

На правах рукописи

ТИМОФЕЕВ Игорь Валериевич

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА
МОЩНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
В ПРОЦЕССЕ РАЗВИТИЯ
ПЛАЗМЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

01.04.08 - физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ЛОТОВ Константин Владимирович – доктор физико-математических наук, Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

БУРДАКОВ Александр Владимирович – доктор физико-математических наук, Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск

ШАПИРО Давид Абрамович – доктор физико-математических наук, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: – Учреждение Российской академии наук Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

Защита диссертации состоится “ _____ ” _____ 2010 г. в “ _____ ” часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук

А. А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Коллективное взаимодействие электронного пучка с плазмой является одним из самых распространенных и наиболее фундаментальных явлений в физике плазмы. Несмотря на полувековую историю исследований в этой области, различные аспекты задачи продолжает активно изучаться как применительно к космическим явлениям, так и применительно к схеме быстрого поджига в инерциальном термоядерном синтезе. В данной работе основное внимание уделено изучению тех режимов коллективной релаксации пучка, которые интересны с точки зрения нагрева лабораторной плазмы до высоких температур. Мотивацией для таких исследований является недавний прогресс, достигнутый в экспериментах по нагреву плазмы в открытых ловушках [1].

Несмотря на обилие теоретических моделей, описывающих различные режимы пучково-плазменного взаимодействия, задача предсказания с их помощью результатов реальных экспериментов все еще далека от решения. Дело в том, что максимально приближенная к эксперименту постановка задачи зачастую требует отказа от привычных для теории идеализаций, таких как слабое или сильное магнитное поле, гидродинамический или кинетический характер пучковой неустойчивости, приближение случайных фаз возбуждаемых в плазме турбулентных пульсаций. Кроме того, при длительной инжекции пучка эволюция пучково-плазменной системы может проходить через целую последовательность стадий, определяемых совершенно различными нелинейными процессами. В связи с этим становится актуальным создание численных моделей, которые бы позволили с единых позиций изучить всю картину проходимых пучком этапов релаксации и помогли бы определить адекватность существующих теоретических представлений о механизмах насыщения пучковых неустойчивостей.

Существующие теоретические сценарии слабой и сильной турбулентности основываются на представлении о линейном характере возбуждения резонансных с пучком колебаний, которое позволяет отождествлять скорость накачки энергии в турбулентность с линейным инкрементом пучковой неустойчивости. Очевидно, что при достаточно большой энергии резонансных волн это представление перестает быть верным, и динамика пучка оказывается нелинейной. Для изучения вопроса о том, какое влияние оказывают пучковые нелинейности на процесс раскачки неустойчивости в условиях развитой турбулентности, необходимо численное моделирование, которое, с одной стороны, будет способно на больших

временах отслеживать эволюцию возбуждаемой пучком турбулентности, а с другой, позволит обеспечить достаточно подробное описание кинетических эффектов, связанных с захватом пучка. Такому моделированию, ставшему возможным только недавно благодаря появлению адекватных задаче вычислительных ресурсов, и посвящена данная работа.

Целью диссертационной работы является изучение основных физических явлений, происходящих в пучково-плазменной системе в процессе длительной инжекции пучка, когда в плазме не только устанавливается квазистационарное турбулентное состояние, но и когда это состояние успевает значительно измениться за счет эволюции макроскопических параметров плазмы. Это предполагает

- изучение линейной стадии неустойчивости электронного пучка в замагниченной плазме в рамках точной кинетической теории,
- исследование сценария установления и нелинейной эволюции возбуждаемой пучком турбулентности, а также
- создание теоретических и численных моделей, способных описывать релаксацию мощных электронных пучков в плазме на масштабах реальных экспериментов.

Научная новизна работы заключается в том, что

- впервые получены решения дисперсионного уравнения для неустойчивости горячего релятивистского электронного пучка в замагниченной плазме в рамках точной кинетической теории,
- построена теоретическая модель релаксации пучка в режиме захвата и проведено количественное сравнение ее предсказаний с результатами экспериментов по нагреву плазмы в открытых ловушках,
- создана гибридная численная модель, способная описывать релаксацию пучка на масштабах реальных экспериментов,
- установлен последовательный сценарий эволюции пучково-плазменной системы при длительной инжекции пучка,
- исследована роль пучковых нелинейностей в развитой турбулентности.

