

На правах рукописи

Савельев Александр Николаевич

**Моделирование распространения
высокочастотных волн в плазме токамака
асимптотическими методами**

01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2009

Работа выполнена в *Учреждении Российской Академии Наук
Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН*

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор М. Д. Токман,
ННГУ им. Н.И.Лобачевского, Нижний Новгород,

доктор физико-математических наук, профессор А. В. Тимофеев,
ИЯС Российский научный центр «Курчатовский институт», Москва,

доктор физико-математических наук, профессор В. А. Рожанский,
СПбГПУ, Санкт-Петербург.

Ведущая организация: *Учреждение Российской Академии Наук
Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова РАН*

Защита состоится 24 декабря 2009г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 при *Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе*, расположенном по адресу: *194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26.*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *ФТИ им. А. Ф. Иоффе.*

Автореферат разослан «_____» _____ 2009 г.

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

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.205.03

кандидат физико-математических наук

Красильщиков А. М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Диссертация посвящена исследованию распространения электромагнитных и плазменных волн в плазме токамака. Описание распространения волн в высокотемпературной плазме является одной из традиционных проблем физики плазмы, интерес к которой связан с исключительно большим разнообразием линейных и нелинейных волновых процессов в плазме, а также с большим прикладным значением для управляемого термоядерного синтеза. Конкретной темой диссертации является моделирование взаимодействия волн с плазмой в нижнегибридном (НГ) и электронном циклотронном (ЭЦ) диапазонах частот. Основные методы дополнительного высокочастотного нагрева плазмы и генерации безындукционного тока увлечения в современных токамаках (кроме ионного циклотронного нагрева) связаны именно с этими диапазонами частот, что и определяет актуальность темы диссертации.

Цели диссертационной работы заключались в моделировании распространения и поглощения волн нижнегибридного и электронного циклотронного частотных диапазонов в неоднородной плазме токамака. Более подробно их можно сформулировать следующим образом:

- Исследование распространения высокочастотных электромагнитных волновых пучков в неоднородной анизотропной плазме токамака с учетом дифракции, рефракции и затухания волн.
- Моделирование электронного бернштейновского нагрева плазмы и генерации тока увлечения в сферическом токамаке.
- Моделирование нижнегибридных токов увлечения в токамаках.
- Описание распространения ионных бернштейновских волн в плазме токамака и расчет спектра рассеяния лазерного излучения на этих волнах.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что в ней:

- разработан новый приближенный метод, названный методом виртуальных пучков (МВП), который описывает дифракцию, рефракцию и поглощение микроволновых пучков произвольной формы в неоднородной анизотропной среде в рамках единой процедуры.
- создан новый эффективный численный код VBTrace, основанный на методе виртуальных пучков и предназначенный для расчета распространения дифрагирующих гауссовых пучков электромагнитных волн в тороидальной плазме в электронном циклотронном диапазоне частот.
- впервые численно продемонстрированы средствами метода виртуальных пучков два тонких эффекта:
 - изменение направления распространения микроволнового пучка из-за неоднородного электронного циклотронного поглощения (новый эффект),
 - тороидальное пространственное уширение X-поляризованного пучка электромагнитных волн вблизи поверхности ЭЦР, обусловленное явлением фильтрации волн пучка через зону ЭЦ резонанса (подтверждение ожидаемого эффекта).
- получено два новых приближенных представления (асимптотическое и интерполяционное) релятивистского дисперсионного соотношения для электронных бернштейнских волн (ЭБВ), дополняющих друг друга, применимых при любых значениях продольного показателя преломления волны, обладающих высокой точностью и являющихся простыми и компактными.
- на основе этих приближенных формул создан новый численный лучевой код для моделирования распространения и поглощения электрон-

ных бернштейновских волн в токамаке, работающий очень быстро и эффективно. Скорость вычислений этого кода значительно превышает (на два порядка величины и более) скорости вычислений всех известных в настоящее время лучевых кодов, предназначенных для расчета распространения ЭБВ в токамаке.

- впервые было успешно осуществлено объединение нижнегибридного лучевого кода с транспортными кодами, которое дало возможность быстро (за несколько минут) проводить самосогласованные расчеты по НГ нагреву и генерации тока увлечения на обычном компьютере (рабочей станции) с одним процессором.
- при помощи модернизированного кода FRTC обнаружен сильный синергетический эффект взаимодействия различных частей спектра начальных продольных замедлений НГ волн на токамаке ФТ-2.
- получено новое компактное и простое приближенное дисперсионное соотношение для ионных бернштейновских волн (ИБВ) в неоднородной плазме при произвольной ионной функции распределения.
- создан новый эффективный численный код, основанный на новой форме дисперсионного соотношения ИБВ и предназначенный для расчета спектров коллективного рассеяния лазерного излучения на спонтанных тепловых флуктуациях ИБВ.

Практическая значимость. Новый подход (метод виртуальных пучков), разработанный в диссертации, позволяет быстро и с высокой точностью рассчитывать распространение высокочастотных пучков электромагнитных волн в неоднородной анизотропной среде, поэтому МВП может служить хорошей альтернативой другим известным методам расчета микроволновых пучков в многочисленных и практически важных приложениях.

Два новых приближенных, но весьма точных представления релятивистского дисперсионного уравнения для электронных бернштейновских волн позволяют увеличить скорость расчетов лучей ЭБВ на порядки. Такими же свойствами обладает и новая форма дисперсионного соотношения для ионных бернштейновских волн, также полученная в диссертации.

Созданные диссертантом высокоэффективные численные коды для ЭБВ и НГ волн успешно использовались в течение многих лет и продолжают быть востребованными для планирования и интерпретации экспериментов на токамаках JET, FTU, MAST, ITER, ФТ-2 и Глобус-М.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Новый подход (метод виртуальных пучков) для приближенного описания распространения микроволновых пучков в неоднородной анизотропной среде с учетом дифракции, рефракции и поглощения волн.
2. Впервые осуществленная численная демонстрация средствами метода виртуальных пучков двух тонких эффектов:
 - нового эффекта изменения направления распространения микроволнового пучка из-за неоднородного электронного циклотронного поглощения,
 - ожидаемого тороидального пространственного уширения Х-поляризованного пучка электромагнитных волн вблизи поверхности ЭЦР, обусловленного явлением фильтрации волн пучка через зону ЭЦ резонанса.
3. Два новых приближенных представления для релятивистского дисперсионного соотношения потенциальных электронных бернштейновских волн, дополняющих друг друга, применимых при любых значениях продольного показателя преломления волны и обладающих высокой точностью и простотой.

