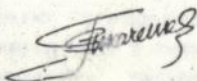


ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



Ткаченко Виктор Иванович

ТЕОРИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕРАВНОВЕСНОЙ  
ПЛАЗМЕ И ГИДРОДИНАМИКЕ

01.04.08 - Физика и химия плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Харьков - 1993

715 27.001  
Работа выполнена в Харьковском государственном университете  
Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор  
КОНДРАТЕНКО Анатолий Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор физико - математических наук,  
профессор БАСС Фридрих Герсонович  
( Институт радиофизики и электроники  
АН Украины, г. Харьков );

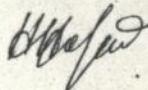
доктор физико - математических наук,  
профессор ТКАЧ Юрий Владимирович  
(Украинский научный центр "Харьковский  
физико-технический институт", г. Харьков);

доктор физико - математических наук,  
ст. научн. сотр. КОВАЛЕНКО Виталий Петрович  
( Институт физики АН Украины, г. Киев ).

Ведущая организация: Институт теоретической физики АН Украины,  
г. Киев:

Защита состоится "17" сентября 1993 г. в 15<sup>00</sup> часов  
на заседании специализированного ученого совета Д 053.06.01  
Харьковского государственного университета по адресу:  
310108 г. Харьков-108, пр. Курчатова 31, ауд. 301  
С диссертацией можно ознакомиться в центральной научной  
библиотеке Харьковского государственного университета  
Автореферат разослан "11" августа 1993 г.

Ученый секретарь специализированного  
ученого совета  
доктор физико-математических наук

 Н. А. Азаренков

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00815188 (V)

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С развитием ускорительной техники и появлением мощных и сильнооточных потоков заряженных частиц значительно возрос интерес к исследованию неравновесных плазменных систем. Он обусловлен широкими перспективами их практического применения в плазменной электронике и технологии, при решении различных проблем управляемого термоядерного синтеза, при объяснении физических процессов в ближнем и дальнем космосе и т. д.

Основополагающими процессами при решении различных прикладных проблем с использованием неравновесных плазменных сред являются пучковые неустойчивости (ПН), приводящие к возбуждению волн в плазме, развитию плазменной турбулентности, появлению ускоренных частиц.

В ограниченных системах динамика развития ПН существенно отличается от аналогичных процессов в безграничных системах и, прежде всего, наличием поверхностных волн (ПВ), распространяющихся вдоль границы плазмы и убывающих по амплитуде при удалении от нее. Поперечная неоднородность плазмы в области существования ПВ наряду со столкновительным затуханием и потерями на излучение может привести к дополнительному поглощению ее энергии и к изменению характера неустойчивости на диссипативный. Неустойчивости диссипативного типа характеризуются меньшими инкрементами и отсутствием порогов по волновому числу.

Продольная ограниченность пучково-плазменных систем навязывает процессу дискретный спектр по продольным волновым числам. Связь этих собственных волн, распространяющихся как вдоль, так и против движения пучка на продольных границах может изменить условия и эффективность генерации электромагнитных волн.

Таким образом учет размерных и диссипативных эффектов различной природы в неравновесной плазме приводит к изменению динамики развития ПН, понижению эффективности взаимодействия уже на начальной стадии взаимодействия. Поэтому исследование

влияния диссипативных эффектов и ограниченности на развитие ПН является актуальной задачей.

С ростом амплитуды поля в результате развития ПН, а также в неравновесных средах, устойчивых в линейном приближении, нелинейные эффекты приобретают большое значение и могут явиться причиной стабилизации неустойчивых режимов, либо привести к развитию вторичных неустойчивостей (ВН). Например, нелинейность пучка малой плотности, распространяющегося в плазме приводит к стабилизации неустойчивости, обусловленной захватом частиц пучка волной. Построение аналитических методов описания нелинейной стадии ПН в бездиссипативных и диссипативных системах представляется актуальной задачей, поскольку в этом случае возможно указать амплитуды насыщения колебаний, описать их временную динамику, определить к.п.д. преобразования кинетической энергии потока в энергию излучения.

В линейно устойчивых неравновесных средах нелинейное взаимодействие может привести к развитию ВН, которые при определенных условиях могут иметь взрывной характер. В этом случае важное значение имеет определение параметров взрывных решений, исследование механизмов насыщения и определение уровня амплитуд насыщения. ВН представляют альтернативный линейному механизму релаксации неравновесных плазменных и гидродинамических систем и требует дальнейшего детального изучения.