Личный вклад автора. Автором построена теоретическая модель релаксации пучка в режиме захвата, созданы и протестированы численные модели, получены решения дисперсионного уравнения с кинетическим описанием пучка, исследованы и идентифицированы основные нелинейные процессы, определяющие эволюцию возбуждаемой пучком турбулентности.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что созданные теоретические и численные модели могут использоваться не только для описания уже существующих экспериментов по турбулентному нагреву плазмы мощными электронными пучками, но и для проектирования будущих экспериментов, направленных на достижение термоядерных параметров плазмы в открытых ловушках. Созданные численные модели могут быть также полезны для изучения тех режимов пучково-плазменного взаимодействия, которые встречаются в космических явлениях и в схемах инерциального термоядерного синтеза.

На защиту выносятся следующие результаты и положения:

- Впервые получены решения дисперсионного уравнения для системы горячий электронный пучок – холодная замагниченная плазма в рамках точной кинетической теории. Исследованы эффекты совместного влияния магнитного поля и углового разброса пучка на неустойчивость косых волн.
- Построена теоретическая модель коллективной релаксации пучка в режиме захвата. Показано согласие предсказаний модели с результатами реальных экспериментов по пучковому нагреву плазмы в открытых ловушках.
- Разработана гибридная численная модель, способная моделировать турбулентный нагрев плазмы мощным электронным пучком на масштабах реальных экспериментов.
- Установлен сценарий нелинейной эволюции пучково-плазменной системы при длительной инжекции электронного пучка в плазму. Показано, что переход от динамической стадии к состоянию развитой турбулентности связан с развитием коротковолновой модуляционной неустойчивости. В установившемся состоянии обнаружен турбулентный режим с постоянной мощностью накачки, уровень насыщения которой не зависит от детальной структуры турбулентности и определяется исключительно пучковыми нелинейностями.

Апробация работы.

Работы, положенные в основу диссертации, докладывались на научных семинарах ИЯФ СО РАН (Новосибирск), на трех Звенигородских конференциях по физике плазмы и УТС (2002, 2006, 2008), на 16-ой Международной конференции по мощным пучкам (BEAMS-2006, Оксфорд, Англия), на 11-ой Международной конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (2006, Алушта, Украина), на конференции Европейского физического общества по физике плазмы (EPS-2009, София, Болгария), на 8-ой Международной конференции по открытым системам для удержания плазмы (OS-2010, July 5-9, Novosibirsk, Russia).

Результаты диссертации опубликованы также в российских и зарубежных научных журналах, список которых приведен в перечне опубликованных автором работ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация содержит 101 страницу и библиографический список из 87 работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткий обзор существующих теоретических и численных подходов к решению задачи о коллективной релаксации электронных пучков в плазме, обосновывается актуальность дальнейших исследований и формулируются задачи, решению которых посвящена работа.

В первой главе проводится анализ линейной стадии неустойчивости горячего электронного пучка в замагниченной плазме.

Знание линейного инкремента пучковой неустойчивости в широкой области волновых чисел позволяет определить тип и спектральный состав наиболее неустойчивых возмущений. Кроме того, в существующих турбулентных сценариях величина инкремента существенно влияет на установившуюся мощность накачки энергии. Таким образом, задача как можно более точного вычисления инкремента неустойчивости является весьма важной. В последнее время интерес к этой задаче значительно возрос еще и благодаря исследованиям по инерциальному термоядерному синтезу. В рамках этих исследований впервые были получены численные решения точного дисперсионного уравнения для неустойчивости электронного пучка в изотропной плазме без использования каких-либо

упрощающих предположений [2]. Прямые вычисления инкремента в рамках самой общей линейной теории стали подовом для пересмотра и уточнения результатов, полученных с помощью различных приближений. В данной работе анализ инкремента пучковой неустойчивости в рамках точной кинетической теории впервые проведен для случая замагниченной плазмы.

Основное внимание в этой главе уделено вопросу о том, насколько эффективно магнитное поле подавляет неустойчивость косых волн. Гидродинамическое приближение предсказывает, что при переходе от слабого к сильному магнитному полю роль самой неустойчивой моды постепенно переходит от косых волн к волнам со строго продольным распространением. Подобная картина сохраняется также и в том случае, если в гидродинамических уравнениях учесть достаточно малый, нерелятивистский разброс пучка по поперечным импульсам. Такой гидродинамический подход к анализу неустойчивости теплого пучка предсказывает, что увеличение разброса пучка и увеличение магнитного поля приводят к суммарному уменьшению инкремента неустойчивости косых волн, так что оба эти эффекта действуют в одну сторону. В работе показано, что кинетическое описание пучка существенно меняет эти представления. Совместное влияние кинетических эффектов и магнитного поля приводит к тому, что для пучка с заданным угловым разбросом раскачка косых волн оказывается максимально эффективной при таком минимальном значении магнитного поля, при котором различные резонансы становятся изолированными.

