

На правах рукописи



Еськин Василий Алексеевич

**ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ
ВОЛН СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА В
ЗАМАГНИЧЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ
КАНАЛАХ ПРИ НАЛИЧИИ
СТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
А. В. Кудрин

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Н. С. Беллюстин,
доктор физико-математических наук,
профессор В. Г. Гавриленко

Ведущая организация: Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Защита состоится «23» июня 2010 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского, расположенном по адресу:
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «20» мая 2010 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н., доцент



В. В. Черепенников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования

Интерес к проблеме возбуждения и распространения свистовых волн (вистлеров) в замагниченных цилиндрических плазменных структурах обусловлен важной ролью, которую эти волны играют во многих фундаментальных физических процессах в околоземной плазме, а также ряде приложений, связанных, в частности, с так называемыми геликонными высокочастотными (ВЧ) разрядами. Такие разряды, сопровождающиеся формированием плазменно-волноводных каналов в лабораторных условиях, считаются в настоящее время весьма эффективными источниками плотной низкотемпературной плазмы и могут поддерживаться при сравнительно малых внешних постоянных магнитных полях и удельных вкладах мощности. Значимость выбранного направления исследований определяется также необходимостью развития методов активного воздействия на ионосферу и магнитосферу Земли, получивших в последнее время достаточно широкое распространение.

Следует отметить, что подавляющее большинство теоретических работ, посвящённых возбуждению и распространению свистовых волн в цилиндрических плазменных каналах, расположенных в свободном пространстве или фоновой магнитоактивной плазме, относятся к случаю, когда столкновительные потери в плазменной среде отсутствуют. Случай сравнительно малых столкновительных потерь, не приводящих к значительным изменениям дисперсионных характеристик и структуры полей волн, обсуждался в ряде работ лишь применительно к некоторым конкретным вопросам каналированного распространения вистлеров. Однако детальное исследование возбуждения и распространения свистовых волн в таких каналах при наличии столкновительных потерь ранее не проводилось. К сказанному необходимо добавить, что в литературе, посвящённой теоретическому изучению разрядов геликонного типа, по существу отсутствует рассмотрение их структуры в рамках самосогласованного подхода. Отсутствие детальных исследований по указанной проблематике не позволяет уяснить особенности возбуждения и распространения свистовых волн в открытых замагниченных плазменных волноводах с потерями, ограничивает возможности совершенствования характеристик ВЧ разрядов во внешнем постоянном магнитном поле и сдерживает развитие соответствующих приложений.

Отмеченные обстоятельства делают исследование влияния столкновительных потерь на возбуждение и распространение свистовых волн в замагниченных плазменных каналах, а также разработку самосогласованной модели ВЧ разряда, поддерживаемого электромагнитным источником свистового диапазона во внешнем постоянном магнитном поле, весьма актуальными.

Цели диссертационной работы

Указанные выше обстоятельства позволяют сформулировать следующие цели настоящей диссертационной работы:

1. Теоретическое исследование влияния столкновительных потерь в плазме на дисперсионные свойства и структуру полей мод свистового диапазона, направляемых замагниченными плазменными каналами, расположенными в свободном пространстве или фоновой магнитоактивной плазме.

2. Изучение влияния неоднородности плазмы в канале на дисперсионные свойства и структуру полей поддерживаемых им мод при наличии столкновительных потерь.

3. Анализ влияния столкновительных потерь на особенности возбуждения свистовых волн заданными источниками при наличии однородных и неоднородных плазменно-волноводных каналов.

4. Теоретическое исследование самосогласованной структуры осесимметричного высокочастотного разряда геликонного типа, поддерживаемого заданным электромагнитным источником свистового диапазона частот.

Научная новизна

Научная новизна работы определяется полученными оригинальными результатами и заключается в следующем:

1. Исследовано влияние столкновительных потерь на возбуждение и распространение волн свистового диапазона, направляемых ориентированным вдоль внешнего постоянного магнитного поля цилиндрическим плазменным столбом, расположенным в свободном пространстве.

2. Изучено влияние столкновительных потерь в плазме на возбуждение и распространение волн свистового диапазона, направляемых диктом с повышенной плотностью, расположенным в фоновой магнитоактивной плазменной среде параллельно направлению внешнего постоянного магнитного поля.