4. Результаты исследования роли альфа-частиц в поглощении НГ мощности в токамаке ITER для различных НГ частот, на основе которых были выработаны рекомендации по выбору частоты для НГ комплекса токамака ITER.
5. Новое приближенное дисперсионное соотношение для потенциальных ионных бернштейновских волн, применимое при произвольной физически разумной функции распределения ионов по скоростям, учитывающее неоднородность магнитного поля и отличающееся высокой точностью и простотой.
6. Результаты расчетов спектра коллективного рассеяния лазерного излучения на спонтанных тепловых флуктуациях ионных бернштейновских волн в плазме токамака, проведенных для демонстрации возможностей новой диагностики быстрых ионов (альфа-частиц).
7. Высокоэффективные численные коды, работающие существенно быстрее известных аналогов (вплоть до двух порядков величины и более) и предназначенные для моделирования распространения нижнегибридных волн, электронных бернштейновских волн, ионных бернштейновских волн, для расчета спектров коллективного рассеяния лазерного излучения на ионных бернштейновских волнах, а также код VBTrace для расчета дифрагирующих гауссовых пучков электромагнитных волн в плазме токамака по методу виртуальных пучков.

Апробация работы. Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих Международных конференциях: 36th ICOPS-SOFE (2009, Сан Диего, США); SMSA (2008, Нижний Новгород); SMWP (2000, Нижний Новгород); RF-18 (2009, Гент, Бельгия); RF-15 (2003, Моран, США); Joint Varenna-Lausanne International Workshop (2006, Варенна, Ита-

лия); ST Workshop ISTW-2006 (Ченгду, Китай); ST Workshop 2003 (Абингдон, Англия) IAEA-2006 (Ченгду, Китай); EPS-34 (2007, Варшава, Польша); EPS-32 (2005, Таррагона, Испания); EPS-31 (2004, Лондон, Англия); EPS-30 (2003, Санкт-Петербург); EPS-28 (2001, Фуншал, Португалия); EPS-25 (1998, Прага, Чехия); ЕС-15 (2008, Калифорния, США); ЕС-14 (2006, Санторин, Греция); ЕС-13 (2004, Нижний Новгород); ЕС-12 (2002, Прованс, Франция).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 56 печатных работах, из них 25 статей в рецензируемых журналах [А1–А25] и 31 публикация в сборниках трудов конференций [А26–А56].

Личный вклад автора. Все изложенные в диссертации новые результаты получены при личном участии автора. Шесть работ по материалам диссертации были выполнены без соавторов. В совместных оригинальных работах все приведенные в диссертации результаты численных расчетов были либо получены автором диссертации, либо обеспечены его технической поддержкой и консультациями для соавторов, использовавших разработанные диссертантом численные коды. При этом автор также активно участвовал в разработке концепции, математической постановке задачи и в получении аналитических решений. В совместных публикациях с большим числом соавторов, посвященных обзорам исследований на крупных токамаках, использовались результаты расчетов автора диссертации.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из четырех глав, введения и заключения. Общий объем диссертации 267 страниц, включая 112 рисунков и список литературы из 199 наименований.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана

практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе диссертации последовательно излагается новый подход (метод виртуальных пучков) для приближенного описания распространения высокочастотных волновых пучков в неоднородной анизотропной среде с учетом дифракции, рефракции и поглощения волн, а также описывается численный код `VBTrase`, основанный на МВП и предназначенный для расчета распространения и поглощения гауссовых пучков в плазме токамака в электронном циклотронном диапазоне частот. Метод виртуальных пучков основан на том обстоятельстве, что параметры равновесной плазмы мало изменяются на расстояниях порядка длины волны микроволнового излучения, что позволяет, в принципе, использовать ВКБ подход для вычисления электрического поля пучка волн. Главным недостатком ВКБ приближения является то, что оно не учитывает эффекты дифракции, что может приводить к сильному отличию приближенного ВКБ-решения от точного в дальней волновой зоне, отстоящей от излучающей антенны на расстояние d , которое приблизительно оценивается как $d \geq (\omega/c) D_{ant}^2$. В этой оценке D_{ant} — это диаметр пучка на плоскости антенны, а ω и c — круговая частота волны и скорость света в вакууме. В больших плазменных установках дальняя волновая зона может занимать значительную часть плазменного объема, что не позволяет адекватно описывать волновой пучок в таких условиях при помощи непосредственного применения метода ВКБ. Однако это ограничение на применимость ВКБ приближения связано, по существу, с соотношением между диаметром пучка на антенне и расстоянием, на котором желательно получить правильное решение для электрического поля пучка. Если же представить исходный относительно узкий микроволновой пучок $D_{ant} \ll a$, где a — малый радиус плазмы, в виде суперпозиции гораздо более широких пучков, диаметры D которых удовлетворяют следующему неравенству $(\omega/c) D^2 \gg a$, то ближняя

волновая зона каждого такого широкого виртуального пучка будет включать в себя целиком весь плазменный объем. Поскольку в ближней зоне пучки не подвержены дифракции, то там их с высокой точностью можно описать методом ВКБ. Начальные фазы и амплитуды виртуальных пучков должны быть подобраны таким образом, чтобы их суперпозиция удовлетворяла нужным граничным условиям. Тогда решение для реального пучка будет являться результатом интерференции виртуальных ВКБ-пучков, испытывающих рефракцию и поглощение при распространении в плазме. Эта интерференционная картина будет изменяться по мере заглубления виртуальных пучков в плазму, правильным образом описывая корректное приближенное решение для электрического поля реального дифрагирующего пучка. Очевидно, что решение дифракционной задачи методом виртуальных пучков является естественным обобщением хорошо известного точного решения дифракционной задачи в однородной среде, в котором электромагнитное поле пучка разложено по Фурье вдоль x и z пространственных направлений, а зависимость Фурье-образа от координаты y известна в явном аналитическом виде. Важно отметить, однако, что в методе виртуальных пучков вместо Фурье-разложений используются ВКБ моды, являющиеся приближенными решениями соответствующего волнового уравнения с заданными граничными условиями.

Глава организована следующим образом. Во введении к главе излагаются основные идеи, лежащие в основе нового подхода. Во втором параграфе дается общее математическое описание МВП. Третий параграф посвящен применению МВП в геометрии токамака. В четвертом параграфе дается вывод формул для ВКБ амплитуд виртуальных пучков и для потока вектора Пойнтинга реального волнового пучка через произвольную тороидальную поверхность. Последняя формула является полезной для контроля точности численных расчетов по методу виртуальных пучков.

Пятый параграф посвящен описанию численного кода VVTrace. В коде

VBTgrace учитываются как релятивистское ЭЦР поглощение волн, так и влияние теплового движения электронов на ВКБ лучи в модели Токмана-Вестерхофа [1, 2]. Кроме того, код может работать и в быстром упрощенном режиме, когда релятивистское поглощение волн вычисляется вдоль лучей в модели холодной плазмы, а весь расчет занимает две-три минуты на обычном персональном компьютере. Сравнение расчетов по полной и по упрощенной схемам показало близкие результаты. Там же в пятом параграфе приводятся примеры расчетов для различных физических случаев. При этом было продемонстрировано, что МВП позволяет описывать тонкие детали электрического поля микроволнового пучка в окрестности поверхности ЭЦР. В частности, изменение направления распространения пучка из-за неоднородного ЭЦР поглощения и тороидальное пространственное уширение X-поляризованного электромагнитного пучка вблизи поверхности ЭЦР из-за фильтрации ВКБ мод через зону резонанса, которые были впервые обнаружены в нашей работе [A30] для случая модели холодной плазмы с нерелятивистским поглощением, были подтверждены релятивистскими расчетами данного параграфа. Код VBTgrace был протестирован на примере распространения O-поляризованного пучка в плазме ITER Scenario 2, подробно описанного в работе [3], посвященной сравнению всех наиболее известных электронно-циклотронных численных кодов. Сравнение предсказаний VBTgrace с соответствующими расчетами [3] показало хорошее соответствие между ними. Также код VBTgrace был успешно протестирован при помощи полноволнового кода [4, 5] и успешно применялся для интерпретации экспериментов в работах [A8, A29].