В результате развития и стабилизации ПН пучок разбивается на последовательность электронных сгустков, движущихся в плазме. Дальнейшее взаимодействие такого модулированного пучка с плазмой может сопровождаться развитием параметрических неустойчивостей. Если модулирующая внешняя волна распространяется с фазовой скоростью, отличной от скорости пучка, в системе возможно развитие как параметрических, так и пучковых неустойчивостей. Изменяя параметры модулирующей волны можно управлять эффективностью генерации электромагнитных волн в таких системах, характером развивающихся неустойчивостей. Исследование взаимодействия электронных пучков с плазмой, помещенных во внешнее электрическое поле представляет актуальную задачу плазменной электроники. При исследовании неустойчивостей

в таких системах с участием электромагнитных волн может быть решена проблема вывода энергии волн.

Целью диссертационной работы является:

- развитие нелинейной теории неравновесных плазмы и плазмopodobных сред в отсутствие и при наличии диссипативных процессов различной природы;
- теоретическое изучение взаимодействия ограниченных пучков с ограниченной плазмой, а также пучково-плазменных систем во внешних периодических электрических полях.

Научная ценность и новизна Результаты проведенных исследований позволили расширить, углубить и уточнить представления о нелинейной динамике электронных пучков в безграничной и ограниченной плазме при наличии и в отсутствие диссипативных процессов различной природы.

Полученные в диссертации результаты по возбуждению поверхностных волн плазменных резонаторов релятивистскими электронными пучками, а также по влиянию внешних периодических электрических полей на пучково-плазменные неустойчивости позволили оценить эффективность генерации электромагнитных волн, возможности по управлению спектром генерируемых волн.

1. Построена аналитическая теория одномодовой нелинейной резонансной и нерезонансной пучковых неустойчивостей. Получены аналитические выражения для амплитуды и фазовой скорости волны, средней и средней квадратичной скоростей частиц пучка на нелинейной стадии развития пучковой неустойчивости. Аналитически описана динамика закритических электронных пучков в плазменном волноводе, определен коэффициент усиления по амплитуде.

2. Построена аналитическая теория одномодовой нелинейной пучковой неустойчивости при наличии в системе диссипативных эффектов различной природы. Определены аналитические выражения для стационарной амплитуды электрического поля колебаний, описана динамика средней и средней квадратичной скоростей частиц пучка во времени.

3. Предложена модель описания нелинейного взаимодействия ограниченных в поперечном направлении немагнитных электронных пучков с плазменными волноводами с возбуждением

поверхностных волн как в отсутствие, так и при наличии поглощения в плазме. Впервые показано, что:

- насыщение пучковой неустойчивости в отсутствие диссипации обусловлено уходом частиц пучка из области наиболее эффективного взаимодействия;
- при наличии сильного поглощения в плазме в момент входа модулированного электронного пучка в плазменный канал возникает сдвиг фазы волны модуляции относительно сгустков пучка. Это приводит к изменению поперечной составляющей электрического поля поверхностной волны и выбросу частиц пучка в поперечном направлении, что, в конечном итоге, определяет длину транспортировки пучка.

4. Предложена теоретическая модель описания одномодовой нелинейной пучковой неустойчивости в плазме, содержащей "активные" молекулы в условиях дипольно-плазменного резонанса. Показано, что при взаимодействии сильно модулированных электронных пучков с "активной" плазмой возникает периодический режим изменения инверсии среды.

5. Впервые исследовано взаимодействие волны нулевой энергии ограниченной пучково-плазменной системы во внешнем магнитном поле и в гидродинамических стратифицированных течениях. Показано, что при участии во взаимодействии трех волн нулевой энергии реализуется максимальная степень роста взрывных решений.

6. Исследовано взаимодействие аксиальных и азимутальных релятивистских электронных пучков с плазменными резонансами с целью определения эффективности взаимодействия и условий генерации ПВ. Впервые исследована дисперсия азимутальных поверхностных волн цилиндрического магнитоактивного плазменного волновода. Проанализировано влияние внешних периодических электрических полей на пучково-плазменные взаимодействия.

#### Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Аналитическая теория одномодовой нелинейной пучковой неустойчивости, включающая в себя описание динамики развития резонансной и нерезонансной пучковых неустойчивостей, а также закритических пучков в плазменных волноводах.

2. Теория взаимодействия незамагниченных ограниченных электронных пучков с ограниченной плазмой в отсутствие и при наличии диссипативных эффектов в плазме.

3. Аналитическая теория одномодовой нелинейной пучково-плазменной неустойчивости при наличии диссипации в плазме, а также в плазме и в пучке.

4. Исследование дисперсионных свойств "активной" плазмы и нелинейной динамики электронных пучков в "активной" плазме, моделируемой нелинейной двухуровневой системой. Обнаружение динамических процессов в системе модулированный электронный пучок - "активная" плазма, соответствующих режиму периодического сверхизлучения.