3. Разработана теоретическая модель, позволяющая исследовать стационарную самосогласованную структуру осесимметричного высокочастотного разряда, поддерживаемого заданным электромагнитным источником свистового диапазона при наличии внешнего постоянного магнитного поля, в условиях, когда характерный пространственный масштаб электронной теплопроводности поперёк внешнего магнитного поля существенно превышает радиус разрядной трубки. На основе разработанной модели разряда найдены зависимости его характеристик от параметров источника.

Научная и практическая значимость результатов работы

В научном плане выполненные исследования дают основу для более глубокого понимания направляющих свойств открытых замагниченных плазменных структур, расположенных как в изотропных, так и в магнитоактивных средах, влияния таких систем на эффективность находящихся в них элект-

ромагнитных источников, а также механизмов поглощения волн свистового диапазона в неоднородной магнитоактивной плазме. В связи с этим, полученные результаты представляют интерес для анализа работы высокочастотных индукционных источников плазмы при наличии внешнего постоянного магнитного поля. Выполненные исследования могут быть использованы для интерпретации результатов модельных лабораторных и натуральных ионосферных экспериментов по возбуждению и распространению свистовых волн при наличии замагниченных плазменных каналов, а также для объяснения особенностей формирования разрядных структур в установках, предназначенных для получения плотной низкотемпературной плазмы.

Результаты диссертации могут представлять интерес для следующих научно-исследовательских учреждений: ИПФ РАН, ИКИ РАН, ИЗМИР РАН, НИРФИ, МФТИ, МГУ.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Учёт сравнительно малых диссипативных потерь, обусловленных электронными соударениями в плазме, может приводить к существенным изменениям дисперсионных характеристик и структуры полей свистовых мод, направляемых замагниченным плазменным столбом, расположенным в свободном пространстве, либо дактом с повышенной плотностью, находящимся в фоновой магнитоактивной плазменной среде, по сравнению со случаем бесстолкновительной плазмы. Начиная с некоторого значения эффективной частоты электронных соударений имеет место селекция мод по постоянным затухания, проявляющаяся в том, что моды разделяются на слабозатухающие с преимущественно крупномасштабной геликонной структурой поля и сильнозатухающие, в отдельные компоненты полей которых основной вклад даёт мелкомасштабная квазиэлектростатическая составляющая.

2. При разделении свистовых мод цилиндрических плазменных структур, расположенных в свободном пространстве или фоновой магнитоактивной плазме, на слабо- и сильнозатухающие имеет место селекция мод по эффективности возбуждения, заключающаяся в том, что амплитуды слабозатухающих мод существенно превышают амплитуды сильнозатухающих мод в случае их возбуждения заданным источником в виде кольцевого электрического тока, находящегося внутри направляющей структуры. При этом основная доля мощности, расходуемой источником сравнительно большого радиуса b , удовлетворяющего условию $b \gg c/\omega_p$, где ω_p — плазменная частота электронов, c — скорость света в вакууме, идёт в собственные моды, поддерживаемые такими направляющими системами.

3. Учёт неоднородности распределения плазмы поперёк внешнего магнитного поля не сказывается существенно на характере влияния столкновительных потерь на свойства свистовых мод, направляемых цилиндрическими

плазменными структурами, расположенными в свободном пространстве или фоновой магнитоактивной плазме.

4. Предложенная в диссертации теоретическая модель осесимметричного высокочастотного разряда, поддерживаемого во внешнем магнитном поле электромагнитным источником свистового диапазона в виде волны тока, бегущей с заданной постоянной распространения по поверхности разрядной трубки вдоль её образующей, позволяет исследовать стационарную самосогласованную структуру разряда в случае, когда характерный пространственный масштаб электронной теплопроводности поперёк внешнего магнитного поля существенно превышает радиус трубки. Плотность плазмы в таком разряде представляет собой неоднозначную функцию амплитуды тока, характеризующуюся наличием одной неустойчивой и двух устойчивых ветвей.

Апробация работы и публикации

Материалы диссертации докладывались на Международных конференциях «Days on Diffraction» (Санкт-Петербург, Россия, 2005, 2007 гг.), 13-м Международном конгрессе по физике плазмы (Киев, Украина, 2006 г.), 28-й Международной конференции по явлениям в ионизованных газах (Прага, Чехия, 2007 г.), XXIX-й Генеральной ассамблее УРСИ (Чикаго, США, 2008 г.), 10-й Международной конференции по интегральным методам в науке и технике (Сантадер, Испания, 2008 г.), 11-й — 13-й Нижегородских сессиях молодых ученых (Нижний Новгород, 2006–2008 гг.), Научных конференциях ННГУ по радиофизике (Нижний Новгород, 2005–2007 гг.).