В выводах к первой главе отмечено, что метод виртуальных пучков является хорошим приближенным подходом к решению задачи о распространении дифрагирующих пучков в неоднородной среде, поскольку он простой и достаточно точный для большинства возможных приложений. Кроме того, МВП не имеет ограничений ни по начальной форме ВЧ пучка, ни по симметрии

плазмы, и может быть применен для любой неоднородной анизотропной среды.

Результаты первой главы опубликованы в работах [A1, A26–A31].

Во второй главе диссертации описываются методы и подходы, использованные и развитые диссертантом для решения задач, возникающих при моделировании электронного бернштейновского нагрева плазмы и генерации тока увлечения в сферическом токамаке.

В первом параграфе для полноты и связности изложения приведены основные результаты одномерной теории ЭМВ→ЭБВ трансформации [6, 7], которые были положены в основу численного кода для решения задачи о ЭМВ→ЭБВ трансформации в рамках созданного диссертантом пакета численных программ EBWH&CD [A3].

Во втором параграфе получено новое приближенное релятивистское дисперсионное уравнение для потенциальных электронных бернштейновских волн в максвелловской плазме. Это уравнение, которое называется в диссертации асимптотическим из-за использования асимптотик функций Бесселя при его выводе, справедливо для произвольной величины продольного показателя преломления. В области своей применимости $N_{\perp} \gg 1$, $k_{\perp} \rho_{Te} = qN_{\perp} / \sqrt{\mu} \gg 1$ для условий лабораторной плазмы $\mu = m_e c^2 / T_e \approx 500 / T_e (keV) \gg 1$ полученные приближенные формулы хорошо воспроизводят точные результаты и при этом являются простыми и удобными для численного моделирования распространения ЭБВ в плазме. Однако, эти асимптотические формулы обладают и некоторыми недостатками, а именно: в узкой окрестности электронных циклотронных гармоник они содержат слабую логарифмическую сингулярность в эрмитовой части и соответствующий разрыв непрерывности в антиэрмитовой части диэлектрической проницаемости, которые являются следствием использования неаналитических асимптотических выражений [A5], примененных для их вывода.

Эти недостатки преодолеваются в третьем параграфе второй главы, где излагается другой метод вывода [A2] приближенного релятивистского дисперсионного уравнения ЭБВ в максвелловской плазме. Следует подчеркнуть, что этот второй подход, который можно назвать интерполяционным из-за его специфики, не отменяет результаты предыдущего, а скорее дополняет и развивает их. Полученное при этом приближенное релятивистское дисперсионное уравнение для потенциальной ЭБВ обладает высокой точностью и пригодно для произвольной величины продольного показателя преломления волны. В отличие от асимптотических формул предыдущего параграфа [A5] и работы [8], интерполяционное дисперсионное уравнение не содержит сингулярностей, что позволяет использовать его в численных расчетах без проблем. По сравнению с точным уравнением, найденная аппроксимация дисперсионного уравнения ЭБВ обеспечивает значительное ускорение расчетов (на два-три порядка и больше). Степень ускорения расчетов зависит главным образом от величины продольного показателя преломления. При этом, чем больше N_{\parallel} , тем быстрее вычисления. Кроме того, новая форма дисперсионного уравнения является более простой и точной, чем асимптотические формулы предыдущего параграфа [A5] и работы [8], а условия применимости нового приближенного подхода – менее строгими, чем в [A5], [8] и легко выполнимыми в плазме токамака.

Четвертый параграф описывает пакет численных программ EBWH&CD для моделирования электронного бернштейновского нагрева и генерации тока в сферических токамаках. Кроме кода для ЭМВ→ЭБВ трансформации, этот пакет программ включает в себя код для расчета распространения и поглощения ЭБВ в лучевом приближении, интерфейсные программы для использования базы данных сферического токамака MAST и кода EFIT, программы для интерполяции равновесной магнитной конфигурации плазмы, а также специально модифицированную и включенную в EBWH&CD версию

кода BANDIT-3D [9], предназначенного для расчета тока увлечения в приближении Фоккера-Планка. Модификация кода BANDIT-3D для сопряжения его с остальными кодами в пакете EBWH&CD проводилась при консультативной помощи М. Р. O'Brien, являющегося основным автором кода BANDIT-3D.

В пятом параграфе собраны результаты численного моделирования экспериментов на токамаках COMPASS-D и MAST, а также приводится исследование по расчету оптимальной схемы для ЭБВ нагрева и генерации тока на будущем токамаке MAST-U. Основные итоги главы подводятся в шестом параграфе.

Результаты второй главы опубликованы в работах [A2–A9, A32–A45].

Третья глава диссертации посвящена моделированию нижнегибридных токов увлечения в токамаках на основе метода лучевых траекторий.

В первом параграфе третьей главе дано краткое изложение глубокой модернизации кода FRTC, используемого для планирования и интерпретации экспериментов по взаимодействию НГ волн с плазмой на токамаках JET, FTU, ITER, T-15, ФТ-2, Глобус-М. Приведены преобразование координат и аналитические формулы, позволяющие модернизированному FRTC проводить вычисления в магнитных конфигурациях с X-точкой. Приведено сравнение между аналитической аппроксимацией и исходной магнитной конфигурацией для токамака JET, демонстрирующее высокую точность используемой в FRTC модели для локального магнитного поля токамака. Также в первом параграфе описана новая процедура обращения со сверхдлинными слабозатухающими лучами. В отличие от первоначальной версии кода, где эти лучи просто отбрасывались, в модернизированном FRTC эта проблема решается иначе – теперь сверхдлинные траектории анализируются на предмет соотношения долей поглощенной мощности по различным каналам, т.е., вследствие затухания Ландау, столкновительного затухания и затухания на быстрых ионах (альфа-частицах). Когда количество радиальных отражений

луча превышает наперед заданное число, то траектория этого луча далее не рассчитывается, а вклады в затухание НГ мощности и в накопление коэффициента диффузии перенормируются таким образом, как будто бы луч был досчитан до полного затухания. Максимальное число позволенных отражений выбирается при этом достаточно большим, чтобы учтенная часть луча была статистически достоверной. На практике правильность выбора этого числа проверяется нечувствительностью результатов вычислений к дальнейшему увеличению максимальных длин траекторий. Также в этом параграфе описана используемая в модернизированном коде FRTC модель взаимодействия быстрых альфа-частиц с НГ волнами. Кроме того, в первом параграфе приведены примеры успешного тестирования этого кода относительно экспериментальных данных и предсказаний других известных НГ кодов, использующих более сложные (двумерные) модели уравнения Фоккера-Планка для описания функции распределения электронов. Показано, что предсказываемый ток увлечения по коду FRTC с простой одномерной моделью этого уравнения хорошо совпадает с результатами расчетов по более сложным кодам, что делает FRTC очень полезным и удобным инструментом для НГ моделирования, поскольку код FRTC работает намного быстрее, чем все остальные известные коды. Уникальное быстродействие FRTC позволило диссертанту объединить его с транспортными кодами ASTRA [10] и JETTO [11], что дает возможность быстро (за несколько минут) проводить самосогласованные расчеты по НГ нагреву и генерации тока увлечения на обычной компьютере (рабочей станции) с одним процессором.