5. Обнаружение взрывных режимов с максимальным темпом роста при взаимодействии трех волн нулевой энергии или нулевого потока энергии в неравновесной магнитоактивной плазме, ограниченной в поперечном направлении. Угол симметричного распада равен  $60^\circ$ .

6. Обнаружение взрывного роста возмущений границы раздела гидродинамических течений в трехмерной геометрии (двумерное взаимодействие в горизонтальной плоскости с модовой структурой по вертиткали). Значение предельного угла симметричного распада трех волн нулевой энергии, при котором реализуются взрывные решения с максимальной степенью роста, равно  $37,42^\circ$ .

7. Исследование азимутальных поверхностных волн (АПВ) существующих в цилиндрическом магнитоактивном плазменном волноводе коаксиально расположенном, в проводящем цилиндре большего радиуса.

8. Исследование возбуждения магнитоактивных плазменных резонаторов аксиальными и азимутальными релятивистскими пучками. Выражения для инкрементов неустойчивостей, значение стартового тока для генератора на поверхностной волне.

9. Исследование взаимодействия пучков с плазмой во внешних периодических электрических полях. Зависимость инкремента неустойчивости от:

- соотношения между фазовой скоростью внешней модулирующей волны и скоростью пучка;
- амплитуды электрического поля внешней модулирующей волны.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы Докладывались на III-VI Всесоюзных конференциях "Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой" (Алма-Ата, 1982, 1985; Ташкент, 1989; Душанбе, 1991), Всесоюзных семинарах "Плазменная электроника" (Харьков, 1983, 1988), Международных конференциях по физике плазмы (Киев, 1987, 1992), VI Международной рабочей группе по нелинейным и турбулентным явлениям в физике (Киев, 1989), на VII и VIII Всесоюзных симпозиумах по сильноточной электронике (Томск, 1988; Свердловск, 1990) и частично вошли в монографию А. Н. Кондратенко, В. М. Куклина "Основы плазменной электроники". - М.: Энергоатомиздат, 1988; - 320 с.

Исследования выполнялись в рамках важнейшей тематики кафедры общей и прикладной физики ХГУ "Разработка методов повышения эффективности преобразования кинетической энергии частиц в энергию электромагнитного излучения с целью создания плазменных генераторов и усилителей" (номер госрегистрации 0186.0134719).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 29 печатных работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, пяти разделов, Заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 215 страниц, в том числе 34 рисунка, 4 таблицы и списка цитируемой литературы на 18 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность исследований, проведенных в диссертации, проанализировано современное состояние проблемы, сформулирована цель работы и приведено краткое изложение содержания диссертации.

В первом разделе диссертации изложены результаты численного и аналитического исследования взаимодействия электронных пучков малой плотности с плазмой в одномодовом приближении.

С момента обнаружения существования стационарного состояния в пучково-плазменной системе (Онищенко И.Н. и др. Письма в ЖЭТФ, 1970, т.12, в.3, с. 407; O'Neil I.M., Winfrey I.N., Malmberg J.N. Phys. Fluids, 1971, V.14, N 6, p. 1204) делались неоднократные попытки его аналитического описания с использованием асимптотических методов. Однако эти попытки не привели к желаемым результатам, т.е. не были получены аналитические выражения, дающие возможность определить характерные параметры нелинейного состояния пучка в плазме.

Аналитическому описанию нелинейной стадии пучка в плазме посвящены разделы 1.1-1.3. Здесь, в разделе 1.1, приведена система нелинейных уравнений, описывающая развитие одномодовой гидродинамической пучковой неустойчивости с учетом диссипации в плазме и отстройки частоты модуляции от собственной частоты системы. Приведены инкременты резонансной и нерезонансной пучковых неустойчивостей в отсутствие диссипации.

В следующем разделе (1.1.1) получено решение, описывающее нелинейную стадию пучковой неустойчивости, определена средняя и средняя квадратичная скорости пучка. Сделан вывод о том, что в указанных условиях средняя квадратичная скорость пучка не нарастает, а осциллирует на некотором уровне. Найдены параметры системы, при которых полученное решение описывает нелинейную стадию резонансной пучковой неустойчивости. Это решение использовано в разделе 1.1.2 для описания развития неустойчивости закрытого пучка в плазменном волноводе. Получено выражение для коэффициента усиления по амплитуде

закритическими пучками.

В случае возбуждения нерезонансных колебаний плазмы электронными пучками (разд. 1.1.3) [3,4] также возможно определение аналитическим методом амплитуд стационарных колебаний, средней и средней квадратичной скоростей частиц пучка, которые качественно соответствуют результатам численного моделирования.