Основные результаты диссертации опубликованы в 20 научных работах, в том числе 5 статьях в международных и российских научных журналах из списка ВАК [1–5], 8 работах в трудах международных и российских конференций [6–13], 7 тезисах докладов научных конференций [14–20].

Личный вклад автора

Диссертант принимал непосредственное участие в постановке задач, построении теоретических моделей, проведении аналитических и численных расчётов, а также обсуждении и интерпретации результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и изложена на 148 страницах, включая 57 рисунков и 2 таблицы. Список цитированной литературы содержит 101 наименование и занимает 9 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** кратко освещено современное состояние исследований по теме диссертации и обоснована её актуальность, сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна полученных результатов, кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава посвящена исследованию влияния столкновительных потерь на возбуждение и распространение волн свистового диапазона в продольно замагниченном плазменном столбе, расположенном в свободном пространстве.

В разделе 1.1 представлены основные соотношения, описывающие магнитоактивную плазменную среду. В частности, приведены выражения для компонент тензора диэлектрической проницаемости холодной магнитоактивной плазмы применительно к различным частным случаям, обсуждаются дисперсионные свойства и поверхности показателей преломления нормальных волн бесстолкновительной магнитоактивной плазмы в свистовом диапазоне частот.

В разделе 1.2 исследуется распространение волн свистового диапазона частот в плазменном столбе, расположенном в свободном пространстве, при наличии столкновительных потерь.

В §1.2.1 записана общая система дифференциальных уравнений для продольных компонент поля при наличии замагниченного плазменного столба. Даны выражения, связывающие поперечные и продольные компоненты поля. Приводятся формулы для компонент полей мод внутри однородного плазменного столба и в окружающем его свободном пространстве. Записано дисперсионное уравнение, позволяющее определить постоянные распространения мод такой волноводной структуры.

В следующем §1.2.2 проводится обсуждение типов мод, направляемых однородным плазменным столбом в свободном пространстве в свистовом диапазоне частот. Отмечается, что в зависимости от характера распределения поля внутри столба направляемые моды могут быть разбиты на три группы — поверхностные, объёмные и объёмно-поверхностные.

В §1.2.3 исследуются дисперсионные свойства и структура полей объёмных мод однородного плазменного столба. Для мод, постоянные распространения которых существенно превышают по абсолютному значению постоянную распространения волн конической рефракции, получено приближённое дисперсионное уравнение, допускающее в ряде случаев аналитическое решение. Представлены результаты численных расчётов дисперсионных зависимостей объёмных мод при отсутствии и наличии столкновительных потерь в плазме. Кроме того, для этих мод приведены зависимости постоянных распространения и постоянных затухания от эффективной частоты соударений

электронов. Показано, что начиная с некоторого значения эффективной частоты электронных соударений происходит разделение мод на слабо- и сильнозатухающие. Приведены структуры полей объёмных мод при отсутствии и наличии столкновительных потерь. Отмечено, что в случае бесстолкновительной плазмы в компонентах полей мод присутствуют геликонная и квазиэлектростатическая составляющие, имеющие объёмный характер. При наличии столкновений в плазме объёмный характер распределения по радиусу в слабозатухающих модах имеет лишь геликонная составляющая поля, а квазиэлектростатическая составляющая имеет поверхностный характер. Что касается сильнозатухающих мод, то в их поля преобладающий вклад даёт объёмная квазиэлектростатическая составляющая.

Дисперсионные свойства и структуры полей поверхностных мод изучаются в §1.2.4. На основании численного исследования дисперсионного уравнения показано, что для фиксированного азимутального индекса плазменный столб в свободном пространстве может поддерживать не более одной поверхностной моды. В качестве примера приведены дисперсионные кривые и распределения компонент поля азимутально-симметричной поверхностной моды. Отмечается, что поле данной моды, имеющее квази-ТЕМ поляризацию, сильно «прижато» изнутри столба к его границе и слабо локализовано снаружи столба. В результате учёт столкновительных потерь слабо сказывается на свойствах данной моды.

В следующем §1.2.5 рассматриваются дисперсионные характеристики и структуры полей мод замагниченного плазменного столба при одновременном учёте теплового движения электронов и столкновительных потерь. Сопоставляются вклады, обусловленные тепловым движением электронов и столкновительными потерями, в постоянные затухания мод. Показано, что в данном случае так же, как и при учёте лишь столкновительных потерь, происходит селекция мод по постоянным затуханиям.

