

Харьковский государственный университет

На правах рукописи

КИСЕЛЁВ Валентин Анисимович



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ
ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ И ИОННЫХ ПУЧКОВ БОЛЬШОЙ ЭНЕРГИИ
С ПЛАЗМОЙ

Специальность 01.04.08 - физика и химия плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Харьков - 1992

№ 26.444

Работа выполнена в Украинском научном центре "Харьковский физико-технический институт "

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00814476 (U)

споненты:

доктор физико-математических наук
профессор СОЛОШЕНКО Игорь Александрович (Институт физики г.Киев)

доктор физико-математических наук,
профессор КОНДРАТЕНКО Анатолий Николаевич (Харьковский государственный университет)

доктор физико-математических наук,
профессор ХАРЧЕНКО Игорь Федорович (Харьковский физико-технический институт)

ведущая организация:

Радиоастрономический институт АН
Украины, г.Харьков

защита состоится 28 января 1993 г. в 15 часов на заседании Специализированного совета Д 053.06.01 в Харьковском государственном университете по адресу: 310108 г.Харьков-108, пр.Курчатова 31, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в центральной научной библиотеке Харьковского государственного университета

Автореферат разослан "28" декабря 1992 г.

Учёный секретарь специализированного
совета

доктор физико-математических наук

Латшын

В.И. Латшын



I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Экспериментальные исследования коллективных взаимодействий моноэнергетических с малой угловой расходимостью релятивистских электронных пучков (РЭП) и ионных пучков большой энергии с плазмой представляют большой научный и прикладной интерес для процессов нагрева плазмы в открытых ловушках при решении проблемы управляемого термоядерного синтеза (УТС), при решении задач по генерации электромагнитных излучений в коротковолновом (миллиметровом и субмиллиметровом) диапазоне длин волн, а также для возбуждения больших ускоряющих электрических полей модулированными РЭП и волнами плотности заряда в плазме при разработке новых методов ускорения заряженных частиц.

Значение этих работ определяется экспериментальными исследованиями эффективности взаимодействия модулированных РЭП с диссипативной и неоднородной по плотности плазмой, результаты которых могут быть использованы для целей неравновесной плазмохимии и в области физики радиационных повреждений в условиях вывода таких пучков в объемы с нейтральным газом при больших давлениях.

Поэтому данная работа, посвященная исследованиям эффективности взаимодействия модулированных РЭП и ионных пучков большой энергии с плазмой^{х)}, а также моноэнергетических с малой угловой расходимостью РЭП с плотной плазмой и сопровождающие такие взаимодействия физические процессы, является актуальной.

Цели и задачи исследований. Диссертация посвящена экспериментальному исследованию физических процессов, возникающих при:

I. Коллективном взаимодействии модулированных моноэнергетических с малой угловой расходимостью РЭП с заранее приготовленной плазмой в условиях резонанса частоты модуляции пучка и плазменной частоты ($\omega_M \sim \omega_p$), когда обеспечивается высокая степень когерентности излучения частиц пучка как в пределах

^{х)} эффективность взаимодействия пучков заряженных частиц с плазмой определяется относительной величиной энергии пучка, которая расходуется на возбуждение колебаний в плазме и ее нагрев.

сгустка, так и между ними. 2. Коллективном взаимодействии моноэнергетических с малой угловой расходимостью РЭП с плотной плазмой в условиях развития гидродинамической стадии пучково-плазменной неустойчивости, включающих в себя зависимость эффективности такого взаимодействия от плотности плазмы и степени релятивизма пучка, возможность нагрева плотной плазмы моноэнергетическими РЭП, генерации электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн и возбуждение интенсивных электрических полей, обеспечивающих возможность разработки новых методов ускорения заряженных частиц. 3. Исследования прохождения моноэнергетических модулированных РЭП и ионных пучков больших энергий через нейтральные газы в широком диапазоне давлений, к которым относятся возможность создания плазмы такими пучками при отсутствии магнитного поля, взаимодействие их с образованной плазмой в условиях большой частоты столкновений и продольной неоднородности плотности плазмы, возможность использования создаваемых в этих условиях пучково-плазменных разрядов (ППР) для целей неравновесной плазмохимии и использование полученных результатов в области физики радиационных повреждений.

Основные положения, выдвигаемые к защите, которые определяют научную новизну полученных результатов.

1. Впервые было показано, что эффективность взаимодействия релятивистских электронных пучков с плазмой увеличивается при использовании моноэнергетических с малой угловой расходимостью РЭП.

2. Впервые были обнаружены эффекты когерентных потерь энергии модулированным моноэнергетическим РЭП и возбуждение им коллективных колебаний в плазме. При этом относительные потери энергии на коллективные взаимодействия РЭП с относительно небольшим током ($I\beta \sim 1$ А) благодаря модуляции и эффекту когерентности становятся сравнимыми с потерями энергии сильноточных немодулированных РЭП.

3. Использование модулированных РЭП дает возможность возбуждать колебания с узким частотным спектром в плазменных волноводах большой длины ($l \sim 2$ м). При этом возбуждаемые электрические поля сосредоточены в основном внутри плазменного волновода.

4. Впервые экспериментально показано, что эффективность коллективных взаимодействий моноэнергетических с малой угловой расходимостью РЭП при увеличении плотности плазмы не только не уменьшается, но и увеличивается при увеличении степени моноэнергетичности пучка.

5. Такие взаимодействия, приводящие к сильному уменьшению длины релаксации пучка в плазме, сопровождаются возбуждением волн миллиметрового диапазона и возникновением локализованного рентгеновского излучения. Наблюдаемая временная и пространственная корреляция зон уменьшения плотности плазмы, локализованного рентгеновского и СВЧ излучений свидетельствуют о наличии локализованной области сильных высокочастотных полей, в которых электроны пучка и плазмы приобретают энергию.

6. Впервые показано, что с ростом релятивистского фактора γ (при увеличении энергии электронного пучка от 2 МэВ до 20 МэВ) эффективность коллективных взаимодействий моноэнергетического РЭП с плотной плазмой не уменьшается. Об этом свидетельствуют аномально большие потери энергии пучком, нагрев плазмы и ускорение части электронов пучка и плазмы в возбуждаемых электрических СВЧ-полях.

7. С помощью численного моделирования и экспериментального исследования показано, что использование РЭП с большой глубиной модуляции по плотности приводит к существенному ослаблению влияния диссипации и продольной неоднородности плотности плазмы на процессы их взаимодействия.

8. При прохождении моноэнергетических модулированных РЭП с относительно небольшим током (~ 1 А) через нейтральные газы большого давления образуется плазма, с которой пучок эффективно взаимодействует. Об этом свидетельствует плотность образованной плазмы, на три порядка превосходящей плотность пучка, СВЧ и рентгеновское излучение, локализованные в области взаимодействия, а также обнаруженное в эксперименте увеличение полного тока ($I_n = I_b + I_p$, где I_b - ток пучка, I_p - плазменный ток) при прохождении пучка через область взаимодействия.