Если плазма ограничена в поперечном направлении, спектр собственных частот плазмы обогащается ПВ. Нелинейная динамика замагниченного пучка при возбуждении ПВ качественно не отличается от динамики пучков в безграничных системах. Взаимодействие незамагниченных пучков с ограниченной плазмой и плазменным слоем исследовано в разделах 1.2, 1.3 [5-8]. Здесь показано, что насыщение пучковой неустойчивости с возбуждением ПВ обусловлено уходом частиц пучка из двумерной потенциальной ямы волны. В случае модулированных пучков уровень насыщения амплитуды колебаний выше, чем для немодулированных. При взаимодействии незамагниченных релятивистских пучков с бездиссипативным плазменным слоем из-за различия продольной и поперечной масс электронов пучка картина взаимодействия усложняется. Найдены режимы, соответствующие большим временам существования пучков в плазменных каналах.

Во втором разделе приведены результаты численного и аналитического исследования взаимодействия электронных пучков малой плотности с диссипативной плазмой [3,4,9]. В разделе 2.1 предложен аналитический метод описания нелинейной стадии одномодовой диссипативной гидродинамической пучковой неустойчивости. С помощью этого метода вычислена стационарная амплитуда колебаний, описано изменение средней и средней квадратичной скоростей пучка во времени. В следующем разделе (2.2) разработан аналитический метод описания нелинейной стадии взаимодействия столкновительного электронного пучка с диссипативной плазмой. Здесь определены уровень стационарной амплитуды электрического поля, средняя скорость бунчей пучка, на которые он разбивается в результате развития неустойчивости [9-11]. Полученные аналитические выражения имеют качественное и количественное соответствие с результатами численного

моделирования исходной системы уравнений.

В разделе 2.3 анализируется взаимодействие ультрарелятивистского электронного пучка (УРЭП) с сильнодиссипативным плазменным каналом с возбужденной в нем ПВ конечной амплитуды [12,13]. На основании численного решения системы уравнений (ее вывод аналогичен приведенному в разделе 1.3) предложена физическая картина взаимодействия пучка с диссипативным плазменным каналом. Основной вывод исследования заключается в том, что в равновесном промодулированном пучке в момент попадания его в канал возникает сдвиг фазовой скорости волны модуляции относительно скорости пучка, обусловленный диссипацией в плазме. Этот сдвиг приводит к изменению поперечной составляющей электрического поля ПВ и выбросу частиц пучка в поперечном направлении, интенсивность которого и определяет длину транспортировки пучка.

Третий раздел диссертации посвящен нелинейной теории взаимодействия электронных пучков малой плотности со слабоионизованной плазмой, содержащей "активные" молекулы [14-16]. Система нелинейных уравнений (разд. 3.1) анализируется сначала в линейном приближении (разд. 3.1.1). Определены собственные частоты и инкременты развивающихся пучковых неустойчивостей в условиях дипольно-плазменного резонанса и в его отсутствие. Показано, что в неинвертированной среде возможно развитие неустойчивости диссипативного типа в той области параметров, где ранее система считалась устойчивой (Крашенинников С.И., Старых В.В., Физика плазмы, 1977, т. 3, в. 6, с. 1403). Вычислены значения максимальных инкрементов, которые могут реализоваться при различных значениях параметров плазмы и "активной" среды. В отсутствие дипольно-плазменного резонанса показано существование двух интервалов по волновому числу, в которых возможно развитие пучковой неустойчивости. В разделе 3.2 исследовано возбуждение нелинейной активной плазмы электронными пучками. Показано, что в зависимости от величины плотности электронного пучка в системе возможна либо периодическая перекачка энергии двухуровневой среды в энергию плазменных колебаний, либо развитие пучковой неустойчивости (экспоненциальный рост амплитуды колебаний до уровня

насыщения).

В разделе 3.3 исследовано нелинейное взаимодействие электронного пучка малой плотности с "активной" плазмой в одномодовом режиме в условиях дипольно-плазменного резонанса. Показана резонансная зависимость изменения инверсии первоначально неинвертированной среды, от частоты  $\omega_{\text{раб}}$ : при частотах, сравнимых с инкрементом пучковой неустойчивости возможен перевод активного компонента в инвертированное состояние. В остальных случаях изменения инверсии среды нерегулярны и малы. В случае взаимодействия модулированного пучка с "активной" плазмой (разд. 3.4) [16] возможно осуществление режима, соответствующего периодическому сверхизлучению. Получены аналитические оценки максимальной амплитуды электрического поля, поляризации среды и периода изменения инверсии, которые количественно соответствуют рассчитанным на ЭВМ.