В §1.2.6 обсуждаются моды неоднородного плазменного столба при наличии столкновительных потерь. На основании численных расчётов, проведённых для модельного профиля плотности плазмы в столбе, сделан вывод, что учёт неоднородности распределения плазмы поперёк внешнего магнитного поля не сказывается существенно на характере влияния столкновительных потерь на свойства свистовых мод, направляемых цилиндрическими плазменными структурами, расположенными в свободном пространстве.

В разделе 1.3 исследуются особенности возбуждения волн свистового диапазона частот в плазменном столбе, расположенном в свободном пространстве, при наличии столкновительных потерь.

В §1.3.1 обсуждается постановка задачи о возбуждении свистовых волн гармоническим во времени азимутально-симметричным электрическим током в открытом замагниченном плазменном волноводе, расположенном в сво-

бодном пространстве. Возбуждаемое поле ищется в виде разложения по собственным волнам плазменного столба.

В §1.3.2 рассматривается система собственных волн замагниченного плазменного столба в свободном пространстве. Обсуждаются различные способы построения системы ортогональных собственных волн открытых волноводов (см. Шевченко В. В. Плавные переходы в открытых волноводах. М: Наука, 1969; Маненков А. Б. Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24, №1. С. 60–69; Kondrat'ev I. G., Kudrin A. V., Zaboronkova T. M. *Electrodynamics of density ducts in magnetized plasmas*. Amsterdam: Gordon and Breach, 1999). Записаны выражения для полей волн дискретной и непрерывной частей спектра замагниченного плазменного столба в свободном пространстве. Представлены соотношения ортогональности для данных волн, получаемые из леммы Лоренца в транспонированном виде. Далее найдено полное поле источника в виде разложения по волнам дискретной и непрерывной частей спектра. Полученное представление поля в виде разложения по системе собственных волн сопоставлено с представлением в виде разложения в интеграл Фурье по продольному волновому числу.

В следующем §1.3.3 приводятся формулы для коэффициентов возбуждения волн дискретной и непрерывной частей спектра и получены выражения для сопротивления излучения заданного источника в виде кольцевого электрического тока.

В §1.3.4 исследуется влияние столкновительных потерь на сопротивление излучения кольцевого электрического тока при наличии плазменного столба. Приведены результаты численных расчётов сопротивления излучения данного источника, демонстрирующие влияние столкновительных потерь на полное сопротивление излучения источника и на парциальные сопротивления излучения в отдельные собственные моды (волны дискретной части спектра) и волны непрерывной части спектра. Показано, что при разделении мод на сильно- и слабозатухающие имеет место их селекция по эффективности возбуждения, заключающаяся в том, что амплитуды слабозатухающих мод существенно превышают амплитуды сильнозатухающих мод.

В §1.3.5 приводятся распределения объёмной плотности мощности джоулевых потерь в плазменном столбе для различных значений радиуса источника и частоты электронных соударений. Показано, что мощность джоулевых потерь максимальна в непосредственной окрестности источника, а также на границе плазмы и свободного пространства.

В заключительном разделе 1.4 первой главы сформулированы основные выводы, вытекающие из проведенного в ней рассмотрения.

Вторая глава посвящена исследованию особенностей возбуждения и распространения волн свистового диапазона в дактах с повышенной плотностью при наличии столкновительных потерь.

В разделе 2.1 представлены основные соотношения для дакта с повышенной плотностью. В частности, приведены выражения для компонент тензора диэлектрической проницаемости холодной магнитоактивной плазмы и распределение плотности плазмы при наличии дакта. Применительно к рассматриваемому случаю далее обсуждаются представления полей мод, направляемых дактом, и приведены выражения для компонент полей внутри и вне однородного дакта. Представлено строгое дисперсионное уравнение для мод, направляемых таким дактом. Описывается процедура численного определения дисперсионных характеристик и полей мод в случае неоднородного дакта.

В разделе 2.2 обсуждаются типы мод свистового диапазона, направляемых дактом с повышенной плотностью, исследуются их дисперсионные свойства и структура поля.

В §2.2.1 дана классификация мод, направляемых дактом с повышенной плотностью. Отмечается, что в свистовом диапазоне частот такой дакт при отсутствии потерь может направлять не более одной собственной поверхностной моды с фиксированным азимутальным индексом, поле которой локализовано вблизи границы дакта, а также несобственные (вытекающие) моды, поля которых внутри дакта имеют объёмный характер.