9. Показана возможность использования модулированных моноэнергетических РЭП с относительно небольшими токами для целей

неравновесной плазмохимии в условиях больших плотностей используемого исходного газообразного вещества.

10. Обнаружен новый механизм токовой нейтрализации протонных сгустков при прохождении модулированного протонного пучка большой энергии ($W = 5$ МэВ) через нейтральный газ различной плотности, который обусловлен возникновением обратного плазменного тока при изменении азимутального магнитного поля на фронтах сгустков. При давлении выше критического (для условий эксперимента $P_{кр} \approx 6 \cdot 10^{-3}$ торр) возбуждается пучково-плазменная неустойчивость, которая приводит к развитию пучково-плазменного разряда и уменьшению (в условиях большой частоты столкновений) степени токовой нейтрализации протонного пучка.

Эти основные положения, которые определяют научную новизну результатов, полученных в диссертации, составляют новое перспективное направление в плазменной электронике - взаимодействие моноэнергетических с малой угловой расходимостью модулированных и немодулированных РЭП и ионных пучков большой энергии с плазмой и нейтральным газом в широком диапазоне плотностей.

Научная и практическая ценность. Несмотря на то, что теория давно предсказывала возможность коллективного взаимодействия РЭП с плазмой, к началу проведения наших работ в 1969 году не было экспериментов, подтверждающих теоретические выводы. Более того, в экспериментах Менделла и Нолта (*J. of Appl. Phys.*, 5416, 1967) такого взаимодействия обнаружено не было. В настоящей диссертации описаны эксперименты, в которых впервые было обнаружено коллективное взаимодействие модулированного РЭП с относительно небольшим током с плазмой, ленгмювская частота которой совпадала с частотой модуляции пучка. Кроме того, впервые было показано, что эффективность взаимодействия РЭП с плотной плазмой увеличивается, если использовать пучки с высокой степенью моноэнергетичности и малой угловой расходимостью электронов пучка.

Большое прикладное значение имеют исследования по взаимодействию модулированных РЭП и ионных пучков большой энергии с

плазмой, образованной ими при прохождении через нейтральный газ, так как показано существенное ослабление влияния диссипации и продольной неоднородности плотности плазмы на эффективность взаимодействия в случае глубокой модуляции пучка по плотности.

Результаты описанных в диссертации экспериментов и выводы получили подтверждение в ряде экспериментов, выполненных позднее как в СССР, так и за рубежом. В частности, результаты экспериментов по взаимодействию модулированного пучка с плазмой в условиях $\omega_m \sim \omega_p$ были повторены в работе *Phys. Rev.*, *V. 179*, *243*, *1973*, а результаты по взаимодействию моноэнергетических РЭП с плотной плазмой — в работах ИЯЭ СО АН СССР (*Proc. of Intern. Conf. on Plasma Physics, Nagoya, Japan, V. 1, 74, 1980*).

Проведенные нами работы по исследованию взаимодействия моноэнергетических РЭП с плотной плазмой были отмечены в числе важнейших достижений по физике плазмы в 1974, 1975 и 1978 годах Научным Советом при Президиуме АН СССР по проблеме "Физика плазмы".

Результаты описанных в диссертации экспериментов могут быть использованы при создании установок для нагрева плазмы релятивистскими пучками в открытых ловушках, при создании генераторов электро-магнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне, а также при создании неравновесных плазмохимических реакторов в условиях большого давления используемых исходных газообразных веществ.

Апробация результатов работ. Все основные результаты диссертации опубликованы в печати и докладывались на Международной конференции по физике плазмы (Висконсин, США, 1971 г.), Международных конференциях по мощным электронным и ионным пучкам (Новосибирск, СССР, 1973, 1979, 1990 гг.), на Международных симпозиумах по коллективным методам ускорения заряженных частиц (Дубна, СССР, 1972, 1976, 1978 гг.), на Международном рабочем совещании по новым схемам ускорения (Дубна, СССР, 1990 г.), на Всесоюзных конференциях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 1973, 1974, 1976, 1978, 1980, 1989 гг.), на Всесоюзных семинарах по мощным электронным и ионным пучкам (Новосибирск, 1985, 1987 гг.), на

Всесоюзных семинарах по плазменной электронике (Харьков, 1963, 1967 гг., Томск, 1965 г.), на Втором Всесоюзном совещании по новым методам ускорения заряженных частиц (Нор-Амберд, Армения, 1969 г.).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав основного текста и заключения - всего 218 страниц машинописного текста, в том числе 86 рисунков и таблиц. Библиография включает 150 наименований.

2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении содержится краткий обзор литературы по взаимодействию релятивистских электронных и ионных пучков с плазмой, обоснована актуальность темы диссертационной работы, кратко изложено содержание диссертации, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Неустойчивость, возникающая при взаимодействии потоков заряженных частиц с плазмой, теоретически была предсказана еще в 1948 году А.И.Ахиезером и Я.В.Файнбергом (отчет ХЭТИ АН УССР, 1948, ДАН СССР, 69, 555, 1949), а также П.Д.Бомом и Е.П.Гроссом (*Phys. Rev.*, 75, 1851, 1949). Позднее такая неустойчивость была обнаружена экспериментально Я.В.Файнбергом, И.Ф.Харченко и Е.А.Корниловым (*ЖЭТФ*, 38, 685, 1960). В дальнейшем, наряду с другими особенностями пучково-плазменного взаимодействия, большой интерес для теоретического и экспериментального исследования представили влияние на процесс взаимодействия двух факторов: релятивизма пучка и плотности плазмы. Это было связано с тем, что взаимодействие мощных релятивистских пучков с плазмой большой плотности предполагалось использовать при нагреве плазмы в открытых ловушках, а также для генерации электро-магнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн и разработках новых методов ускорителя заряженных частиц.

Из линейной теории взаимодействия РЭП с плазмой, развитой К.Ватсоном, С.Блудманом и М.Розенблютом (*Phys. Fluids*, 8, 741, 1960), а также Е.Е.Ловецким и А.А.Рухадзе (*ЖЭТФ*, 48, 514, 1965), следует, что благодаря релятивистскому возрастанию массы электронов пучка инкременты возбуждаемых колебаний сильно уменьшаются. Из этого справедливого утверждения было бы непра-

вильно делать заключение о понижении эффективности пучково-плазменного взаимодействия при релятивистских энергиях электронного пучка. Как показывает нелинейная теория (Файнберг Я.Б., Шапиро В.Д., Шевченко В.И., ЖЭТФ, 57, 966, 1969), пучок остается моноэнергетическим и при значительном разбросе электронов пучка по скоростям, обусловленным обратным влиянием возбуждаемых колебаний на пучок, учитываемых, естественно, только нелинейной теорией.

Благодаря резонансному характеру взаимодействия моноэнергетического пучка с плазмой, затягивается гидродинамическая стадия этого взаимодействия, что должно приводить к сильному возрастанию части энергии, передаваемой от пучка к плазме. Таким образом, теория показывала, что эффективность взаимодействия, определяемая как относительная величина энергии, передаваемая от пучка к плазме, не только не должна уменьшаться, но и возрастать при релятивистских энергиях пучка.