Во второй главе предложена теоретическая модель релаксации пучка в режиме, когда энергия неустойчивых колебаний достаточно велика для захвата частиц пучка. Предполагается, что в этом режиме мощность, накачиваемая пучком в резонансные колебания, перестает зависеть от их энергии и стабилизируется на уровне, соответствующем порогу захвата. При этом увеличение энергетического разброса пучка при удалении от места инъекции описывается уравнением диффузионного типа, в котором в качестве шага случайных блужданий частиц по скорости выступает ширина области захвата. Установленные таким образом профили энергоснабжения пучка оказались в хорошем согласии с экспериментальными результатами, полученными на разных установках при различных параметрах. Говорить о согласии между профилями энергоснабжения и профилями внутренней энергии плазмы, однако, имеет смысл только при условии значительного подавления электронной теплопроводности. Оказалось, что оценку для величины такого подавления можно получить, не вдаваясь в изучение природы явления. С этой целью в модели на-

грева плазмы достаточно учесть эффект конечной теплопроводности и сравнить характерные градиенты электронной температуры с теми, которые наблюдаются в эксперименте. Показано, что для достижения такого согласия эффективная частота столкновений, определяющая длину свободного пробега электронов плазмы, должна существенно превышать частоту кулоновских столкновений. Установлено, что в качестве оценки для аномальной частоты столкновений может быть использован локальный инкремент пучковой неустойчивости, что согласуется с оценками, полученными ранее из других соображений [3].

В третьей главе в рамках пространственно однородной задачи исследуется процесс нелинейного насыщения резонансной волны за счет захвата электронов пучка в созданную ей потенциальную яму. Цель этого исследования состоит в том, чтобы выяснить, насколько корректно нелинейные кинетические эффекты, связанные с захватом пучка, могут быть описаны упрощенной численной моделью, в которой пучок моделируется отдельными частицами, а плазма представляет собой набор независимых осцилляторов. Сравнение с моделью, основанной на методе частиц в ячейках, показало адекватность такого упрощенного подхода.

В работе установлено, что в переходной области параметров, когда ширина резонансного с волной интервала скоростей сравнима с разбросом пучка, нарастание и насыщение неустойчивости происходит по тому же универсальному закону, как и в кинетическом пределе. Показано, что классические элементарные оценки завышают максимальное поле волны в переходной области и дают неправильный скейлинг для зависимости этого поля от инкремента неустойчивости; в кинетическом режиме насыщение неустойчивости не сопровождается изменением фазовой скорости волны, а затухание плазменных колебаний не только изменяет инкремент неустойчивости, но и приводит к резкому уменьшению максимального поля волны.

В четвертой главе рассматривается задача о непрерывной инжекции пучка в плазменное полупространство. Исследование всех последовательно проходимых пучком стадий релаксации проводится здесь с помощью двух численных моделей.

В разделе 4.1 для изучения микроскопических механизмов установления турбулентного состояния в системе плазма-пучок разработана двумерная численная PIC модель. На примере простых физических явлений продемонстрирована работоспособность этой модели для изучения процессов коллективного взаимодействия мощных электронных пучков с плазмой. Показано согласие результатов численных экспериментов с теорией как для одночастичного механизма возбуждения плазменных коле-

баний, так и для коллективной раскачки двухпоточковой неустойчивости. При достаточно большом числе частиц представленная модель с высокой детализацией воспроизводит эффект бесстолкновительного затухания бегущей волны вплоть до учета релятивистских поправок к законам дисперсии плазменных колебаний и особенностей начального распределения частиц по скоростям.

Для моделирования релаксации пучка и турбулентного нагрева плазмы на больших пространственных и временных масштабах в разделе 4.2 предлагается использовать упрощенную гибридную модель, в которой пучок по-прежнему моделируется отдельными частицами, а медленная нелинейная эволюция плазмы описывается усредненными гидродинамическими уравнениями по аналогии с тем, как это принято в уравнениях Захарова. Кинетическое описание пучка в этом случае позволяет детально воспроизводить эффекты захвата, а учет плазменных нелинейностей позволяет моделировать состояния развитой турбулентности.

