н.М. *Разряд высокого давления в циркулярно поляризованной СВЧ волне* //Письма в ЖТФ. -1985. -Т.11, Вып.15. -С.924-929.

29. Косый И. А., Костинский А. Ю., Матвеев А. А., Силаков В. П. //Труды ИОФАН. 1994. Т. 47. С. 37—57.
30. Аветисов В.Г., Грицинин С.И., Ким А.В., Косый И.А. и др. *Ионизационный коллапс высокочастотной плазменной нити в плотном газе* // Письма в ЖЭТФ.-1990. -Т.51, вып.6. -С. 306-309.
31. Грицинин С.И., Князев В.Ю., Косый И.А., Попов Н.А. *Микроволновой факел как плазмохимический генератор окислов азота* // Физика плазмы. - 2006. -Т. 32. -С. 565-570.
32. Вихарев А.Л., Гильденбург В.Б., Ким А.В., Литвак А.Г., Семенов В.Е. *Электродинамика неравновесного высокочастотного разряда в волновых полях*. В сб. "Высокочастотный разряд в волновых полях". Изд. ИПФ АН СССР, Горький, 1988. -С. 41-135.
33. Бродский Ю.Я., Голубев С.В., Зорин В.Г., Косый И.А. *Экспериментальное исследование неравновесного СВЧ разряда при атмосферном давлении в воздухе* //Письма в ЖТФ. -1984. -Т.10, Вып.3. - С.187-190.
34. Грицинин С.И., Дорофеюк А.А., Косый И.А., Магунов А.Н. *Контрагированный СВЧ разряд и параметры плазмы в области контракции* //ТВТ. -1987. -Т. 25, № 6. -С.1068-1072.
35. Бровкин В.Г., Быков Д.Ф., Голубев С.К., Грицинин С.И., Гумберидзе Г.Г., Косый И.А., Тактакишвили М.И. *Газовый разряд, возбуждаемый СВЧ излучением и излучением CO₂ лазера* //ЖТФ. -1991. -Т.61, Вып.2. -С.153-157.
36. Голубев С.В., Грицинин С.И., Зорин В.Г., Косый И.А., Семенов В.Е. *СВЧ-разряд высокого давления в пучках электромагнитных волн*. В сб. "Высокочастотный разряд в волновых полях". Изд. ИПФ АН СССР, Горький. 1988. -С. 136-197.
37. Батанов Г.М., Грицинин С.И., Косый И.А., Магунов А.Н., Силаков В.П., Тарасова Н.М. *СВЧ разряды высокого давления* //Сб. научн. тр. Физического института им. П.Н.Лебедева АН СССР. 1985. Т.160. -С.174-203.
38. Богатов Н.А., Голубев С.В., Зорин В.Г. *Механизм образования плазменного ореола вокруг СВЧ разряда* //Физика плазмы. -1986. -Т.12, Вып.11. -С.1369-1375.
39. Казарин А.Ю., Лукина Н.А., Сергейчев К.Ф. *Ореол фотоионизации вокруг области СВЧ -пробоя воздуха и его влияние на "память" о пробое в присутствии ветра* //Физика Плазмы. -1984.-Т.10, Вып.6. -С.1286-1290.
40. Шибков В.М. *Свободно локализованный импульсно-периодический СВЧ разряд в воздухе. Напряженность электрического поля в плазме* //ТВТ. - 1996. -Т. 34, №4. -С.525-530.
41. Кузовников А.А., Шибков В.М., Шибкова Л.В. *Свободно локализованный импульсно-периодический СВЧ разряд в воздухе. Кинетика нагрева газа* //ТВТ. -1996.-Т.34, № 3. -С.349-354.