В связи с вышеизложенным, в наших экспериментах по исследованию эффективности взаимодействия РЭП с плазмой использовались пучки с относительно небольшими токами (~ 1 А), но с большой энергией ($W = 2+20$ МэВ), с большой длительностью импульса ($\tau = 2+10$ нс), с узкой функцией распределения электронов пучка по энергиям и с малым угловым разбросом электронов пучка.

Кроме того, в наших экспериментах использовались пучки с большой глубиной модуляции по плотности. Последнее обстоятельство имеет существенное значение в том случае, когда становится возможным когерентное торможение РЭП в плазме, являющееся обратным эффектом когерентного ускорения В.И.Векслера. Действительно, эффективность возбуждения коллективных колебаний в плазме потоком заряженных частиц определяется интенсивностью излучения в элементарном эффекте, степенью когерентности элементарных излучателей и интенсивностью группировки этих излучателей полем возбуждаемых колебаний. Поэтому интенсивность коллективных взаимодействий в релятивистской области энергий можно повысить путем использования группировки пучка в сгустки внешними или коллективными полями, позволяющим обеспечить высокую степень когерентности спонтанного излучения частиц пуч-

ка (в пределах образованных сгустков и между ними). Так как используемые нами пучки представляют собой последовательность отдельных сгустков, то были проведены исследования взаимодействия модулированного РЭП с плазмой, ленгмювская частота которой $\omega_p \equiv (4\pi n_p \cdot e^2/m)^{1/2}$ была близка к частоте модуляции пучка ($\omega_p \sim \omega_m$).

В главе I рассмотрены некоторые теоретические соотношения взаимодействия моноэнергетических РЭП с плазмой, определяющих выбор условий экспериментальных исследований. При исследовании релаксации РЭП в плазме существенным является вопрос о виде функции распределения электронов пучка по энергиям и величине углового разброса электронов пучка. Относительно небольшие потери энергии сильноточными релятивистскими пучками в первых экспериментах по исследованию взаимодействия РЭП с плазмой объясняются тем, что они проводились с использованием пучков с большим разбросом электронов по энергиям и большой угловой расходимостью электронов. Но для развития гидродинамической стадии пучково-плазменной неустойчивости необходимо использовать пучки с небольшим разбросом по продольным скоростям, удовлетворяющих условию $\Delta v_{\parallel}/v \leq \delta/\omega_p$ (Иванов А.А., Параил В.В., Соболева Т.К., ЖТФ, 63, 1678, 1972), где δ - инкремент неустойчивости. В связи с этим пучки, обладающие тепловым и угловым разбросом, могут быть разделены на:

- гидродинамические (холодные) пучки, когда $\Delta v_{\parallel}/c < (n_p/n_e)^{1/2} 1/\beta$, где $\Delta v_{\parallel}/c \sim \Delta W/W \beta^2 + (\delta\theta)^2$ ($\Delta W/W$ - ширина функции распределения электронов пучка по энергиям, $\delta\theta$ - угловой разброс, $\beta = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ - релятивистский фактор), а релаксация определяется инкрементом $\delta_r \approx \sqrt{3}/2 v_p \omega_p (n_p/n_e)^{1/2} 1/\beta$;
- кинетические (теплые) пучки, когда $(\delta\theta)^2 \leq \Delta W/W \beta^2$, а $\Delta v_{\parallel}/c \gg (n_p/n_e)^{1/2} 1/\beta$, характерным инкрементом которых является $\delta_k \sim \omega_p \cdot n_p/n_e \cdot 1/\beta \cdot 1/\omega c^2$;
- квазигидродинамические пучки, когда $(\delta\theta)^2 > \Delta W/W \beta^2$, а $\Delta v_{\parallel}/c \gg (n_p/n_e)^{1/2} 1/\beta$.

В последнем случае пучок релаксирует как гидродинамический, если $\Delta n/n_e > 0,15$ и $\delta\theta < 1/\beta$, и как кинетический, если $\Delta n/n_e < 0,15$ и $\delta\theta > 1/\beta$ (L. Thode, Phys. Fluids, 19,

305, 1976). Величина $\Delta n/n_e$ определяет часть пучка, попадающего в конус углов рассеивания $\delta\theta^2 \leq (n_e/n_p)^{1/3} 1/\gamma^2$, которая может рассматриваться как моноэнергетическая.

Следует отметить, что инкремент кинетической неустойчивости уменьшается при увеличении плотности плазмы ($\delta\epsilon \sim n_p^{-1/2}$), а в случае моноэнергетических РЭП, условием которых является

$$\frac{\Delta W}{W n_e} + (\delta\theta)^2 \leq (n_e/n_p)^{1/3} 1/\gamma^2 \quad (1)$$

Гидродинамический инкремент увеличивается с ростом плотности плазмы ($\delta n \sim n_p^{1/6}$).

Если плотность плазмы невелика, то и инкремент возбуждаемых колебаний невелик. Однако использование РЭП с большой глубиной модуляции по плотности устраняет характерное для процессов индуцированного взаимодействия увеличение времени нарастания амплитуды поля с ростом энергии электронов пучка. Более того, ослабление обратного воздействия возбуждаемого поля на пучок, обусловленное релятивистским ростом массы электронов, обеспечивает в данном случае повышение максимальной амплитуды возбуждаемого поля.

Из теории черенковского излучения частицы, движущейся вдоль оси гиротропного плазменного волновода (Курилко В.И., Толстолужский А.П., Файнберг Я.Б., ВАНТ. Сер. Физика высоких энергий, 1, 92, 1972) следует, что основной вклад в черенковское излучение в этом случае дают объемные волны. В данной главе приведены расчеты амплитуды и фазы волны, возбуждаемой при взаимодействии модулированного РЭП с плазмой в условиях резонанса $\omega_m \sim \omega_p$ /1/.

Другим достоинством модулированного пучка является его меньшая чувствительность к продольным неоднородностям плотности плазмы, поскольку такая неоднородность нарушает синхронизм между пучком и возбуждаемой волной. Предварительная модуляция пучка позволяет ослабить нежелательное влияние продольного градиента плотности плазмы.