В §2.2.2 исследуется влияние столкновительных потерь на дисперсионные свойства мод дакта. Вначале рассматриваются собственные поверхностные моды. Показано, что наличие столкновительных потерь внутри и/или вне дакта не приводит к существенным изменениям свойств мод данного типа. Приведены результаты численных расчётов, иллюстрирующие этот вывод.

Далее получено приближённое дисперсионное уравнение для объёмных мод, которое используется при анализе и объяснении результатов численного решения строгого дисперсионного уравнения, и приведены найденные численно зависимости постоянных распространения и затухания мод от частоты поля и эффективной частоты электронных соударений применительно к случаю, когда её значения внутри и вне дакта являются одинаковыми. Из результатов расчётов следует, что начиная с некоторого значения эффективной частоты соударений имеют место качественные изменения в поведении дисперсионных зависимостей объёмных мод: моды дакта разделяются на слабо- и сильнозатухающие, причём слабозатухающие моды становятся собственными модами дакта, в то время как сильнозатухающие моды в зависимости от радиального индекса и значения эффективной частоты соударений могут являться как локализованными, так и нелокализованными (вытекающими). Локализация мод связана с наличием потерь в плазменной среде, окружающей дакт.

Рассмотрению структуры полей объёмных мод посвящён §2.2.3. Отмеченные в §2.2.2 особенности поведения мод наглядно иллюстрируются приведёнными здесь пространственными распределениями полей в зависимости от

уровня столкновительных потерь в плазме. Из представленных данных следует, что слабо- и сильнозатухающие моды с близкими значениями постоянных распространения, имеют совершенно различные структуры полей в отличие от случая, когда столкновительные потери отсутствуют и моды с близкими значениями постоянных распространения имеют сходные распределения полей.

В §2.2.4 исследуются моды, направляемые неоднородным дактом плотности при наличии столкновительных потерь. Для модельного распределения плотности плазмы построены распределения компонент полей мод по радиальной координате. Сравнение результатов, полученных для однородного и неоднородного дактов плотности, показывает, что переход к случаю неоднородного дакта не приводит к каким-либо принципиальным отличиям в особенностях влияния столкновительных потерь на поведение дисперсионных характеристик и структуры полей мод по сравнению со случаем однородного дакта плотности.

Раздел 2.3 посвящён проблеме возбуждения волн свистового диапазона частот в столкновительной магнитоактивной плазме при наличии дактов в повышенной плотностью плазмы.

В §2.3.1 обсуждается постановка задачи о возбуждении дакта плотности кольцевым электрическим током. Записаны уравнения для поля, а также граничные условия и условия на бесконечности, необходимые для получения системы собственных волн дакта со смешанным (дискретно-непрерывным) спектром.

В §2.3.2 рассчитаны коэффициенты возбуждения волн дискретной и непрерывной частей спектра при наличии дакта плотности. Здесь же приведены выражения для компонент поля кольцевого электрического тока в виде разложения по волнам дискретной и непрерывной частей спектра.

В следующем §2.3.3 анализируются поле и сопротивление излучения кольцевого электрического тока при наличии дакта плотности в столкновительной магнитоактивной плазме. Обсуждается поведение различных членов, входящих в разложения поля по собственным волнам дакта, в зависимости от эффективной частоты соударений электронов в плазме. Далее записаны выражения для сопротивления излучения источника в виде суммы парциальных сопротивлений излучения в отдельные собственные моды и волны дискретной части спектра.

В §2.3.4 приведены результаты численных расчётов сопротивления излучения кольцевого электрического тока при наличии дакта плотности в столкновительной магнитоактивной плазме. Показано, что учёт относительно небольших столкновительных потерь приводит к незначительному увеличению полного сопротивления излучения источника по сравнению со случаем бесстолкновительной плазмы. В то же время появление столкновительных

потерь сопровождается существенным перераспределением расходуемой источником мощности между направляемыми дактом модами. В частности, при разделении таких мод на слабо- и сильнозатухающие имеет место их селекция по эффективности возбуждения, проявляющаяся в том, что амплитуды слабозатухающих мод значительно превышают амплитуды сильнозатухающих мод. Найдены условия, при которых мощность, идущая в волны непрерывной части спектра, оказывается незначительной по сравнению с мощностью, расходуемой на возбуждение направляемых мод.

Выводы по второй главе сформулированы в разделе 2.4.