Во втором параграфе третьей главы исследуется поглощение НГ волн альфа-частицами в токамаке ITER для двух частот 3.7 ГГц и 5.0 ГГц. Данное исследование [A14, A15] было предпринято с целью выработки практических рекомендаций по проектированию НГ комплекса для токамака ITER. Было выполнено моделирование взаимодействия НГ волн с плазмой токамака

ITER для двух сценариев 2 и 4. Основной целью исследования являлось сравнение поглощаемой альфа-частицами НГ мощности при использовании двух частот НГ волн 3.7 ГГц и 5.0 ГГц, позволяющее обоснованно выбрать НГ частоту в будущем токамаке-реакторе. Было найдено, что при НГ частоте 3.7 ГГц альфа-частицы могут поглотить около 20% НГ мощности, в то время как при частоте 5.0 ГГц меньше 2% для сценария 4 ($Q = 5$) и не больше 8% для сценария 2 ($Q = 10$). Таким образом, можно рекомендовать использовать НГ частоту не ниже 5.0 ГГц в токамаке ITER, чтобы гарантировать долю паразитного поглощения НГ мощности на альфа-частицах ниже 10%. Другой важный результат данной работы состоит в том, что квазилинейная функция распределения альфа-частиц в поле НГ волн оказывается довольно быстро спадающей функцией при скоростях выше скорости рождения альфа-частиц, то есть, никаких опасных для стенки токамака высокоэнергетических альфа-частиц не образуется. Кроме того, было найдено, что отрицательное крыло спектра по N_{\parallel} практически полностью поглощается электронами. В работе также были вычислены профили тока увлечения и эффективность его генерации для обоих сценариев. Было найдено, что в условиях ITER сценария 2 требуется несколько радиальных проходов НГ волн для их полного поглощения, в то время как для сценария 4 вся НГ мощность поглощается на первом радиальном проходе в интервале $0.6 < \rho < 0.8$. Вычисленный модернизированным кодом FRTC ток увлечения для сценария 4 ($f = 5.0$ ГГц) составляет 1.15 МА при 28 МВт инжектированной мощности, разделенной между положительным и отрицательным крыльями начального спектра по N_{\parallel} в пропорции $P^{(+)} = 20$ МВт и $P^{(-)} = 8$ МВт. Полная эффективность генерации НГ тока увлечения составляет при этом $\eta = 0.2 \text{ A W}^{-1} 10^{20} \text{ m}^{-2}$, а эффективность генерации только положительным крылом спектра продольных замедлений достигает $\eta = 0.3 \text{ A W}^{-1} 10^{20} \text{ m}^{-2}$. В расчете не учитывались запертые электроны, которые могут уменьшать эффективность генерации

тока увлечения.

В третьем параграфе исследуется роль быстрой волны в поглощении НГ волн [A20] в токамаке. Была рассмотрена трансформация медленной и быстрой НГ мод друг в друга при распространении НГ волн в плазме токамака на примере типичных параметров токамака JET и исследована роль быстрой волны в формировании профиля поглощения НГ мощности при помощи модернизированного кода FRTS. В результате было найдено, что вклад быстрой моды в поглощение НГ мощности значителен для небольших тороидальных замедлений N_ϕ в начальном спектре, формируемым гриллом на границе плазмы при традиционном вводе НГ мощности в виде медленной моды. При значениях максимума $N_{\phi 0}$ начального гауссового спектра в интервале $1.6 \lesssim N_{\phi 0} \lesssim 2.0$, вклад быстрой моды может превышать 50% при преимущественном центральном нагреве плазмы. Последнее опровергает существовавшую ранее точку зрения [12], что быстрая НГ мода должна распространяться главным образом на периферии плазмы токамака и приводить, тем самым, к уменьшению поглощения НГ мощности вблизи центра плазмы. Также было найдено, что по мере роста $N_{\phi 0}$, роль быстрой моды уменьшается и становится незначительной при $N_{\phi 0} \gtrsim 2.2$ из-за уменьшения вероятности достижения НГ лучом поверхности линейной трансформации. Исследование роли быстрой волны в зависимости от температуры плазмы показало, что повышение температуры приводит к сдвигу профилей поглощения в сторону периферии плазмы и к уменьшению доли поглощенной НГ мощности в виде быстрой волны. Это объясняется усилением затухания Ландау в более периферийной плазме и соответствующим уменьшением длин траекторий лучей, приводящим к уменьшению вероятности для лучей достичь поверхности линейной трансформации. Для фиксированного значения $N_{\phi 0} = 2.0$ максимума спектра начальных тороидальных замедлений был исследован вклад быстрой моды в поглощение НГ мощности в зависимости от плотности плазмы.

Было найдено, что при не очень плотной плазме $n_{e0} < 0.6 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, типичной при использовании НГ волн для безындукционного поддержания тока в плазме, доля НГ мощности, поглощенной в виде быстрой моды, нарастает с ростом плотности. Наконец, было проведено сравнение профилей поглощения НГ мощности и плотности тока увлечения при традиционном вводе НГ мощности в виде медленной моды и при непосредственном возбуждении быстрой моды вблизи плазменной границы. В результате расчетов было найдено, что относительные доли быстрой и медленной мод в поглощении НГ мощности оказываются весьма похожи в обоих случаях. Соответствующие профили плотности тока увлечения также не очень сильно различаются. Это приводит к выводу, что преимущества быстрой моды в значительной степени проявляются и при традиционном вводе НГ мощности в виде медленной моды.

Четвертый параграф третьей главы посвящен исследованию величины возможного синергетического эффекта при одновременном использовании НГ и ЭЦР мощностей для генерации тока увлечения в токамаке-реакторе ITER [A47, A11]. Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что области фазового пространства, на которые воздействуют ЭЦ и НГ волны, почти не перекрываются в условиях токамака ITER. Таким образом, параметры ЭЦ и НГ систем токамака ITER не оптимальны для возникновения заметного синергетического эффекта при одновременном их применении, то есть, в ITER вряд ли будет наблюдаться заметный синергетический эффект от одновременного ввода НГ и ЭЦР мощностей в плазму. В параграфе вычислен синергетический фактор $F_{syn} = (I_{LH+EC} - I_{LH})/I_{EC}$ в виде функции от суммарной вводимой мощности при $P_{LH} = P_{EC}$. Этот фактор растет с вводимой мощностью, но для планируемого на ITER уровня мощности он не превышает 10%. Таким образом, в токамаке ITER следует ожидать почти аддитивного возбуждения токов увлечения посредством ЭЦ и НГ волновых пучков.