Для немодулированного пучка условием срыва неустойчивости является выход из черенковского резонанса пучка с волной, ширина которого порядка пространственного инкремента $\kappa \approx 1/2$:

$$\kappa(z) - \kappa_0 \approx \kappa \equiv (n_e/n_p \cdot v_0/v_g)^{1/3} \frac{\kappa_0}{\gamma} \quad (2)$$

где v_g - групповая скорость. Полагая, что неоднородность плазмы приводит к линейному изменению волнового вектора

$$k(z) = k_0 (1 + z/L_1), \quad (3)$$

где L_1 - характерный масштаб неоднородности, и учитывая, что это изменение должно произойти на расстояниях меньших тех, где амплитуда волны достигает максимального значения E_{max}

($z = z_1 = v_g \ln E_{max}/E_{флук} = \Lambda/z$, Λ - кулоновский логарифм, $E_{флук}$ - начальное значение амплитуды), находим оценку характерной длины неоднородности, еще не срывающей развитие неустойчивости:

$$L_1 \approx \frac{\Lambda \cdot k_0}{z^2} \quad (4)$$

В случае предварительно промодулированного пучка условие срыва пучково-плазменного взаимодействия сводится к требованию, чтобы фаза сгустка в волне изменилась на π :

$$\int_0^{z_2} [k(z) - k_0] dz \approx \pi \quad (5)$$

Для неоднородности вида (3) это приводит к характерному масштабу $L_2 \approx k_0 z_1^2 / 2\pi$, где z_1 - расстояние, на котором достигается максимум амплитуды возбуждаемой волны. Для модулированного пучка это расстояние примерно на порядок меньше по сравнению со случаем немодулированного пучка. Отношение характерных масштабов неоднородности плотности плазмы, при которых еще возможно пучково-плазменное взаимодействие, для немодулированного и модулированного пучков $\alpha = L_1/L_2 = 2\pi z_1^2/z_1^2$.

Так как $z_1 \sim \frac{\Lambda}{z}$, $z_2 \sim \frac{z}{z_1}$, то $\alpha \sim \frac{8\Lambda}{z} \gg 1$, и, следовательно, для неоднородной плазмы предпочтительнее использовать модулированные пучки.

Исходя из вышесказанного, в наших экспериментах по исследованию пучково-плазменного взаимодействия использовались модулированные релятивистские электронные пучки с узкой функцией распределения электронов пучка по энергиям и малым угловым разбросом.

В разделе 2.1 второй главы приводятся характеристики пучков, используемых в экспериментах по исследованию пучково-плазменного взаимодействия.

Для получения модулированных релятивистских пучков с узкой функцией распределения электронов по энергиям и малой угловой расходимостью использовались линейные ускорители электронов на основе диафрагмированного, разработанных и эксплуатируемых в ХФТИ АН УССР (ускорители "Алмаз-П" и ЛУ-40). Пучки электронов, получаемых на этих ускорителях, имели следующие параметры: энергия $W = 2+20$ МэВ, ток в импульсе $I\tau \sim 1$ А, длительность импульса $\tau = 2+10$ мкс, диаметр пучка $d \approx 0,8-1,2$ см. ширина функции распределения электронов пучка по энергиям $\Delta W/W = 8\%$, частота модуляции пучка $f_0 = 2805$ Мгц. Пучок выходит из ускорителя в виде $6 \cdot 10^3$ отдельных сгустков. Так как фазовый размер сгустка, определенный с помощью ВЧ-сепаратора (ЖТФ, 39, 1007, 1969) составлял не более 60° , то длина каждого сгустка $l \approx 2$ см. Перестраивая частоту задающего генератора, питающего клистронную систему ускорителя, можно было менять ширину энергетического спектра электронов пучка в пределах от 8% до 50%. Величина углового разброса электронов пучка на выходе ускорителя могла регулироваться системами фокусировки и коррекции пучка и была в пределах $\Delta\theta \approx 2 \cdot 10^{-2} + 10^{-3}$ рад. Плотность электронного пучка на выходе ускорителя $n\tau \approx 5 \cdot 10^8$ см $^{-3}$.

Источником протонного пучка служил резонансный линейный ускоритель с ВЧ фокусировкой "Урал-5", разработка и создание которого в ХФТИ АН УССР осуществлялась под руководством А.М. Егорова. Энергия получаемых на таком ускорителе протонов $W = 5$ МэВ, ток в импульсе $I\tau \approx 30$ мА, длительность импульса $\tau = 20$ мкс, ширина энергетического спектра протонов $\Delta W/W = 5\%$, их угловой разброс $\Delta\theta = 10^{-3}$ рад. Каждый импульс тока представлял собой $3 \cdot 10^3$ протонных сгустков длиной $l = 20$ см с частотой следования (модуляции) $\omega_M \approx 9 \cdot 10^8$ 1/с. Плотность протонов на оси пучка составляла $n\tau \approx 10^7$ см $^{-3}$, диаметр пучка $d = 1$ см.

В разделах 2.2 и 2.3 описаны источники плазмы, используемые в экспериментах по взаимодействию РЭП с плазмой, а также диагностические методы исследования характеристик получаемой плазмы.

В качестве источника плазмы использовалась коаксиальная плазменная пушка. Для получения плазмы плотностью $n_p \approx 10^{10} + 10^{13} \text{ см}^{-3}$ использовалась пушка подобная описанной в работах /3-5/, но с полым внутренним электродом, через который электронный пучок проходил в камеру взаимодействия. Соответственно, напуск газа в межэлектродное пространство источника плазмы производился через внешний электрод. Проведенные исследования показали, что режим работы пушки в этом случае практически не отличается от режима работы с напуском газа через внутренний электрод.

Используемый плазменный ускоритель имел следующие параметры: длина электродов - 40 см, диаметр внешнего электрода - 70 мм, внутреннего - 30 мм, диаметр отверстия во внутреннем электроде - 20 мм, расстояние от места напуска газа до выходного торца источника - 20 см. Напряжение на электроды пушки подавалось от батареи конденсаторов емкостью 40 мкф, заряжаемой до напряжения 20 кВ, через вакуумный импульсный разрядник. Напуск газа в межэлектродное пространство осуществлялся с помощью быстродействующего импульсного электродинамического вакуумного клапана /6/.

Создаваемая пушкой плазма заполняла камеру взаимодействия плазмой плотностью до $n_p \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Эксперименты проводились на распадающейся плазме, плотность которой менялась во времени в пределах от 10^{13} см^{-3} до 10^{10} см^{-3} . Плотность плазмы во времени и пространстве, а также продольный градиент плотности плазмы измерялись двойным двухканальным интерферометром /7/.

Плотная плазма, наблюдаемая для исследований пучково-плазменного взаимодействия, должна удовлетворять следующим требованиям:

а) плазма с высокой степенью ионизации и малым количеством примесей должна иметь время существования сравнимое или больше длительности пучка заряженных частиц;

б) на всем пути пролета частиц пучка и в области взаимодействия должны отсутствовать рассеивающие механические препятствия и электромагнитные поля;

в) плотность и градиент плотности плазмы должны быть контролируемы.

Перечисленным требованиям достаточно полно отвечает плазма, получаемая с помощью коаксиального плазменного источника, работающего в режиме плазменного фокуса /8,9/. Параметры образованной таким источником плазмы определялись с помощью лазерного интерферометра на CO_2 с длиной волны $10,6 \text{ мкм}$ /10/, а также по уширению и относительной интенсивности линий водорода $H\beta$ и $H\gamma$, обусловленных эффектом Штарка. Измерения показали, что плазма в диапазоне плотностей $n_p = 10^{15} \pm 10^{17} \text{ см}^{-3}$ может существовать в течение времени $10 \pm 15 \text{ мкс}$ при температуре электронов $T_e \approx 3 \pm 4 \text{ эВ}$. Диаметр плазмы $1-5 \text{ см}$, а длина $10 \pm 20 \text{ см}$ в зависимости от плотности. Плотность, температура и наличие примесей в такой плазме зависят от времени задержки между моментом напуска газа в межэлектродный промежуток и подачей напряжения на электроды пушки.