42. Кузовников А.А., Шибков В.М., Шибкова Л.В. *Кинетика заряженных частиц в свободно локализованном импульсно-периодическом СВЧ разряде в воздухе* //ТВТ. -1996. -Т. 34, №5. -С.661-665.
43. Бродский Ю.А., Голубев С.В., Зорин В.Г. и др. *О новом механизме газодинамического распространения разряда* //ЖЭТФ. -1983. -т.84, вып.5. -с. 1695-1701.
44. Батенин В.М., Климовский И.И., Лысов Г.В., Троицкий В.Н. *СВЧ-генераторы плазмы: Физика, техника, применение*. -Энергоатомиздат, 1988. - 224 с.
45. Баранов В.В., Бровкин В.Г. *Структурные особенности СВЧ разряда высокого давления*. В сб. Радиационно-плазмохимические методы в экологии. МРТИ РАН. 1989. -С.40-46.
46. Колесниченко Ю.Ф. *Теоретическое исследование распространения иницированного СВЧ разряда атмосферного давления* //Тез. докл. 2-го Всесоюзного Совещания "Высокочастотный разряд в волновых полях", Куйбышев, КГПИ. -1989. -с 26-27.
47. Бровкин В.Г., Колесниченко Ю.Ф. *Структура и характер распространения иницированного СВЧ разряда высокого давления* //Письма в ЖТФ. -1990. -Т.16, Вып.3. -С.55-58.
48. Баранов В.В., Бровкин В.Г. *Динамика и структура СВЧ разряда высокого давления* //Письма в ЖТФ. -1990. -Т.16, Вып.15. -С.39-43.
49. Бровкин В.Г., Колесниченко Ю.Ф. *Классификация структур иницированного СВЧ разряда* //Письма в ЖТФ. -1991. -т.17, №1. -с.58-61.
50. Бровкин В.Г., Колесниченко Ю.Ф. *Структурообразование в иницированном СВЧ разряде*. В Сб. научн. тр. "Радиофизика". МРТИ АН СССР. М.: МРТИ. -1991.
51. Двинин С.А. *О механизме формирования нитевидной структуры СВЧ разряда высокого давления* //Вестник московского университета.Сер.3. Физика. Астрономия. -1985. -Т.26, № 6.-С.30-33.
52. Khodataev K.V., Ershov A. *Experimental investigation of a possibility of a MW streamer gas discharge application for fuel ignition in jet engine*. //Proc. supplement of 2-nd Weakly Ionized Gases Workshop. Waterside Marriott Hotel, Norfolk, Virginia, USA, 24-25 April, 1998, pp. 339-350.
53. 37th - 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, "1st - 12th Weekly Ionized Gases Workshop" (1997 - 2010).
54. Khodataev K.V. *Gas dynamic processes in extra high power high frequency discharge plasma*. //Proc. of the ICPIG-XX (Piza, 1991), invited papers 1991, pp. 207-217.
55. Ходатаев К.В. *Гидродинамические процессы в плазме сверхмощного высокочастотного разряда* //Химическая физика. -1993. -т.12, в.3. -с. 303-315.
56. Khodataev K.V. *Physics of the Undercritical Microwave Discharge and Its Influence on the Supersonic Aerodynamics and Shock Waves*. //Proc. of

Workshop on Weakly Ionized Gases. USAF Academy, Colorado 9-13 June 1997, v. 1, pp. L-1 - L-12.

57. Khodataev Kirill V. *Pinch-effect in resonant streamer discharge of high-pressure in microwave open resonator* //Международная научно-техническая конференция «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе». ВНИИА им. Н.Л. Духова, 18-22 октября 2004г.

58. Khodataev Kirill V. *The physical basis of the high ability of the streamer MW discharge to a resonant absorption of MW radiation* //42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting 5-8 January 2004, Reno, NV. Paper AIAA-2004-0180

59 Khodataev K. *Development scenario and main parameters of different types of the microwave streamer discharges* //Proc. of 6th Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics for Aerospace Applications. May 24-27, 2005. Institute of High Temperatures RAS, Moscow, Russia. V.2, pp. 556-564.

60. Khodataev Kirill V. *Factors defining propagation of microwave subcritical streamer discharge against radiation.* //7th Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, March 27-29, 2007, Moscow, Russia

61. Khodataev Kirill V. *Investigation of undercritical microwave discharge ability to propagate limitlessly by continuous branching of the streamer* //44rd AIAA Aerospace Sciences Meeting 9-12 January 2006, Reno, NV. Paper AIAA-2006-0789.

62. Khodataev K. *The Power Effectivity of a Microwave Undercritical Attached Discharge, Initiated by Resonant Vibrator* //43nd AIAA Aerospace Sciences Meeting 10-13 January 2005, Reno, NV. Paper AIAA-2005-0596.

63. Khodataev Kirill V. *The Nature of Surface MW Discharges* //48th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition. 4-8 January 2010, Orlando, Florida. Paper AIAA 2010-1378.

64. Бартльме Ф. *Газодинамика горения.* -М.: Энергоиздат, 1981.-320 с.

65. Chernyi G.G. *The impact of electromagnetic energy addition to air near the flying body on its aerodynamic characteristics (Russian contribution)* //Proc. of 2nd Weakly ionized Gases Workshop, April 24-25 1998, Norfolk VA, USA, p.1-31.

66. Kogan M. *Thermal phenomena and plasma aerodynamics* //2-nd Workshop on Weakly Ionized Gases. Proceedings. Norfolk, VA. April 24-25, 1998. P.45-58.

67 . Khodataev Kirill V. *Numerical modeling of the lateral force creation by surface undercritical microwave discharge* //42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting 5-8 January 2004, Reno, NV. Paper AIAA-2004-0672.

68. Georgievsky P., Levin V.A., Ivanov Yu.L. *The modification of aerodynamic characteristics of different bodies by means of energy input to upstream flow* //The 3rd Workshop on Magneto-Plasma-Aerodynamics in Aerospace Applications. //Proceedings. Moscow. IHT RAS, 2001, p. 73-77.

69. Khodataev K.V. *The plasma effects in air dynamics. The gas discharge theory model in aerodynamic calculations.* //Proc. supplement of 2nd Weakly Ionized Gases Workshop. Waterside Marriott Hotel, Norfolk, Virginia, USA, 24-25 April, 1998, p. 309-338.