В пятом параграфе приводятся результаты моделирования для токамака Т-15 [А10], проводившегося в рамках обоснования проекта НГ комплекса для этого токамака. Для двух наборов предполагаемых профилей плотности и температуры плазмы в токамаке Т-15 были рассчитаны ожидаемые профили тока увлечения. Было найдено, что при введенной мощности $P_{LH} = 4 \text{ MBm}$ можно прогнозировать получение тока до $0.6 \div 0.7 \text{ MA}$. Результаты моделирования дают значение эффективности $\eta_{LH} = (1.5 \div 1.9) \cdot 10^{19} \text{ ABm}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Поскольку эти значения были получены в предположении идеальной направленности антенны, следует ожидать некоторого их снижения в эксперименте. Также в пятом параграфе была определена область возможных значений генерируемого тока при уровне введенной мощности $P_{LH} = 1 \text{ MBm}$ для пессимистического и оптимистического значений эффективности η_{LH} .

В шестом параграфе излагаются результаты моделирования НГ экспериментов на токамаке ФТ-2 [А46]. В процессе моделирования был обнаружен сильный эффект синергетического взаимодействия между сильно и слабозамедленными частями начального спектра по N_{\parallel} , который может служить одним из механизмов заполнения спектрального промежутка между вводимым и поглощаемым спектрами в плазме токамака.

Основные результаты третьей главы собраны в седьмом параграфе. Результаты третьей главы опубликованы в работах [А10–А21, А46–А56].

Четвертая глава посвящена моделированию спектров коллективного рассеяния лазерного излучения на спонтанных тепловых флуктуациях слабозатухающих ионных бернштейновских волн в плазме токамака. Расчет таких спектров входит составной частью в новый проект лазерной диагностики быстрых ионов (альфа-частиц) в токамаке, отличающийся от известных проектов такого рода, которые все ориентируются на измерение спектров сильно затухающих (несобственных) колебаний плотности плазмы.

Во введении к четвертой главе дается краткое описание структуры главы.

Во втором параграфе четвертой главы излагаются физические основы резонансной диагностики быстрых ионов, следуя нашей работе [A23]. При этом сначала в первой секции второго параграфа дается краткий обзор известных результатов по рассеянию на слабозатухающих волнах в однородной плазме и делается вывод о необходимости учета пространственной неоднородности плазмы для адекватного описания ожидаемых спектров резонансного рассеяния. Такой учет проводится во второй секции, где принимается во внимание распространение слабозатухающих собственных колебаний на значительные расстояния в неоднородной плазме. Также в этой секции обосновывается выбор ионных бернштейновских волн (ИБВ) в качестве мишени для резонансного рассеяния. В следующей третьей секции обсуждаются свойства ожидаемых спектров рассеяния на ИБВ.

В третьем параграфе четвертой главы выводится приближенное дисперсионное соотношение для ионных бернштейновских волн, которое, в отличие от всех известных ранее, пригодно для произвольной физически разумной функции распределения ионов по скоростям и, кроме этого, учитывает эффекты неоднородности магнитного поля на расстояниях ларморовского радиуса ионов, приводящие к дополнительному уширению ионного циклотронного резонанса.

Наконец, в четвертом параграфе приводится пример расчета спектра резонансного рассеяния лазерного излучения на тепловых флуктуациях слабозатухающих ионных бернштейновских волн в плазме токамака ITER, а в пятом параграфе подводятся основные итоги главы. Результаты четвертой главы диссертации опубликованы в работах [A22–A25].

В Заключение сформулированы основные результаты работы в виде развернутых положений, выносимых на защиту:

1. Разработан новый подход (МВП) для приближенного описания распро-

странения микроволновых пучков в неоднородной анизотропной плазме с учетом дифракции, рефракции и поглощения волн. Преимуществом МВП над всеми ранее известными приближенными подходами к этой классической задаче является простота и физическая прозрачность. На основе МВП был создан новый численный код `VVTrace`. Проведено успешное тестирование кода `VVTrace` относительно наиболее известных кодов (включая и полноволновой код), предназначенных для расчета микроволновых пучков в неоднородной плазме в диапазоне ЭЦ частот.

2. Показано, что МВП позволяет описывать тонкие детали электрического поля микроволнового пучка в окрестности поверхности ЭЦР. В частности, изменение направления распространения пучка из-за неоднородного ЭЦР поглощения, которое было впервые обнаружено в нашей работе [A30] для случая модели холодной плазмы с нерелятивистским поглощением, а также ожидаемое тороидальное пространственное уширение Х-поляризованного пучка вблизи поверхности ЭЦР из-за фильтрации ВКБ мод через зону резонанса, впервые продемонстрированное в [A30], были подтверждены в диссертации релятивистскими расчетами.
3. Сложное и весьма неудобное для практического применения релятивистское дисперсионное соотношение потенциальных электронных бернштейновских волн было сведено к двум различным приближенным представлениям, являющимся гораздо более простыми и удобными, чем классические точные выражения. Продемонстрирована высокая точность найденных приближенных формул, пригодных для эффективного использования в численных кодах и аналитических оценках. По сравнению с точным уравнением, найденная аппроксимация дисперсионного уравнения ЭБВ обеспечивает значительное ускорение расчетов на два-три порядка величины и больше.

4. При помощи модернизированного численного кода FRTS было выполнено моделирование взаимодействия НГ волн с плазмой токамака ITER для двух сценариев 2 и 4. Основной целью исследования являлось сравнение поглощаемой альфа-частицами НГ мощности при использовании двух частот НГ волн 3.7 ГГц и 5.0 ГГц, позволяющее обоснованно выбрать НГ частоту в будущем токамаке-реакторе. Было найдено, что при НГ частоте 3.7 ГГц альфа-частицы могут поглотить около 20% НГ мощности, в то время как при частоте 5.0 ГГц меньше 2% для сценария 4 ($Q = 5$) и не больше 8% для сценария 2 ($Q = 10$). На основе проведенного исследования было рекомендовано использовать НГ частоту не ниже 5.0 ГГц в токамаке ITER, чтобы гарантировать долю паразитного поглощения НГ мощности на альфа-частицах ниже 10%. Другой важный результат проведенного моделирования состоит в том, что квазилинейная функция распределения альфа-частиц в поле НГ волн оказывается довольно быстро спадающей функцией при скоростях выше скорости рождения альфа-частиц, то есть, никаких опасных для стенки токамака высокоэнергетических альфа-частиц не образуется. Кроме того, было найдено, что отрицательное крыло спектра по N_{\parallel} практически полностью поглощается электронами.
5. Получено новое приближенное дисперсионное соотношение для потенциальных ионных бернштейновских волн, применимое при произвольной физически разумной функции распределения ионов по скоростям, учитывающее неоднородность магнитного поля и отличающееся высокой точностью и простотой. Для двух практически важных случаев произвольной изотропной ионной функции распределения при распространении волны в экваториальной плоскости токамака (т.е., при $k_y = 0$), и анизотропной максвелловской функции распределения ионов при про-

извольном направлении распространения волн, полученные формулы оказываются очень удобными для их эффективного использования в численном моделировании.