В разделе 2.4 описаны диагностические методы исследования взаимодействия электронных и ионных пучков с плазмой различной плотности с использованием как стандартной аппаратуры, так и разработанной в процессе экспериментов. К ним относятся измерения тока с помощью цилиндров Фарадея различного типа, поясов Роговского и коллекторов, измерения энергетических спектров электронов и протонов с помощью магнитных анализаторов /11/, измерения СВЧ и рентгеновского излучения из плазмы в процессе взаимодействия. Кроме того, в качестве диагностической аппаратуры использовались диамагнитные зонды, калориметр для измерения полной энергии плазмы, лазерный интерферометр для измерения плотности плазмы и др.

В главе 3 приведены результаты экспериментальных исследований коллективного взаимодействия модулированного релятивистского электронного пучка (энергия $W = 2 \text{ МэВ}$) с заранее приготовленной плазмой ($n_p \approx 10^{10} \pm 10^{12} \text{ см}^{-3}$). В разделах 3.1 и 3.2 приводятся характеристики экспериментальной установки и представлены результаты экспериментальных исследований.

Установка "Алмаз-П", на которой проводились эксперименты, состояла из трех основных частей: линейного ускорителя электронов, коаксиальной плазменной пушки и камеры взаимодействия. Последняя представляла собой стеклянную трубу диаметром 10 см

и длиной 2 м, помещенную в постоянное однородное продольное магнитное поле напряженностью до $2 \cdot 10^3$ гс с пробками на концах. Пробочное соотношение - 1,2 /1,12-14/.

Для определения величины потерь энергии пучка при взаимодействии измерялись энергетические спектры электронов пучка на входе и выходе камеры взаимодействия. Было обнаружено, что эти потери резонансным образом зависят от плотности плазмы. Максимум потерь наблюдался при плотности $n_p \approx 10^{11}$ см⁻³, когда совпадали частота модуляции пучка и плазменная частота ($\omega_m \sim \omega_p$). При этом смещение максимума энергетического спектра электронного пучка в результате взаимодействия достигало 150-250 кэВ (точность измерения энергии электронов с помощью магнитных анализаторов - 2+3 %), что составляет около 10 % от начальной энергии пучка. Заметная часть электронов пучка (≈ 15 %) ускорялась примерно на 100 кэВ. При плотностях плазмы больших и меньших оптимального значения потери энергии пучком существенно уменьшаются, а при $n_p \approx 5 \cdot 10^{12}$ см⁻³ и $n_p \approx 10^{10}$ см⁻³ практически отсутствуют. Также существенно уменьшаются потери энергии при уменьшении величины тока пучка и при увеличении ширины функции распределения электронов пучка по энергиям до величины $\Delta W/W \approx 50$ %.

Для случая максимального взаимодействия ($n_p \approx 10^{11}$ см⁻³) с помощью "мгновенных" спектров (со временем разрешения = 0,15 мкс, малым по сравнению с длительностью импульса пучка $t = 2$ мкс) была построена зависимость максимума спектра энергий электронов пучка на выходе из плазмы от времени. Было показано, что на начальной стадии взаимодействия потери энергии пучком в плазме растут со временем по закону, близком к линейному, и достигают максимума за время $t \approx 0,5$ мкс. За это время через плазму проходит около 1500 ступков. В последующие моменты времени потери уменьшаются, а к концу импульса ($t \approx 1,3+1,5$ мкс) появляются ускоренные электроны, энергия которых превышает начальную энергию электронов пучка.

Измеренный частотный спектр возбуждаемых в плазме колебаний соответствует рабочей частоте ускорителя, то есть частоте модуляции пучка, а полуширина спектра при наличии плазмы

($\Delta f_0 \approx 10-12$ МГц) не более чем в полтора раза превышает полуширину спектра без плазмы ($\Delta f = 8$ МГц). Максимум амплитуды возбуждаемого поля соответствовал плотности плазмы $n_p \approx 10^{11}$ см⁻³, при которой наблюдалось наиболее эффективное взаимодействие пучка с плазмой. Измерения показали, что снаружи камеры взаимодействия амплитуда поля примерно в 10 раз меньше, чем внутри плазменного резонатора. Показано также, что при наличии плазмы амплитуда поля линейно нарастает со временем в течение $t \approx 1,2-1,4$ нс, более чем на два порядка превосходящего время пролета частиц пучка через область взаимодействия ($t \approx 6,5 \cdot 10^{-9}$ с). После достижения максимума амплитуда поля быстро спадает, причем именно в этот момент в спектре энергий электронов пучка на выходе из плазмы появляются ускоренные частицы.

Измерения показали, что фазовая скорость возбуждаемой при таком взаимодействии волны совпадает со скоростью пучка с точностью ошибки измерений (10-15 %).

При увеличении ширины функции распределения электронов пучка по энергиям от 8 % до 50 % практически отсутствуют как потери энергии пучком, так и ускоренные частицы.

Одним из признаков пучково-плазменной неустойчивости является увеличение полного тока ($I_n = I_b + I_p$, где I_b - ток пучка, I_p - плазменный ток), наблюдаемого при распространении РЭП через плазму. Результаты экспериментального исследования этого явления представлены в разделе 3.3. При возникновении пучково-плазменной неустойчивости энергия, теряемая пучком на возбуждение колебаний $\Delta W = mc^2 \eta \frac{1,5 S}{(1+1,5 S)^{1/2}}$, где $S = \beta^2 \eta (n/n_p)^{1/2}$, $\beta = v/c$, может передаваться плазменным электронам, что приводит к росту тока в направлении движения пучка. Было обнаружено, что в нашем случае максимальное увеличение полного тока (с коэффициентом усиления $I_p/I_b \sim 5$) наблюдается при плотности плазмы $n_p \approx 5 \cdot 10^{11}$ см⁻³, то есть в условиях максимального взаимодействия модулированного РЭП с плазмой.