В разделе 4.3 исследованы основные физические процессы, определяющие скорость нагрева плазмы в условиях длительной инжекции мощного электронного пучка. Показано, что сценарий установления квазистационарной турбулентности в этом случае состоит из нескольких характерных этапов.

На динамической стадии пучок раскачивает регулярную ленгмюровскую волну, энергия которой нарастает до значений, значительно превышающих тепловую энергию плазмы, что приводит к развитию коротковолновой модуляционной неустойчивости. Установлено, что ранняя стадия этой неустойчивости адекватно описывается упрощенной теорией, учитывающей кинетические эффекты, связанные с конечной температурой электронов плазмы, а на нелинейной стадии в игру вступает сильная электронная нелинейность, которая приводит к поглощению нарастающих колебаний за счет пересечения электронных траекторий. После опрокидывания этих коротковолновых колебаний практически вся осцилляторная энергия плазменных электронов превращается в их тепловую энергию, в результате чего устанавливается турбулентный режим с более слабой накачкой $W < nT$. На этом этапе перенос энергии из области возбуждения в область диссипации осуществляется как за счет коллапса, так и за счет эстафетного процесса рассеяния ВЧ колебаний на флуктуациях плотности плазмы. С ростом температуры, однако, турбулентность переходит в режим, когда нелинейные процессы в плазме не способны обеспечить достаточно эффективную диссипацию резонансных с пучком колебаний, и мощность накачки энергии в турбулентность стабилизируется на уровне, определяемом только пучковыми нелинейно-

стями. Это обстоятельство открывает возможность для моделирования реальных экспериментов по нагреву плазмы, поскольку вместо трудоемких PIC расчетов в режиме насыщения можно использовать более экономичные модели с более грубым описанием турбулентных процессов в плазме.

С помощью предложенной в работе гибридной модели, результаты которой обнаружили хорошее согласие с PIC расчетами, установлена зависимость мощности нагрева плазмы от относительной плотности пучка и показано, что при различных угловых разбросах эта зависимость, выраженная в терминах линейного инкремента Γ , имеет степенной характер.

В Заключение перечислены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Впервые получены решения дисперсионного уравнения для системы горячий электронный пучок – холодная замагниченная плазма в рамках точной кинетической теории. Исследована точность гидродинамического и кинетического приближений для продольной двухпотоковой неустойчивости. Исследованы эффекты совместного влияния магнитного поля и углового разброса пучка на подавление неустойчивостей косых волн.
2. Построена теоретическая модель коллективной релаксации пучка в режиме захвата. Показано согласие предсказаний модели с результатами реальных экспериментов по пучковому нагреву плазмы в открытых ловушках.
3. Исследован процесс нелинейного насыщения пучковой неустойчивости в пространственно однородной задаче за счет захвата электронов пучка полем возбуждаемой волны.
4. Разработана двумерная численная PIC модель для изучения механизмов коллективного взаимодействия мощных электронных пучков с плазмой.
5. Разработана одномерная гибридная модель с упрощенным описанием плазмы, способная моделировать реальные эксперименты по инжекции электронных пучков в плазму.
6. Исследован последовательный сценарий нелинейной эволюции пучково-плазменной системы в условиях длительной инжекции