В четвертом разделе анализируются условия проявления вторичных неустойчивостей в пучково-плазменных системах и гидродинамических течениях. В разделе 4.1 исследовано взаимодействие волн нулевой энергии (ВНЭ) и нулевого потока энергии (ВНПЭ) в магнитоактивных плазменных волноводах [17,18]. Показано, что трехволновые распадные процессы возможны в достаточно сильных магнитных полях. Определены условия, когда из трех взаимодействующих волн нулевой энергией обладают одна, две или три волны. Описана динамика взрывных процессов во всех трех случаях. Численными расчетами на ЭВМ показано, что насыщение взрывной неустойчивости с максимальным темпом роста амплитуд полей обусловлено захватом частиц пучка волной (разд. 4.1.1). В разделе 4.2 показано, что при участии во взаимодействии ВНПЭ динамика процессов соответствует взрывному взаимодействию ВНЭ. Однако абсолютное значение усиливаемых волн может быть значительно выше, чем во временной задаче.

В разделе 4.3 впервые показана возможность взрывного роста возмущений границы раздела стратифицированных гидродинамических течений в трехмерной геометрии, имеющих нулевую энергию. [19]. Получена аналитическая зависимость угла распада волн нулевой энергии от параметра устойчивости и найдено предельное значение

этого угла.

В пятом разделе диссертации исследованы особенности взаимодействия РЭП с плазменными резонаторами (20-24), а также влияние внешних периодических полей на пучково-плазменные взаимодействия (25-29). В разделе 5.1 предложена схема генератора на ПВ, состоящая из осевого РЭП и трубчатого плазменного резонатора. Вся система помещена в постоянное магнитное поле, замагничивающее пучок и заключена в металлический волновод. Отмечены отличительные черты данной схемы генератора от предыдущих и ее преимущества. В разделе 5.2 исследовано возбуждение ПВ цилиндрического магнитоактивного плазменного резонатора азимутальными РЭП, движущимися в вакуумной прослойке между плазменным цилиндром и идеально проводящим цилиндрическим волноводом. Показано, что в таких системах существуют азимутальные ПВ (разд. 5.2.1), определены частотные диапазоны их существования, отмечена их однонаправленность и невзаимность. В разделе 5.2.2 исследовано возбуждение азимутальных ПВ азимутальным РЭП, представляющим собой поток осцилляторов. Из дисперсионного уравнения численно и аналитически определены значения максимальных инкрементов, их зависимость от номера моды, величины магнитного поля, толщины вакуумной прослойки.

В разделе 5.3 приведены результаты исследования взаимодействия электронного пучка с плазмой во внешнем периодическом электрическом поле. В случаях возбуждения объемных (электромагнитные и продольные волны) (разд. 5.3.1) и поверхностных (разд. 5.3.2) волн показано, что инкремент неустойчивости зависит от соотношения между фазовой скоростью модулирующего поля и скоростью пучка. Определены значения параметров системы, при которых инкременты максимальны.

В Заключении сформулированы основные оригинальные результаты, полученные в диссертации.

1. Построена аналитическая теория развития одномодовой пучковой неустойчивости в плазме. Получены аналитические выражения для амплитуды электрического поля, фазовой скорости волны, средней и средней квадратичной скоростей частиц пучка на нелинейной стадии развития пучковой неустойчивости. Найденные

решения позволили описать неустойчивость закритического пучка электронов в плазменном волноводе и определить коэффициент усиления по амплитуде. Показано, что предложенная теория применима для описания нелинейной стадии нерезонансной одномодовой пучковой неустойчивости. С ее помощью определены максимальная и минимальная амплитуды осцилляций поля на нелинейной стадии, средняя и средняя квадратичная скорости частиц.

2. Предложена модель описания нелинейного взаимодействия ограниченных в поперечном направлении незамагниченных электронных пучков с ограниченной плазмой с возбуждением ПВ. Исследовано нелинейное взаимодействие ленточного электронного пучка с полуограниченной плазмой. Показано, что насыщение неустойчивости обусловлено уходом частиц пучка из двумерной потенциальной ямы ПВ. Взаимодействие модулированных пучков с ПВ характеризуется большими значениями амплитуд насыщения, чем немодулированных. При взаимодействии незамагниченных РЭП с плазменным слоем картина взаимодействия усложняется из-за различия продольной и поперечной масс электронов пучка. Найдены режимы, соответствующие устойчивому распространению пучков в плазменном канале.

3. Разработан аналитический метод описания нелинейной стадии одномодовой диссипативной пучковой неустойчивости. Определен стационарный уровень насыщения амплитуды колебаний, описана динамика средней и средней квадратичной скоростей частиц пучка. Показано соответствие теоретических представлений результатам численного моделирования.