6. Исследован механизм формирования спектра коллективного рассеяния лазерного излучения на тепловых флуктуациях ионных бернштейновских волн в плазме токамака. Для демонстрации возможностей диагностики резонансного рассеяния проведен расчет ожидаемого спектра рассеяния излучения CO_2 лазера на спонтанных тепловых флуктуациях ИБВ в плазме токамака ITER.
7. Проведена глубокая модернизация численного кода FRTC, в результате которой была существенно увеличена надежность работы кода, включена возможность расчетов в магнитной конфигурации с X-точкой в токамаке, включено взаимодействие НГ волн с альфа-частицами, проведено объединение FRTC с двумя транспортными кодами JETTO и ASTRA. Обновленный код FRTC был встроен в вычислительные системы крупных токамаков JET и FTU, и с его помощью было проведено большое количество исследований по взаимодействию НГ волн с плазмой токамака.

Создан пакет программ EBWH&CD для моделирования взаимодействия электронных бернштейновских волн с плазмой токамака. Этот пакет программ ориентирован, в первую очередь, на интерпретацию и планирование экспериментов на сферическом токамаке MAST. В течение последних лет программы из пакета EBWH&CD активно применяются на токамаке MAST, где планомерно проводятся ЭБВ эксперименты. В настоящий момент пакет EBWH&CD объединяет численный код, решающий задачу о возбуждении ЭБВ вблизи поверхности верхнего гибридного резонанса падающим из вакуума пучком электромагнитных волн,

ЭБВ лучевой код для расчета распространения и затухания в плазме пучка возбужденных ЭБВ, а также специально адаптированную под работу с пакетом EBWH&CD версию кода BANDIT-3D [9], которая использует вычисленные лучевым кодом данные для решения электронного уравнения Фоккера-Планка и нахождения электронной функции распределения и тока увлечения. С использованием программ из пакета EBWH&CD было выполнено много различных расчетов, результаты которых опубликованы в работах [A3–A4, A6–A8, A32, A33, A35–A37, A39–A42, A44].

Создан новый численный код VBTrace, основанный на методе виртуальных пучков и предназначенный для расчета распространения гауссовых электромагнитных пучков в тороидальной плазме в электронном циклотронном диапазоне частот. В коде VBTrace учитываются как релятивистское ЭЦР поглощение волн, так и влияние теплового движения электронов на ВКБ лучи в модели Токмана-Вестерхофа. Кроме того, код может работать и в быстром упрощенном режиме, когда релятивистское поглощение волн вычисляется вдоль лучей в модели холодной плазмы, а весь расчет занимает две-три минуты на обычном персональном компьютере. Сравнение расчетов по полной и по упрощенной схемам показало близкие результаты. Код VBTrace был протестирован на примере распространения О-поляризованного пучка в плазме ITER Scenario 2, подробно описанного в работе [3], посвященной сравнению всех наиболее известных электронно-циклотронных численных кодов. Сравнение предсказаний VBTrace с соответствующими расчетами [3] показало хорошее соответствие между ними. Также код VBTrace был успешно протестирован при помощи полноволнового кода [4, 5] и успешно применялся для интерпретации экспериментов в работах [A8, A29].

Для предсказания и интерпретации ожидаемых экспериментальных спектров коллективного рассеяния лазерного излучения был создан эффективный численный код, основанный на новой форме дисперсионного соотношения для ИБВ, и проведен расчет ожидаемого спектра рассеяния излучения CO_2 лазера на спонтанных тепловых флуктуациях ИБВ в плазме токамака ITER для демонстрации возможностей этой новой диагностики.

Список публикаций

- [A1] *A. N. Saveliev*. The virtual beam tracing method for microwave beams in an inhomogeneous plasma // *Plasma Phys. Control. Fusion*. — 2009. — Vol. 51. — P. 075004(21pp).
- [A2] *A. N. Saveliev*. Simple and accurate approximate relativistic dispersion relation for electron Bernstein waves // *Plasma Phys. Control. Fusion*. — 2007. — Vol. 49. — Pp. 1061–1074.
- [A3] *V. Shevchenko, . . . , A. Saveliev,* Development of Electron Bernstein Wave Research in MAST // *Fusion Science and Technology*. — 2007. — Vol. 52. — Pp. 202–215.
- [A4] *B. Lloyd, . . . , A. Saveliev,* Overview of physics results from MAST // *Nucl. Fusion*. — 2007. — Vol. 47. — Pp. S658–S667.
- [A5] *A. N. Saveliev*. Approximate relativistic dispersion relation for electron Bernstein waves in a Maxwellian plasma // *Plasma Phys. Control. Fusion*. — 2005. — Vol. 47. — Pp. 2003–2017.
- [A6] *G. F. Counsell, . . . , A. Saveliev,* Overview of MAST results // *Nucl. Fusion*. — 2005. — Vol. 45. — Pp. S157–S167.

- [A7] *B. Lloyd, . . . , A. Saveliev,* MAST and the impact of low aspect ratio on tokamak physics // *Plasma Phys. Control. Fusion.* — 2004. — Vol. 46. — Pp. B477–B494.
- [A8] *V. Shevchenko, Y. Baranov, M. O’Brien, A. Saveliev.* Generation of noninductive current by electron-Bernstein waves on the COMPASS-D tokamak // *Physical Review Letters.* — 2002. — Vol. 89, no. 26. — P. 265005(4pp).
- [A9] *D. G. Bulyiginskiy, A. D. Gurchenko, E. Z. Gusakov, et al.* RADAR Upper Hybrid Resonance scattering diagnostics of small-scale fluctuations and waves in tokamak plasmas // *Phys. Plasmas.* — 2001. — Vol. 8. — Pp. 2224–2231.
- [A10] *E. Z. Gusakov, . . . , A. N. Saveliev,* Conceptual design of the lower hybrid current drive for the T-15 tokamak // *Plasma Devices Oper.* — 2008. — Vol. 16. — Pp. 189–210.
- [A11] *A. Polevoi, . . . , A. Saveliev, Yu. Gribov.* Assessment of current drive efficiency and synergetic effect for ECCD and LHCD and possibility of long pulse operation in ITER // *Nucl. Fusion.* — 2008. — Vol. 48. — P. 015002(5pp).
- [A12] *B. Angelini, . . . , A. Saveliev et al.* Overview of the FTU results // *Nucl. Fusion.* — 2005. — Vol. 45. — Pp. S227–S238.
- [A13] *A. A. Tucciolo, . . . , A. Saveliev et al.* Progress in LHCD: a tool for advanced regimes on ITER // *Plasma Phys. Control. Fusion.* — 2005. — Vol. 47. — Pp. B363–B377.
- [A14] *E. Barbato, A. Saveliev.* Absorption of lower hybrid wave power by