В разделе 3.4 проведено сравнение экспериментальных и теоретических результатов исследования взаимодействия модулированных РЭП с плазмой. Из этого сравнения следует, что в да-

АНБ им. В. Стефановича
АН УРСР

ных экспериментах наблюдалось коллективное черенковское взаимодействие РЭП с плазмой. Совпадение фазовой скорости возбуждаемой волны со скоростью пучка свидетельствует о том, что взаимодействие обусловлено элементарным эффектом Вавилова-Черенкова. Относительно большая величина измеренных потерь энергии пучка подтверждает коллективный характер этого взаимодействия. Благодаря эффектам когерентности как для электронов отдельного сгустка, так и между сгустками, максимальное взаимодействие наблюдалось при плотности плазмы $n_p \approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$, когда $\omega_n \sim \omega_p$. Наличие когерентности подтверждается фактами линейного роста со временем амплитуды электрического поля и потерь энергии пучка. Из совпадений момента начала появления ускоренных частиц и уменьшения амплитуды возбуждаемого поля следует, что в результате нарушения синхронизма между частицами пучка и возбуждаемой волной, электроны проходят через плазму в ускоряющей фазе и поглощают при этом энергию, накопленную в плазме за счет когерентных черенковских потерь предыдущих сгустков.

О коллективном характере такого взаимодействия свидетельствуют зависимости эффективности взаимодействия от величины тока пучка, ширины функции распределения электронов пучка по энергиям, а также наличия плазменного тока, возникающего при прохождении пучка через плазму. Исследованию эффективности взаимодействия моноэнергетических РЭП в диапазоне энергий $= 2+20 \text{ МэВ}$ с плотной плазмой ($n_p \approx 10^{15} + 10^{17} \text{ см}^{-3}$) посвящена четвертая глава /15-25/.

Экспериментальная установка отличалась от ранее описанной тем, что плазменная пушка работала в режиме холодного плотного плазменного фокуса и эксперименты проводились без продольного магнитного поля, так как $\omega_p \gg \omega_n$. При плотности плазмы $n_p > 10^{15} \text{ см}^{-3}$ $\omega_p \gg \omega_n$.

В разделах 4.2-4.5 приведены результаты измерений параметров пучка и плазмы, а также физические процессы, возникающие при таком взаимодействии. Обнаружено, что ток пучка, измеряемый на оси системы, уменьшается как по амплитуде, так и по длительности импульса, причем это уменьшение зависит от плотности плазмы, через которую он проходил. В то же время

наблюдалась регистрация тока электронов кольцевым коллектором, одетым на камеры взаимодействия, причем возникновение этого тока во времени совпадало с потерями тока, регистрируемого цилиндром Фарадея. Так как угловой разброс электронов пучка (14 МэВ) на такой плазме не превышает величины $\Delta\theta \approx 0,2^\circ$, а наблюдаемый нами разброс достигал значения $\Delta\theta \approx 6^\circ \pm 10^\circ$, то можно предположить, что наблюдаемый разброс обусловлен ВЧ-полями, возбуждаемыми в результате взаимодействия РЭП с плазмой. Энергия отклоненных электронов измерялась и не превышала значения 6–8 МэВ.

О больших потерях энергии пучком свидетельствуют измеренные энергетические спектры пучков после прохождения через плотную плазму. Измерения проводились при использовании пучков, энергия которых была 2,14 и 20 МэВ. Потери энергии пучком составляли от 10–15 % при плотности плазмы $n_p \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ до 65 % при плотности плазмы $n_p \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Во всех экспериментах наблюдались электроны с энергией большей, чем первоначальная. Это увеличение составляло $\Delta W = 200\text{--}300 \text{ кэВ}$ при энергии пучка $W = 2 \text{ МэВ}$ ($\tau = 2 \text{ мкс}$) и $\Delta W \sim 4 \text{ МэВ}$ при энергии пучка $W = 20 \text{ МэВ}$ ($\tau = 10 \text{ мкс}$). Наличие ускоренных частиц свидетельствует о возбуждении в плазме интенсивных СВЧ-полей в результате коллективного взаимодействия РЭП с плазмой. Действительно, во всех экспериментах из области взаимодействия наблюдалось относительно мягкое рентгеновское излучение и СВЧ-излучение. В миллиметровом диапазоне длин волн, причем длина волны излучения уменьшалась при увеличении плотности плазмы [23]. Если принять во внимание величину энергии, приобретаемой частью электронов пучка при прохождении через область взаимодействия, то напряженность этих полей может составлять величину 50 кВ/см при энергии пучка $W = 2 \text{ МэВ}$ и 300–400 кВ/см при энергии пучка 20 МэВ.

Наличие интенсивных СВЧ-полей в плазме должно привести к уменьшению плотности плазмы в зоне взаимодействия, вытесняемой такими полями (Захаров В.Е., ЖТФ, 62, 1745, 1972). Такое уменьшение плотности плазмы в момент прохождения пучка было обнаружено с помощью лазерного интерферометра [10]. Момент понижения плотности соответствовал моменту возникновения СВЧ и рентгеновского излучения.

Кроме мягкого рентгеновского излучения из области взаимодействия, энергия которого лежала в пределах от одного до десяти кэВ в зависимости от мощности используемого пучка, наблюдалась и вторая зона рентгеновского излучения, расположенная на расстоянии 25–40 см от начала камеры взаимодействия. Энергия этого излучения менялась от 100 кэВ до нескольких МэВ в зависимости от мощности пучка и расстояния от начала камеры взаимодействия. Это дает основание предполагать, что это излучение обязано своим происхождением электронам пучка, потерявшим свою энергию при коллективном взаимодействии с плотной плазмой и в результате рассеивания попадающих на стенки камеры взаимодействия.

Эксперименты по исследованию нагрева плазмы проводились с использованием пучка, энергия которого была 10 МэВ. Измерения с помощью диамагнитных зондов и калиброванного калориметра показали, что на нагрев плазмы расходовалось около 65 % энергии пучка при плотности плазмы $n_p \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и 35–40 % при плотности $n_p \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Некоторое уменьшение эффективности взаимодействия при росте плотности плазмы связано с тем, что, с одной стороны, диаметр плазмы при такой плотности становится сравнимым с диаметром пучка, и, с другой стороны, при такой плотности плазмы нарушается условие моноэнергетичности, исходя из параметров углового разброса и ширины энергетического спектра электронов используемого пучка.

Обсуждение полученных результатов проводится в разделе 4.6. Результаты описанных выше экспериментов показывают, что эффективность коллективных взаимодействий моноэнергетических РЭП с малой угловой расходимостью не только не уменьшаются, но и увеличиваются при возрастании плотности плазмы. О коллективном характере такого взаимодействия свидетельствуют большие потери энергии релятивистскими пучками, наличие локализованных в области взаимодействия СВЧ и рентгеновского излучения, а также зависимость этих эффектов от величины тока пучка, ширины функции распределения электронов пучка по энергиям и углового разброса.