4. Разработан аналитический метод описания нелинейного взаимодействия столкновительного пучка заряженных частиц с диссипативной плазмой, который позволил определить уровень стационарной амплитуды электрического поля, среднюю скорость сгустков пучка в случаях, когда диссипация в пучке обусловлена кулоновскими столкновениями с сопровождающим ионным фоном или рассеянием электронов пучка на сопутствующих нейтралах. Показано качественное и количественное соответствие теоретических представлений результатам численного моделирования.

5. Предложена теоретическая модель описания взаимодействия немагнитного РЭП малой плотности с сильнодиссипативным плазменным каналом в присутствии поля ПВ. Показано, что сдвиг фазы волны модуляции относительно бунчей пучка, возникающий при его входе в плазменный канал, приводит к изменению поперечной составляющей электрического поля ПВ и выбросу некоторой доли частиц пучка в поперечном направлении, что, в конечном итоге, определяет длину транспортировки пучка. Предложенное теоретическое представление качественно соответствует результатам эксперимента.

6. Рассмотрены особенности взаимодействия электронных пучков с "активной" плазмой в условиях дипольно-плазменного резонанса. Показано, что в "пассивной" среде возможно развитие неустойчивости диссипативного типа в той области параметров, где по оценкам других авторов неустойчивость отсутствует. Вычислены максимальные инкременты.

Определены инкременты неустойчивостей, волновые числа и собственные частоты системы пучок-"активная" плазма вдали от дипольно-плазменного резонанса. Показано существование двух интервалов по волновому числу, в которых возможна неустойчивость.

7. Изучена динамика взаимодействия электронного пучка с нелинейной "активной" средой, содержащейся в слабоионизованной плазме. Показано, что при малых плотностях пучка в среде наблюдается периодическая перекачка энергии двухуровневой среды в энергию плазменных колебаний. При больших плотностях пучка влияние присутствия "активной" примеси несущественно и в среде развивается обычная пучковая неустойчивость.

8. Исследовано нелинейное взаимодействие электронного пучка малой плотности с "активной" плазмой в одномодовом приближении в условиях дипольно-плазменного резонанса. Показана резонансная зависимость инверсии среды, находящейся первоначально в неинвертированном состоянии, от частоты  $\omega_{abi}$ : при частотах  $\omega_{abi}$ , сравнимых с инкрементом пучковой неустойчивости, возможен перевод среды в инвертированное состояние; при малых и больших по сравнению с инкрементом пучковой неустойчивости ее значениях изменение инверсии среды

несущественно.

Показано, что при взаимодействии сильно модулированных электронных пучков с "активной" плазмой возможно существование режима, соответствующего периодическому сверхизлучению.

9. Исследовано взаимодействие ВНЭ в неравновесном магнитоактивном плазменном волноводе, где:

- показано, что распадные процессы возможны в достаточно сильных магнитных полях;
- определены условия, когда из трех взаимодействующих волн нулевой энергией обладают одна, две или три волны (в последнем случае, угол распада волн оказывается равным  $60^\circ$ , а темп роста возмущений максимальный);
- описана динамика взрывов во всех трех случаях;
- численным моделированием показано, что насыщение неустойчивости обусловлено захватом частиц пучка возбуждаемыми им волнами.

10. Исследовано взаимодействие ВНПЭ в неравновесном магнитоактивном плазменном волноводе. Показано, что динамика взаимодействия ВНПЭ соответствует взрывному взаимодействию ВНЭ. Однако, абсолютное значение амплитуд взаимодействующих волн выше, чем во временной задаче.

11. Впервые показана возможность взрывного роста возмущений границы раздела стратифицированных течений в трехмерной геометрии (двумерное взаимодействие в горизонтальной плоскости волн с модовой структурой по вертикальной координате). Определена зависимость угла распада ВНЭ от параметра устойчивости и найдено его предельное значение, при котором реализуется взрывное решение с максимальной степенью роста.

12. Исследованы особенности неустойчивости аксиальных РЭП в цилиндрических плазменных резонаторах с возбуждением ПВ. Предложенная схема генератора отличается от генераторов на объемной волне тем, что: энергия ПВ сосредоточена вблизи границы плазмы и может быть легко выведена из области взаимодействия; в области возбуждения электромагнитной волны пучок и плазма пространственно разделены. Показано, что при сравнимых к. п. д. генераторов на объемной и поверхностной волне,

последние характеризуются большим диапазоном изменения рабочей частоты.

13. Впервые исследована дисперсия азимутальных ПВ (АПВ) цилиндрического магнитоактивного плазменного волновода, ограниченного проводящим цилиндром большого радиуса. Определены частотные диапазоны существования АПВ, отмечены их невзаимность и однонаправленность.