- α -particles in ITER-FEAT scenarios // *Plasma Phys. Control. Fusion.* — 2004. — Vol. 46. — Pp. 1283–1297.
- [A15] *E. Barbato, A. Saveliev.* Corrigendum: Absorption of lower hybrid wave power by α -particles in ITER-FEAT scenarios // *Plasma Phys. Control. Fusion.* — 2005. — Vol. 47. — P. 2075.
- [A16] *G. Granucci, ..., A. Saveliev,* Radio-frequency wave physics in FTU // *Fusion Sci. Technol.* — 2004. — Vol. 45. — Pp. 387–401.
- [A17] *C. Gormezano, ..., A. Saveliev,* The FTU program // *Fusion Sci. Technol.* — 2004. — Vol. 45. — Pp. 297–302.
- [A18] *V. Pericoli-Ridolfini, ..., A. Saveliev,* Progress towards internal transport barriers at high plasma density sustained by pure electron heating and current drive in FTU tokamak // *Nucl. Fusion.* — 2003. — Vol. 43. — Pp. 469–478.
- [A19] *B. Angelini, ..., A. Saveliev et al.* Overview of the FTU results // *Nucl. Fusion.* — 2003. — Vol. 43. — Pp. 1632–1640.
- [A20] *J. A. Heikkinen, ..., A. N. Saveliev et al.* Role of fast waves in the central deposition of lower hybrid power // *Plasma Phys. Control. Fusion.* — 1999. — Vol. 41. — Pp. 1231–1249.
- [A21] *J. A. Heikkinen, ..., A. N. Saveliev et al.* Analysis of fast minority ion distribution and current generation for ICRF and LH heating // *Plasma Phys. Control. Fusion.* — 1996. — Vol. 38. — Pp. 2063–2078.
- [A22] *V. V. Bulanin, A. D. Piliya, A. N. Saveliev.* Diagnostics of α -particles using CO₂ scattering from spontaneously excited ion Bernstein waves // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics.* — 1996. — Vol. 58. — Pp. 999–1004.

- [A23] *A. D. Piliya, A. N. Saveliev, V. V. Bulanin.* Diagnostics of fast-ion minority in tokamak plasmas using collective scattering from thermally excited eigenmodes // *Phys. Plasmas.* — 1995. — Vol. 2. — Pp. 2314–2320.
- [A24] *В. В. Буланин, А. Д. Пулия, А. Н. Савельев.* Диагностика α -частиц по рассеянию излучения CO₂-лазера на тепловых флуктуациях типа ионных бернштейновских мод // *Физика Плазмы.* — 1994. — Т. 20. — С. 45–47.
- [A25] *A. D. Piliya, A. N. Saveliev.* High-order ion Bernstein waves in a non-uniform magnetic field // *Plasma Phys. Control. Fusion.* — 1994. — Vol. 36. — Pp. 2059–2071.
- [A26] *A. N. Saveliev.* A New Method For Modeling Microwave Beams In Toroidal Plasmas // *Proceedings of 15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating / Ed. by J. Lohr.* — Vol. 1. — Yosemite National Park, California, USA: World Scientific, 2008. — Pp. 283–288.
- [A27] *M. A. Irzak, A. Yu. Popov, A. N. Saveliev.* 2D Full-wave modeling of O-X conversion in tokamak plasmas // *Strong Microwaves: Sources and Applications. Proceedings of the VII International Workshop / Ed. by A. G. Litvak.* — Vol. 2. — Nizhniy Novgorod: Institute of Applied Physics, 2008. — Pp. 413–418.
- [A28] *M. A. Irzak, A. Yu. Popov, A. N. Saveliev.* 2D Numerical Modeling of O–X Conversion in Spherical Tokamaks // *Proc. 34th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys.* — Vol. 31F. — Warsaw: ECA, 2007. — Pp. P–4.095.
- [A29] *A. B. Altukhov, . . . , A. N. Saveliev,* Application of the Upper Hybrid

Resonance Back Scattering Enhanced Doppler Effect for Plasma Rotation Diagnostic at FT-2 Tokamak // Proc. 31st EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. — Vol. 28G. — London: ECA, 2004. — Pp. P-1.173.

- [A30] *A. N. Saveliev, A. D. Piliya.* The Method of Virtual Beams for Microwave Radiation in Toroidal Plasmas // Proc. 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. — Vol. 27A. — St.Petersburg: ECA, 2003. — Pp. P-2.20.
- [A31] *A. D. Piliya, A. N. Saveliev.* Propagation of weakly divergent microwave beams in tokamak plasmas // Proc. Int. Workshop on Strong Microwaves in Plasmas. — Vol. 1. — Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics, 2000. — Pp. 240–243.
- [A32] *V. Shevchenko, A. Saveliev.* Current Drive and Plasma Heating by Electron Bernstein Waves in MAST // 18th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas. — Gent, Belgium: American Institute of Physics, 2009.
- [A33] *V. Shevchenko, A. Saveliev.* EBW assisted plasma current startup in MAST // Proceedings of 15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating / Ed. by J. Lohr. — Vol. 1. — Yosemite National Park, California, USA: World Scientific, 2008. — Pp. 68–73.
- [A34] *A. N. Saveliev.* Electron Bernstein waves in spherical torus plasmas // AIP Conference Proceedings, Theory of Fusion Plasmas: Joint Varenna-Lausanne International Workshop. — Vol. 871. — Varenna: AIP, 2006. — Pp. 215–227.
- [A35] *V. Shevchenko, ..., A. Saveliev, A. Surkov.* EBW Experiments on MAST // Proc. ST Workshop ISTW-2006. — Chengdu: 2006.

- [A36] *V. Shevchenko, . . . , A. Saveliev et al.* Heating Experiments on MAST // Proc. 21st Int. Conf. on Fusion Energy. — Vol. CD-ROM. — Chengdu: Vienna: IAEA, 2006. — Pp. EX/P6–22.
- [A37] *V. Shevchenko, . . . , A. Saveliev et al.* EBW Heating Experiments on MAST // Proceedings EC-14 Joint Workshop on ECE and ECRH. — Santorini, Greece: 2006.
- [A38] *A. N. Saveliev.* Approximate relativistic dispersion relation for electron Bernstein waves in inhomogeneous plasma // Proc. 32nd EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. — Vol. 29C. — Tarragona: ECA, 2005. — Pp. P–2.115.
- [A39] *V. Shevchenko, A. Saveliev, Y. Baranov et al.* EBW current drive start-up scenario for MAST // Proceedings EC-13 Joint Workshop on ECE and ECRH. — Nizhniy Novgorod: 2004.
- [A40] *V. Shevchenko, . . . , A. Saveliev, E. Tregubova.* Prospects of EBW emission diagnostics and EBW heating in spherical tokamaks // Proceedings EC-13 Joint Workshop on ECE and ECRH. — Nizhniy Novgorod: 2004.
- [A41] *V. Shevchenko, . . . , A. Saveliev, E. Tregubova.* Electron Bernstein wave studies on COMPASS-D and MAST // AIP Conf. Proc. 15th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas / Ed. by C. B. Forest. — Vol. 694. — Moran, Wyoming: New York: AIP, 2003. — Pp. 359–366.
- [A42] *A. N. Saveliev, V. F. Shevchenko, Yu. F. Baranov.* EBW CD start-up scenario for MAST // Proc. ST Workshop 2003. — Abingdon, UK: 2003.
- [A43] *A. D. Piliya, A. N. Saveliev, E. N. Tregubova.* Numerical Code For EBW Heating Simulations In Mast // Proc. 30th EPS Conference on Contr.