В плотной плазме, используемой в экспериментах, в начале процесса взаимодействия частота столкновений велика ($n_p \approx$

$\approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $T_e \approx 4 \text{ эВ}$, $\nu \approx 1,4 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$. Поэтому в началь-
 ный момент может развиваться пучково-диссипативная неустойчи-
 вость. Условие ее развития $\frac{\Delta v/v_0}{\omega_p} \leq \delta/\omega_p \sim (\pi n/n_p)^{1/2} 1/\beta$ и для на-
 ших условий ($\pi n = 5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ и $\beta = 5$) $\frac{\Delta v/v_0}{\omega_p} \leq 10^{-3}$, а из
 соотношения (1) $\frac{\Delta v/v_0}{\omega_p} \approx 3 \cdot 10^{-3}$, откуда следует, что в наших
 условиях возможно развитие диссипативной неустойчивости. Со
 временем T_e плазмы будет увеличиваться, что приведет к
 уменьшению частоты столкновений ($\nu_{ei} \sim 1/T_e^{3/2}$). При этом
 возможно развитие бесстолкновительной пучково-плазменной не-
 устойчивости. Например, уже при $T_e \approx 15 \text{ эВ}$ имеем $\nu_{ei} \sim \beta^2 \approx 10^3 \text{ с}^{-1}$
 и пространственный инкремент такой неустойчивости
 $\chi_s = (\pi n/n_p \cdot v_0/v_g)^{1/2} \omega_p/v_g \beta \sim 5 \cdot 10^{-1} \text{ см}^{-1}$ возрастает с увеличени-
 ем плотности плазмы как $n_p^{1/2}$, а длина релаксации пучка в
 этом случае порядка нескольких сантиметров.

При энергии электронного пучка $W = 20 \text{ МэВ}$ ($\beta \approx 40$) ано-
 мально большие потери энергии пучком, ускорение части электр-
 онов пучка и возбуждение электрических полей в плазме свиде-
 тельствуют о важной роли коллективных эффектов и в этой обла-
 сти энергий релятивистских электронных пучков.

В главе 5 приводятся результаты теоретических и экспери-
 ментальных исследований взаимодействия модулированных РЭП с
 неоднородной столкновительной плазмой, образующейся при про-
 хождении пучка через нейтральные газы различной плотности.
 В разделе 5.1 обсуждаются возможные механизмы образования
 плазмы, такие как пучково-плазменный разряд (Лебедев М.П.,
 Онищенко И.Н., Ткач Л.В., Файнберг Я.Б., Шевченко В.И., Физи-
 ка плазмы, 2, 407, 1976) или механизм пробоя нейтрального га-
 за при бетатронных колебаниях электронов пучка в собственном
 поле тока (Блиох Ю.П., Физика плазмы, 2, 285, 1986). Однако в
 этих исследованиях не анализировалось влияние модуляции пучка
 на развитие пучково-плазменного разряда в плотном нейтральном
 газе. В разделах 5.2 и 5.3 приведены нелинейная теория и резуль-
 таты экспериментальных исследований неустойчивости пучка в
 плазме при наличии следующих факторов: релятивизма пучка, глу-
 бокой модуляции пучка, диссипации возбуждаемой волны и продольной
 неоднородности плотности плазмы. Была рассмотрена пространственная
 задача инжекции в плазменное полупространство

$\beta \neq 0$ /26,27/ РЭП с релятивистским фактором β , плотностью n_0 , представляющему собой последовательность прямоугольных сгустков длительностью τ^* , следующих через период $T = 2\pi/\omega_m$. В нашем случае размер сгустка $a \approx 1,7$ см, длина волны ускорителя $\lambda = 10$ см, то есть пучок полностью промодулирован со скважностью $S = \lambda/a = 6$. Плазма неоднородна по плотности $n_p(x)$, в результате чего при фиксированной частоте $\omega = \omega_p - \omega_m$ волновой вектор $k_2(x)$ изменяется вдоль длины взаимодействия в соответствии с дисперсионным уравнением плазменной волны $\epsilon_p(\omega, k_2) = 0$. Кроме того, плазма предполагалась диссипативной. Взаимодействие модулированного РЭП со столкновительной неоднородной плазмой описывалось системой уравнений в безразмерных переменных, одно из которых представляло возбуждение плазменной волны, а два других являлись самосогласованными уравнениями движения электронов пучка в поле возбуждаемой волны /26/. Эта система уравнений решалась численно на ЭВМ для области параметров, близких к экспериментальным $\beta = 5$, $S = 6$, $x = 0-5$, $\Lambda = 0+0,2$. Здесь $\alpha = \sqrt{2\pi\omega} / 2 \frac{1}{2} \delta k$ - параметр диссипации возбуждаемой волны, а неоднородность плотности плазмы описывалась функцией

$$G(z) = \frac{\kappa}{\kappa_0} = \frac{1}{1 - \Lambda \cdot \delta k / \kappa}, \quad \Lambda = \frac{\kappa - \kappa_0}{\delta k}$$

Результаты моделирования показали слабую зависимость скорости роста амплитуды волны с расстоянием и локализацию максимальной амплитуды от параметра диссипации α для модулированного пучка. Значение максимальной амплитуды уменьшается с ростом α , однако в значительно меньшей степени, чем для немодулированного пучка. Явно выраженная локализация области взаимодействия наблюдается при величинах параметра диссипации $\alpha \sim 1$ и имеет размер $\Delta z \approx (2+4)\alpha^{-1}$. При больших значениях α область релаксации пучка более протяженна и однородна. Энергия, теряемая пучком, при этом растет и при $\alpha \geq 10$ выходит на насыщение ($\eta = \Delta W/W_0 \approx 0,57$).

Результаты численного моделирования показали, что если в бездиссипативном случае ($\alpha = 0$) фазовая скорость волны в среднем остается постоянной, то при $\alpha \neq 0$ по мере взаимодействия уменьшается, причем тем сильнее, чем больше α , а за-

хваченный сгусток систематически отдает энергию волне, через посредство которой энергия пучка расходуется на нагрев плазмы.

Исследования влияния неоднородности плотности плазмы показали, что уже при неоднородности, соответствующей $|\Delta| > 0,2$ для немодулированного пучка неустойчивость практически срывается. Если в этих условиях ($\alpha = 2$, $\Lambda = -0,2$) использовать модулированный пучок, то неустойчивость развивается, не "замечая" неоднородности, т.е. достигает такого же значения максимальной амплитуды, как и в однородном случае.

Экспериментально такие исследования проводились на установке, подобной описанной в главах 3 и 4. Отличие состояло в том, что пучок с энергией 2 МэВ выводился через титановую фольгу толщиной 30 мкм в камеру взаимодействия, в которую напускался нейтральный газ в широком диапазоне давлений. Показано, что при прохождении такого пучка через нейтральный газ образовывалась плазма, плотность которой на три порядка превышала плотность пучка. На расстоянии 4-15 см от выходной фольги плотность плазмы составляла $n_p \approx 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, а затем ее плотность уменьшалась с расстоянием по закону $n_p \approx 2,8 \cdot 10^{15} j / \beta^2 P$, где j - плотность тока, P - давление нейтрального газа (Киквидзе Р.Р. и др., Физика плазмы, 16, 976, 1984).