пучка. Установлено, что переход от динамической стадии к состоянию развитой турбулентности связан с развитием коротковолновой модуляционной неустойчивости. Показано, что с ростом электронной температуры турбулентность переходит в режим с постоянной мощностью накачки, уровень насыщения которой не зависит от детальной структуры турбулентности и определяется исключительно пучковыми нелинейностями.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *I. V. Timofeev and K. V. Lotov.* Ion dynamics in plasma compensation scheme.// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002, v. 485, № 3, p. 228–233.
2. *I. V. Timofeev and K. V. Lotov.* Relaxation of a relativistic electron beam in plasma in the trapping regime.// Physics of Plasmas, 2006, v. 13, № 6, p. 062312.
3. *К. В. Лотов, И. В. Тимофеев.* Переходный режим одномерной двухпоточковой неустойчивости.// Вестник НГУ, серия "Физика 2008, т. 3, № 1, с. 62–65.
4. *К. В. Лотов, А. В. Терехов, И. В. Тимофеев.* О насыщении двухпоточковой неустойчивости электронного пучка в плазме.// Физика плазмы, 2009, т. 35, № 6, с. 567–574.
5. *I. V. Timofeev, K. V. Lotov, and A. V. Terekhov.* Direct computation of the growth rate for the instability of a warm relativistic electron beam in a cold magnetized plasma.// Physics of Plasmas, 2009, v. 16, p. 063101.
6. *А. В. Терехов, И. В. Тимофеев, К. В. Лотов.* Двумерная численная модель плазмы для изучения процессов пучково-плазменного взаимодействия.// Вестник НГУ, серия "Физика 2010, т. 5, № 2, с. 85–97.
7. *I. V. Timofeev, A. V. Terekhov.* Simulations of turbulent plasma heating by powerful electron beams.// Physics of Plasmas, 2010, v. 17, p. 083111.
8. *I. V. Timofeev, K. V. Lotov.* Relaxation of a relativistic electron beam in plasma in the trapping regime.// Вопросы атомной науки и техники, серия "Физика 2007, т. 13, № 1, с. 46–48.

9. *К. В. Лотов, И. В. Тимофеев.* Динамика ионов в схеме плазменной компенсации.// Тезисы докладов XXIX Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2002, с. 196.
10. *К. В. Лотов, И. В. Тимофеев.* Модель релаксации релятивистского электронного пучка в плазме в режиме захвата.// Тезисы докладов XXXIII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2006, с. 82.
11. *I. V. Timofeev and K. V. Lotov.* Relaxation of a relativistic electron beam in plasma in the trapping regime.// 16th International Conference on High-Power Particle Beams, Oxford, UK, 2006, Abstracts, p. 68.
12. *I. V. Timofeev and K. V. Lotov.* Relaxation of a relativistic electron beam in plasma in the trapping regime.// 11th International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Alushta, Ukraine, 2006, Abstracts, p. 83.
13. *К. В. Лотов, А. В. Терехов, И. В. Тимофеев.* Двумерная численная модель плазмы для изучения пучково-плазменного взаимодействия.// Тезисы докладов XXXV Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2008, с. 137.
14. *К. В. Лотов, А. В. Терехов, И. В. Тимофеев.* О насыщении двухпоточковой неустойчивости электронного пучка в плазме.// Тезисы докладов XXXV Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2008, с. 297.
15. *I. V. Timofeev, A. V. Terekhov, K. V. Lotov.* Exact growth rates of the relativistic electron beam instability in a magnetized plasma.// 7th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Daejeon, Korea, 2008, Abstracts, p. P20.
16. *I. V. Timofeev, A. V. Terekhov, K. V. Lotov.* Computer simulation of relativistic electron beam relaxation in plasma.// 7th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Daejeon, Korea, 2008, Abstracts, p. P21.
17. *I. V. Timofeev, K. V. Lotov, and A. V. Terekhov.* Direct computation of the growth rate for the instability of a warm relativistic electron beam in a cold magnetized plasma.// Proceedings of 36th EPS Conference on Plasma Physics, Sofia, Bulgaria, 29 June – 3 July 2009, ECA v. 33E, P-1.015.

Список литературы

- [1] *A. B. Аржанников, В. Т. Астрелин, А. В. Бурдаков и др.* Исследование механизма быстрого нагрева ионов в многопробочной ловушке ГОЛ-3.// Физика плазмы, 2005, т. 31, с. 506.
- [2] *A. Bret, L. Gremillet, D. Benisti, E. Lefebvre.* Exact Relativistic Kinetic Theory of an Electron-Beam-Plasma System: Hierarchy of the Competing Modes in the System-Parameter Space.// Phys. Rev. Lett., 2008, V. 100, P. 205008.
- [3] *A. V. Burdakov, I. A. Kotelnikov, V. I. Erofeev.* Explanation of turbulent suppression of electron heat transfer in GOL-3 facility at the stage of relativistic electron beam injection.// Trans. of Fusion Technol., 2005, V. 47(1T), P. 74.

ТИМОФЕЕВ Игорь Валериевич

**Нелинейная динамика мощного электронного пучка
в процессе развития плазменной турбулентности**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 25.10.2010 г.

Подписано к печати 1.11.2010 г.

Формат 60×90 1/16 Объем 0,9 печ.л., 0,8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 31

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.