В **третьей** главе исследуется стационарная структура осесимметричного высокочастотного разряда, поддерживаемого электромагнитным источником свистового диапазона частот во внешнем постоянном магнитном поле.

В разделе 3.1 записаны уравнения баланса плотности и баланса энергии, а также уравнения для поля источника, представляющего собой волну тока, бегущую с заданной постоянной распространения по поверхности разрядной трубки вдоль её образующей. Здесь же обосновываются условия, используемые для упрощения описания характеристик разряда.

Раздел 3.2 посвящён обсуждению распределений поля и плазмы в разряде. Найден профиль плотности плазмы в случае, когда характерный пространственный масштаб электронной теплопроводности поперёк внешнего магнитного поля существенно превышает радиус разрядной трубки. Записаны распределения поля внутри и вне разрядной трубки. Применительно к разряду высокого давления описывается способ отыскания значения плотности плазмы на оси симметрии разряда численными методами.

В разделе 3.3 приводятся результаты численных расчётов плотности плазмы в зависимости от постоянной распространения и плотности тока источника. Показано, что плотность плазмы на оси симметрии разряда представляет собой неоднозначную функцию амплитуды тока источника, характеризующуюся наличием одной неустойчивой и двух устойчивых ветвей. Здесь же получены распределения полного поля и мощности джоулевых потерь в разрядной плазме поперёк внешнего магнитного поля для различных значений параметров источника.

Выводы по главе сформулированы в разделе 3.4.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Исследовано влияние диссипативных потерь, обусловленных электронными соударениями в плазме, на дисперсионные свойства и структуру полей мод свистового диапазона, направляемых замагниченным плазменным столбом, расположенным в свободном пространстве, и дактом с повышенной плотностью, находящимся в фоновой магнитоактивной плазменной среде. Показано, что наличие сравнительно малых столкновительных потерь может иметь принципиальное значение и приводить к заметным изменениям дисперсионных характеристик и структуры полей объёмных мод свистового диапазона, направляемых такими плазменными образованиями по сравнению со случаем бесстолкновительной плазмы. При этом моды разделяются на слабозатухающие с преимущественно крупномасштабной геликонной структурой поля и сильнозатухающие, в отдельные компоненты полей которых основной вклад даёт мелкомасштабная квазиэлектростатическая составляющая.

2. Установлено, что наличие сравнительно малых столкновительных потерь не сказывается существенно на свойствах поверхностных мод, направляемых рассмотренными плазменными волноводами в свистовом диапазоне частот.

3. Определены условия, при которых учёт теплового движения электронов не приводит к принципиальным изменениям дисперсионных характеристик и структуры полей мод изученных направляющих систем по сравнению со случаем наличия лишь столкновительных потерь в плазме.

4. Показано, что учёт неоднородности распределения плазмы поперёк внешнего магнитного поля не сказывается существенно на характере влияния столкновительных потерь на свойства свистовых мод, направляемых цилиндрическими плазменными структурами, расположенными в свободном пространстве или фоновой магнитоактивной плазме.

5. Исследовано влияние столкновительных потерь на особенности возбуждения свистовых волн заданными источниками при наличии плазменно-волноводных каналов, расположенных в свободном пространстве или фоновой магнитоактивной плазме. Установлено, что при разделении мод таких плазменных структур на слабо- и сильнозатухающие имеет место селекция мод по эффективности возбуждения, проявляющаяся в том, что амплитуды слабозатухающих мод значительно превышают амплитуды сильнозатухающих мод в случае из возбуждения заданным источником в виде кольцевого электрического тока.

6. Показано, что при возбуждении волн свистового диапазона в замагниченном канале, представляющем собой плазменный столб в свободном пространстве или дакт с повышенной плотностью, находящимся внутри него кольцевым электрическим током с достаточно большим радиусом b , удовлетворяющим условию $b \gg c/\omega_p$, где ω_p — плазменная частота электронов в

канале, c — скорость света в вакууме, основная доля мощности, расходуемой источником, идёт в моды, поддерживаемые такой направляющей системой.

7. Предложена теоретическая модель, позволяющая исследовать стационарную самосогласованную структуру осесимметричного высокочастотного разряда, поддерживаемого во внешнем магнитном поле электромагнитным источником свистового диапазона в виде волны тока, бегущей с заданной постоянной распространения по поверхности разрядной трубки вдоль её образующей, в случае, когда характерный пространственный масштаб электронной теплопроводности поперёк внешнего магнитного поля существенно превышает радиус разрядной трубки. В рамках данной модели найдены распределения плазмы и высокочастотного поля в разряде. Изучены зависимости основных характеристик разрядной плазмы от параметров источника.