Fusion and Plasma Phys. — Vol. 27A. — St.Petersburg: ECA, 2003. — Pp. P-3.203.

- [A44] *V. Shevchenko, Y. Baranov, M. O'Brien, A. Saveliev.* Electron Bernstein Wave Heating Experiment on COMPASS-D // Proceedings EC-12 Joint Workshop on ECE and ECRH. — Aix-en-Provence, France: 2002. — Pp. 303–308.
- [A45] *A. D. Gurchenko, E. Z. Gusakov, M. M. Larionov, et al.* Resonance RADAR Scattering Diagnostics of Small Scale Turbulence in Tokamak Plasmas // Proc. 26 EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. — Vol. 23J. — Maastricht: ECA, 1999. — Pp. 37–40.
- [A46] *S. I. Lashkul, et al.* Study of LHCD efficiency on the FT-2 tokamak // 18th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas. — Gent, Belgium: American Institute of Physics, 2009.
- [A47] *A. Polevoi, ..., A. Saveliev, Yu. Gribov.* Assessment of Current Drive Efficiency and Synergetic Effect for ECCD and LHCD in ITER Steady State and Hybrid Scenarios // Proc. 21st Int. Conf. on Fusion Energy. — Vol. CD-ROM. — Chengdu: Vienna: IAEA, 2006. — Pp. IT/P2-13.
- [A48] *K. M. Rantamäki, A. N. Saveliev, T. J. J. Tala et al.* Effect of Density Fluctuations on Lower Hybrid Ray Tracing and q-Profile Evolution in Transport Simulations // *Preprint EFDA-JET-CP (05)02-22.* — 2005.
- [A49] *K. M. Rantamäki, A. N. Saveliev, T. J. J. Tala et al.* Effect of density fluctuations on lower hybrid ray tracing and q-profile evolution in transport simulations // Proc. 32nd EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. — Vol. 29C. — Tarragona: ECA, 2005. — Pp. P-2.114.

- [A50] *A. B. Altukhov, . . . , A. N. Saveliev et al.* Influence of Lower Hybrid heating on poloidal plasma rotation and small-scale turbulence in FT-2 tokamak // Proc. 31st EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. — Vol. 28G. — London: ECA, 2004. — Pp. P-1.174.
- [A51] *E. Barbato, A. N. Saveliev.* Benchmarking of LHCD numerical modelling on FTU discharges and application to ITER-FEAT scenarios // Proc. 31st EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. — Vol. 28G. — London: ECA, 2004. — Pp. P-2.104.
- [A52] *A. B. Altukhov, A. D. Gurchenko, E. Z. Gusakov et al.* Investigation of Lower Hybrid waves in "spectral gap" in LHCD experiment at FT-2 tokamak // Proc. 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. — Vol. 27A. — St.Petersburg: ECA, 2003. — Pp. P-2.176.
- [A53] *G. Granucci, . . . , A. N. Saveliev et al.* Combined LH and EC Waves Injection in FTU Tokamak // Proc. 28th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. — Vol. 25A. — Funchal: ECA, 2001. — Pp. 1757–1760.
- [A54] *A. D. Piliya, A. N. Saveliev.* Numerical Code for LHCD Simulations with Self-consistent Treatment of Alpha Particles in Tokamak Geometry // *Preprint JET-R 98(01)*. — 1998.
- [A55] *A. D. Piliya, A. N. Saveliev.* Interaction of thermonuclear alpha particles with lower hybrid waves in a tokamak // Proc. 25th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. — Praha: 1998. — P. 1.087.
- [A56] *T. J. J. Tala, . . . , A. D. Piliya, A. N. Saveliev.* Effect of mode transformation on lower hybrid current drive // Proc. 25th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. — Praha: 1998. — P. 1.093.

Цитированная литература

- [1] *E. Westerhof*. Wave propagation through an electron cyclotron resonance layer // *Plasma Phys. Control. Fusion*. — 1997. — Vol. 39. — Pp. 1015—1029.
- [2] *M. D. Tokman, E. Westerhof, M. A. Gavrilova*. Wave power flux and ray-tracing in regions of resonant absorption // *Plasma Phys. Control. Fusion*. — 2000. — Vol. 42. — Pp. 91–98.
- [3] *R. Prater, D. Farina, Yu. Gribov et al.* Benchmarking of codes for electron cyclotron heating and electron cyclotron current drive under ITER conditions // *Nucl. Fusion*. — 2008. — Vol. 48. — P. 035006(11pp).
- [4] *M. A. Irzak*. Full-wave 2D modeling of LH heating in GLOBUS-M tokamak // Proc. 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. — Vol. 27A. — St.Petersburg: ECA, 2003. — Pp. P-2.175.
- [5] *M. A. Irzak, A. Yu. Popov*. 2D Modeling of the O-X conversion in toroidal plasmas // *Plasma Phys. Control. Fusion*. — 2008. — Vol. 50. — P. 025003.
- [6] *А. Д. Пилия, В. И. Федоров*. Линейная конверсия волн в неоднородной магнитоактивной плазме // *ЖЭТФ*. — 1969. — Т. 57. — С. 1198–1209.
- [7] *A. D. Piliya, E. N. Tregubova*. Linear conversion of electromagnetic waves into electron Bernstein waves in an arbitrary inhomogeneous plasma slab // *Plasma Phys. Control. Fusion*. — 2003. — Vol. 45. — Pp. 143–154.
- [8] *A. D. Piliya, A. Yu. Popov, E. N. Tregubova*. Propagation and damping of electron Bernstein waves with small n_{\parallel} in inhomogeneous plasma // *Plasma Phys. Control. Fusion*. — 2003. — Vol. 45. — Pp. 1309–1321.
- [9] *M. R. O'Brien, et al.* // Proc. IAEA Technical Committee Meeting on Ad-

vances in Simulation and Modelling of Thermonuclear Plasmas. — Vol. 1. — Montreal: Vienna: IAEA, 1992. — P. 527.

- [10] *G. V. Pereverzev, P. N. Yushmanov.* ASTRA automated system for transport analysis // *IPP-Report.* — 2002. — Vol. 5. — P. 98.
- [11] *G. Cenacchi, A. Taroni.* JETTO: A free-boundary plasma transport code (basic version) // *Report JET-IR(88)03.* — 1988.
- [12] *F. Santini.* Developments in lower hybrid theory // Course and Workshop on Applications of RF Waves to Tokamak Plasmas / Ed. by S. Bernabei, U. Gasparino, E. Sindoni. — Vol. 1. — Varenna: 1985. — Pp. 251–287.