14. Исследовано возбуждение АПВ азимутальными РЭП. Определено максимальное значение инкремента неустойчивости и его зависимость от плотности плазмы, волнового числа, величины магнитного поля и толщины вакуумной прослойки. Показано, что уменьшение толщины вакуумной прослойки, увеличение напряженности магнитного поля и моды волны приводит к увеличению инкремента неустойчивости.

15. Исследовано взаимодействие электронного пучка с плазмой во внешнем электрическом поле типа бегущей волны (ЭПБВ) с возбуждением двух продольных объемных волн, либо объемной продольной и электромагнитной (обыкновенной или необыкновенной) волн. Показано, что величина инкремента зависит от соотношения между фазовой скоростью ЭПБВ и скоростью пучка. Когда эти скорости сравнимы, величина инкремента оказывается порядка гидродинамического пучкового, когда их рассогласование велико, неустойчивость соответствует параметрической неустойчивости плазмы в поле ЭПБВ.

Когда внешнее ЭПБВ наложено только на электронный пучок малой плотности, пространственно разделенный с плазмой, величина инкремента неустойчивости оказывается порядка пучкового. Наличие модуляции пучка приводит к малому отклонению величины инкремента от инкремента пучковой неустойчивости, как при больших, так и при малых рассогласованиях между скоростью пучка и фазовой скоростью волны модуляции.

- [1] Кондратенко А.Н., Ткаченко В.И. Нелинейная теория взаимодействия электронного пучка малой плотности с плазмой. - УФЖ, 1987, т. 32, № 1, с. 53-58.
- [2] Kondratenko A.N., Tkachenko V.I. Nonlinear theory of one-mode beam-plasma systems. - Proc. Contr. Paper. Int. Conf. Plasma Phys., Kiev, April 6-12, 1987, v.3, p. 230-231.
- [3] Tkachenko V.I. Nonlinear processes in one - mode beam-plasma systems. - Proc. of the IV Int. Workshop on nonlinear and turbulent processes in physics, Kiev, 1989, v. 1, p. 433-436.
- [4] Гуленко В.В., Ткаченко В.И., Шербилина И.Б. Диссипативные и нерезонансные неустойчивости одномодовых пучково-плазменных систем. - Проблемы ядерной физики и космических лучей. Вып. 31, 1989, с. 61-64.
- [5] Нелинейное взаимодействие незамагниченного ленточного электронного пучка с поверхностными плазменными волнами. - В.А. Гирка, В.В. Гушин, С.С. Мойсеев, О.Ю. Нагучев, В.Г. Пунгин, В.И. Ткаченко. - Препринт ИКИ АН СССР, Пр-1327, Москва, 1988, 20 с.
- [6] Мойсеев С.С., Нагучев О.Ю., Ткаченко В.И., Дубовик В.Н. Рассеяние незамагниченного ленточного электронного пучка поверхностными волнами. - Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1992, т. 35, в. 1, с. 49-55.
- [7] Гушин В.В., Дубовик В.Н., Нагучев О.Ю., Ткаченко В.И. Взаимодействие незамагниченных РЭП с поверхностными волнами плазменных каналов. - Тез. докл. VIII Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике, Свердловск, май, 1990, ч. 2, с. 46-48.
- [8] Транспортировка незамагниченного РЭП поверхностными волнами плазменного слоя. - В.В. Гушин, В.Н. Дубовик, С.С. Мойсеев, О.Ю. Нагучев, В.И. Ткаченко. - Препринт ИКИ АН СССР, Пр-1716, Москва, 1990, 32 с.

- [9] Гуленко В.В., Ткаченко В.И. Об аналитической теории нелинейных диссипативных пучково-плазменных систем. - Письма в ЖФ, 1988, т. 14, в. 23, с. 2179-2183.
- [10] Бондаренко М.Б., Ткаченко В.И. О неустойчивости столкновительных пучков в низкотемпературной плазме. - Тез. докл. Всесоюзного семинара "Плазменная электроника", Харьков, 2-5 октября, 1983, с. 57-59.
- [11] Бондаренко М.Б., Ткаченко В.И., Ткаченко Вл.И. О нелинейном взаимодействии электронно-ионного потока с диссипативной плазмой. - Радиотехника и электроника, 1987, т. 32, в. 3, с. 596-600.
- [12] Ткаченко В.И., Зейдлиц В.П., Нагучев О.Ю., Синюгин А.В. Рассеяние модулированного УРЭП атмосферным плазменным каналом. - Препринт ХФТИ, 92-5, Харьков: ХФТИ, 1992, 16 с.
- [13] Tkachenko V.I., Zejdlics V.P., Sinugin A.V. Transportation of a modulated ultrarelativistic electron beam (UREB) in an atmosphere. - Contributed Papers. Workshop on Turbulence and Nonlinear Processes in Plasmas, Kiev, Ukraine, April 13-29, 1992, p.129.
- [14] Бондаренко М.Б., Кондратенко А.Н., Ткаченко В.И. О взаимодействии пучков заряженных частиц с активной плазменной средой. - Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1984, т. 27, в. 11, с. 2096-2103.
- [15] Нелинейное взаимодействие электронного пучка с активной плазменной средой. - Ш.Ш. Моисеев, Г.Г. Чигладзе, И.Б. Щербинина, В.И. Ткаченко. - Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1990, т. 33, в. 10, с. 1116-1123.
- [16] Tkachenko V.I. A periodic superradiant Radiation (SR) of active plasma generated by modulated electron beams. - Contr. Papers & Workshop on Turbulence and Nonlinear Processes in Plasmas, Kiev, Ukraine, April 13-29, 1992, p. 126-128.
- [17] Взрывные неустойчивости в течениях плазмы и жидкости. - В.В. Гуленко и др. - В Сб. Взаимодействие и самовоздействие волн в нелинейных средах. т. 1, 1988, Душанбе: Дониш, с. 35-72.
- [18] Гуленко В.В., Ткаченко В.И. Вторичные неустойчивости