8. Показано, что плотность плазмы в таком разряде представляет собой неоднозначную функцию тока источника, характеризующуюся наличием одной неустойчивой и двух устойчивых ветвей. Установлено, что в рамках рассмотренной модели разряда основной вклад в высокочастотную мощность, поглощаемую в разрядной плазме, вносит часть поля, связанная с квазиэлектростатическими волнами Трайвелписа–Гоулда.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Kudrin A. V., Es'kin V. A. Whistler wave propagation in a bounded collisional magnetoplasma // *Physica Scripta*. 2006. V. 74, No. 4. P. 425–438.
2. Kudrin A. V., Es'kin V. A., Krafft C., Zaboronkova T. M. Whistler wave excitation by a loop antenna in a bounded collisional magnetoplasma // *Physica Scripta*. 2008. V. 77, No. 5. P. 055501-1–055501-11.
3. Еськин В. А., Заборонкова Т. М., Кудрин А. В. Волны свистового диапазона, направляемые дактами с повышенной плотностью в столкновительной магнитоактивной плазме // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2008. Т. 51, № 1. С. 31–49.
4. Еськин В. А., Кудрин А. В. Возбуждение волн свистового диапазона в столкновительной магнитоактивной плазме при наличии дактов с повышенной плотностью // *Физика плазмы*. 2009. Т. 35, № 9. С. 834–845.
5. Еськин В. А., Кудрин А. В. Стационарная структура высокочастотного разряда, поддерживаемого распределенным электромагнитным источником при наличии внешнего магнитного поля // *ЖЭТФ*. 2010. Т. 137, № 4. С. 797–806.
6. Es'kin V. A., Kudrin A. V., Zaboronkova T. M., Lyakh M. Yu. Damping of whistler modes guided by a lossy anisotropic plasma cylinder // *Days on Diffraction'2005* / Ed. I. V. Andronov. St. Petersburg: St. Petersburg University, 2005. P. 148–162.

7. Еськин В. А., Кудрин А. В. Распространение волн свистового диапазона в плазменных каналах геликонных разрядов // Труды Девятой научной конференции по радиофизике. 7 мая 2005 г. / Ред. А. В. Якимов. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. С. 32–33.
8. Kudrin A. V., Es'kin V. A. Damping of whistler modes guided by cylindrical plasma structures // Proc. of the 13th International Congress on Plasma Physics. Kiev, 2006. P. A162p-1–A162p-4.
9. Es'kin V. A., Kudrin A. V., Zaboronkova T. M. Excitation of whistler modes guided by a lossy anisotropic plasma cylinder // Days on Diffraction'2007 / Ed. I. V. Andronov et al. St. Petersburg: St. Petersburg University, 2007. P. 160–166.
10. Kudrin A. V., Es'kin V. A. Excitation of whistler modes by a loop antenna in helicon discharge plasmas // Proc. of the 28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases. Prague, 2007. P. 2043–2046.
11. Еськин В. А., Кудрин А. В. Распространение волн свистового диапазона в дактах плотности при наличии диссипативных потерь // Труды Одиннадцатой научной конференции по радиофизике. 7 мая 2007 г. / Ред. А. В. Кудрин, А. В. Якимов. Н. Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 2007. С. 7–8.
12. Es'kin V. A., Kudrin A. V., Zaboronkova T. M. Whistler wave excitation in axially magnetized cylindrical plasma structures in the presence of collisional losses // Proc. of the XXIXth General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI). Chicago, 2008. P. HP03p5.
13. Es'kin V. A., Bakharev P. V., Kudrin A. V., Zaboronkova T. M. Whistler mode waves guided by magnetic flux tubes in a magnetoplasma // Proc. of the XXIXth General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI). Chicago, 2008. P. HP05p1.
14. Es'kin V. A., Kudrin A. V., Zaboronkova T. M., Lyakh M. Yu. Damping of whistler modes guided by a lossy anisotropic plasma cylinder // International Seminar «Days on Diffraction'2005»: Abstracts. St. Petersburg, 2005. P. 50.
15. Kudrin A. V., Es'kin V. A. Damping of whistler modes guided by cylindrical plasma structures // 13th International Congress on Plasma Physics: Abstracts. Pt. 1. Kiev, 2006. P. 15.
16. Еськин В. А. Электромагнитные волны, направляемые плазменными каналами геликонных разрядов // Одиннадцатая Нижегородская научная сессия молодых ученых: Тез. докл. Н. Новгород, 2006. С. 15.
17. Es'kin V. A., Kudrin A. V., Zaboronkova T. M. Excitation of whistler modes guided by a lossy anisotropic plasma cylinder // International Conference «Days on Diffraction'2007»: Abstracts. St. Petersburg, 2007. P. 30.

18. Еськин В. А. Влияние столкновительных потерь на возбуждение волн свистового диапазона в замагниченном плазменном столбе // Двенадцатая Нижегородская научная сессия молодых ученых: Тез. докл. Н. Новгород, 2007. С. 51–52.
19. Es'kin V. A., Zaboronkova T. M., Kudrin A. V. Using the eigenfunction expansion technique for analysis of antenna fields in cylindrically stratified anisotropic and gyrotropic media // Abstracts of the Tenth International Conference on Integral Methods in Science and Engineering / Ed. E. Pérez, M. Lobo, D. Gomez. Santander, 2008. P. 125.
20. Еськин В. А. Возбуждение волн свистового диапазона в замагниченных плазменных каналах при наличии столкновительных потерь // Тринадцатая Нижегородская научная сессия молодых ученых: Тез. докл. Н. Новгород, 2008. С. 46–47.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение	4
Глава 1. ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА В ЗАМАГНИЧЕННОМ ПЛАЗМЕННОМ СТОЛБЕ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРИ НАЛИЧИИ СТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ	16
1.1. Основные соотношения	16
1.2. Волны свистового диапазона, направляемые цилиндрическим плазменным столбом в свободном пространстве при наличии столкновительных потерь	20
1.2.1. Постановка задачи	20
1.2.2. Типы мод, направляемых плазменным столбом	24
1.2.3. Объёмные моды однородного плазменного столба	26
1.2.4. Поверхностные моды однородного плазменного столба	36
1.2.5. Моды, направляемые однородным плазменным столбом в свободном пространстве при учёте теплового движения электронов	41
1.2.6. Моды неоднородного плазменного столба	42
1.3. Возбуждение волн свистового диапазона в замагниченном плазменном столбе в свободном пространстве при наличии столкновительных потерь	48
1.3.1. Исходные уравнения	48
1.3.2. Волны дискретной и непрерывной частей спектра	50
1.3.3. Поле и сопротивление излучения кольцевого электрического тока	57
1.3.4. Результаты численных расчётов сопротивления излучения кольцевого электрического тока при отсутствии и наличии столкновительных потерь в плазменном столбе	58
1.3.5. Распределение мощности джоулевых потерь в плазменном столбе	67
1.4. Выводы	68
Глава 2. ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА В СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ ПРИ НАЛИЧИИ ДАКТОВ С ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ	71
2.1. Постановка задачи и основные соотношения	72
2.2. Волн свистового диапазона, направляемые дактами с повышенной плотностью в столкновительной магнитоактивной плазме	75

2.2.1. Типы мод, направляемых дактом плотности	75
2.2.2. Дисперсионные характеристики мод	77
2.2.3. Структура полей мод	88
2.2.4. Влияние неоднородности дакта плотности в поперечном направлении на свойства мод	92
2.3. Возбуждение волн свистового диапазона в столкновительной магнитоактивной плазме при наличии дактов в повышенной плотности	98
2.3.1. Постановка задачи о собственных волнах открытой направляющей системы в магнитоактивной плазме	98
2.3.2. Возбуждение волн дискретной и непрерывной частей спектра при наличии дакта плотности	99
2.3.3. Поле и сопротивление излучения кольцевого электрического тока при наличии дакта плотности	102
2.3.4. Результаты численных расчётов сопротивления излучения кольцевого электрического тока	110
2.4. Выводы	116

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ СТРУКТУРЫ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА, ПОДДЕРЖИВАЕМОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИСТОЧНИКОМ СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	120
3.1. Основные уравнения	121
3.2. Распределение поля и плазмы	124
3.3. Результаты численных расчётов характеристик разряда	127
3.4. Выводы	135
Заключение	138
Литература	140

Еськин Василий Алексеевич

**ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ
ВОЛН СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА В
ЗАМАГНИЧЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ
КАНАЛАХ ПРИ НАЛИЧИИ
СТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ**

Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано к печати 14.05.2010. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1. Заказ № 331. Тираж 100 экз.