- ограниченных пучково-плазменных систем. - Тез. докл. III Всесоюзного семинара "Плазменная электроника", Харьков, 6-9 сентября, 1988, с. 170-171.
- [19] Гущин В. В., Моисеев С. С., Пунгин В. Г., Ткаченко В. И. Неодномерные и автомодельные свойства взрывных процессов в стратифицированных сдвиговых течениях. - ДАН СССР, 1985, т. 285, № 1, с. 65-68.
- [20] Гуленко В. В., Кондратенко А. Н., Ткаченко В. И. Генерация поверхностных волн пучками заряженных частиц в плазменном резонаторе. - Радиотехника и электроника, 1998, т. 33, в. 7, с. 1551-1554.
- [21] Гирка В. А., Гирка И. А., Кондратенко А. Н., Ткаченко В. И. Азимутальные поверхностные моды магнитоактивных плазменных волноводов. - Радиотехника и электроника, 1988, т. 33, в. 5, с. 1031-1035.
- [22] Гирка В. А., Кондратенко А. Н., Ткаченко В. И. Возбуждение азимутальных поверхностных мод релятивистскими электронными пучками. - Тез. докл. VII Всесоюзного симпозиума по силовоточной электронике, май, 1988, Томск, 41, с. 256-258.
- [23] Гирка В. А., Гирка И. А., Олефир В. П., Ткаченко В. И. К теории плазменного гиротрона на азимутальных поверхностных волнах. - Тез. докл. V Всесоюзной конференции "Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой", Ташкент, 30 окт. - 2 нояб., 1989, с. 204.
- [24] Гирка В. А., Гирка И. А., Олефир В. П., Ткаченко В. И. Генерация электромагнитных волн кольцевыми РЭП. - Письма в ЖТФ, 1991, т. 17, в. 1, с. 87-89.
- [25] Олефир В. П., Ткаченко В. И., Ткаченко Вл. И. Пучково-плазменные взаимодействия в периодических электрических полях. - В Сб. Взаимодействие и самовоздействие волн в плазменных средах, т. 1, 1989, Душанбе: Дониш, с. 167-177.
- [26] Ткаченко В. И., Ткаченко Вл. И. Плазменно-пучковые неустойчивости в периодическом электрическом поле. - УФЖ, 1978, т. 23, в. 4, с. 549-556.
- [27] Куклин В. М., Ткаченко В. И., Пенева И. Х. К теории пучково-плазменных взаимодействий в периодических

электрических полях. - Болг. физ. журн., 1983, т.10, в.4, с.450-454.

- [28] Бондаренко М.Б., Репалов Н.С., Ткаченко В.И. Взаимодействие пучков с магнитоактивной плазмой во внешних электростатических полях. - Радиотехника и электроника, 1984, -т.29, в.9, с.1784-1787.
- [29] Кондратенко А.Н., Куклин В.М., Ткаченко В.И. Неустойчивость модулированных пучков, пространственно разделенных с плазмой. - Радиотехника и электроника, 1979, т. 24, в. 2, с.343-351.

Ответственный за выпуск *д. р. и. н., проф. Кондратишко А. Н.*  
Подп. к печ. *20.07.93г.* Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Бумага тип. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10  
Уч.-изд. л. *1.0* Тираж *100* экз. Зак. № *2401* Бесплатно.

---

Харьковское межвузовское арендное полиграфическое предприятие.  
310093, Харьков, ул. Свердлова, 115.

MS 180

465999

AB 27.864

**AB 27.864**

*[Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page]*

*[Faint handwritten text]*