Модулированный РЭП эффективно взаимодействовал с этой плазмой. Об этом свидетельствуют измеренные энергетические спектры электронов пучка. Если вблизи выходной фольги ускорителя энергетический спектр близок к энергетическому спектру в вакууме, то после прохождения резонансной области (где $\omega_m \sim \omega_p$) наблюдалось существенное изменение спектра с образованием группы электронов, потерявших около 25 % своей энергии. Кроме того, наблюдалось увеличение углового разброса электронов пучка на $5 \cdot 10^0$ после прохождения этой области. Все эти эффекты наблюдались при давлении газа $P = P_{кр} \approx 6$ торр и выше. Следует отметить, что приведенное значение $P_{кр}$ относится к РЭП с током 1 А ($\Delta W/W = 8 \%$), распространяющемся в воздухе. При других параметрах пучка о наличии других газов значение $P_{кр}$ может изменяться.

Об эффективном взаимодействии свидетельствует также наблюдаемое из области взаимодействия мягкое рентгеновское излуче-

ние, максимум интенсивности которого расположен на расстоянии 5–10 см от выходной фольги, а также СВЧ-излучение с длинами волн 10, 3 и 0,8 см. При увеличении ширины энергетического спектра электронов пучка интенсивность рентгеновского излучения, а также СВЧ-излучений с длинами волн 10 и 3 см существенно уменьшались, а излучение с $\lambda = 8$ мм исчезало совсем /27/. В разделе 5.4 проводится сравнение теоретической модели с экспериментальными данными. Из сравнения следует, что в условиях эксперимента преимущественно возбуждается ленгмюровская волна. Сравнивая значения инкремента ленгмюровской волны, полученные при машинном моделировании, с расстоянием, на котором экспериментально наблюдалась локализация возбуждаемого СВЧ и рентгеновского излучений, а также с их размерами, можно сказать об удовлетворительном согласии экспериментальных результатов с предложенной моделью диссипативного режима взаимодействия модулированного РЭП с ленгмюровской волной столкновительной плазмы. Дополнительным доказательством этого является измеренное экспериментально увлечение электронов плазмы, приводящее к росту полного тока ($I_a = I_b + I_p$), что может иметь место только при наличии СВЧ-полей неустойчивости.

Эксперименты с гидродинамическим пучком и пучком с размытой функцией электронов пучка по энергиям однозначно определяют, что эффективность релаксации пучка существенно зависит от степени моноэнергетичности пучка. Как известно (Абрамович В.Ч., Шевченко В.И., ЖЭТФ, 62, 1386, 1972) пучково-диссипативная неустойчивость имеет место только для пучков, у которых разброс по скоростям не превышает значения, определяемого величиной инкремента $\Delta v_0/v_0 \leq \delta v/k$.

В разделе 5.5 описывается экспериментальное подтверждение возможности использования такого взаимодействия РЭП с относительно небольшими токами для целей неравновесной плазмохимии в условиях больших давлений исходного газообразного вещества /28/.

Глава 6 диссертации посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию взаимодействия модулированного протонного пучка высокой энергии с плазмой, образованной им при

прохождении через нейтральный газ. В разделе 6.1 дано описание экспериментальной установки и диагностической аппаратуры, используемой для измерения различных параметров пучка и образованной им плазмы.

В разделах 6.2 и 6.3 приведены экспериментальные результаты исследования процессов взаимодействия модулированных протонных пучков с плазмой и их сравнение с теоретическими оценками /29-31/. Эксперименты показали, что во всем диапазоне давлений нейтрального газа, при котором проводились исследования ($p = 10^{-5} \pm 10^{-2}$ торр), наблюдалось уменьшение амплитуды и длительности сгустков пучка, регистрируемых ИФ. Максимальное уменьшение наблюдалось при давлении $P \approx 2 \cdot 10^{-3}$ торр. При повышении давления выше критического ($P = P_{кр} = (6 \pm 8) \cdot 10^{-3}$ торр) амплитуда сгустков увеличивалась и изменялась их форма. При этом амплитуда сигнала импульса давления пучка, регистрируемая пьезодатчиком, оставалась постоянной при всех давлениях (точность измерения импульса давления $\pm 10\%$).

Плотность образуемой в нейтральном газе плазмы (в качестве нейтрального газа использовался водород и воздух) при давлениях $P < P_{кр}$ близка к плотности пучка и время установления такой плотности $\tau_{уст} \approx 7 \pm 9$ нс. При давлениях $P > P_{кр}$ плотность плазмы резко возрастает, достигая значения $n_p = (2 \pm 3) \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ и ее ленгмюровская частота близка к частоте следования сгустков ($\omega_p \sim \omega_m$), а время ее установления $\tau_{уст} \leq 1$ нс.

При давлениях ниже критического энергетические спектры протонов пучка на выходе ускорителя и в конце камеры взаимодействия практически совпадали; при давлениях выше критического магнитный анализатор регистрировал расширение энергетического спектра пучка.

Так как импульс пучка сохраняется при любых давлениях нейтрального газа, это дает основание предположить, что в данных экспериментах наблюдалась частичная токовая нейтрализация протонных сгустков плазменными электронами. Однако эта токовая нейтрализация не может быть обусловлена захватом плазменных электронов в потенциальные ямы сгустков пучка (Габович М.Д., Солошенко И.А., Симоненко Л.С., ЖЭТФ, 62, 1369, 1972), так как их напряженность $E_{max} \approx \frac{I l}{4\pi c \beta z_0} = 50 \text{ В/см}$, в то время как для

захвата протонов с энергией $W = 5 \text{ МэВ}$ необходимы поля с напряженностью $E_{\text{захв}} \approx 700 \text{ В/см}$.

Наблюдаемую частичную токовую нейтрализацию протонных сгустков можно объяснить возникновением обратного плазменного тока, индуцируемого фронтами сгустков. Инжекция пучка заряженных частиц, состоящего из отдельных сгустков, в плазму сопровождается изменением азимутального магнитного поля B_θ , приводящего к появлению на фронтах сгустков электрического поля E_z . Это поле вызывает ток, противоположный индуцируемому току. В этом случае полный ток I_{Σ} (ток, измеряемый коллектором) является суммой тока пучка I_b и плазменного тока I_p . Передний фронт протонного сгустка индуцирует плазменный ток, направление которого противоположно инжектируемому току (плазменные электроны двигаются в том же направлении, что и протоны пучка). Следовательно, полный ток будет уменьшаться. Поля, индуцированные задним фронтом сгустка, вызывают плазменный ток в том же направлении, что и ток пучка (протоны пучка и плазменные электроны двигаются в противоположном направлении). Поэтому они регистрируются коллектором не будут.

При давлениях выше критического имеет место пучково-плазменная неустойчивость, подобная неустойчивости на модулированном электрическом пучке. Об этом свидетельствует аномально быстрый рост плотности плазмы и развитие энергетического спектра протонов пучка. Развитие такой неустойчивости вызывает пучково-плазменный разряд (ППР), механизм которого совпадает с описанным ранее (Лебедев П.М. и др., Физика плазмы, 2, 407, 1976).

Действительно, плотность плазмы, создаваемая в результате парных соударений ионов пучка с плазмой и определяемая балансом рождающихся частиц при неупругих столкновениях и убывающих при свободном разлете плазмы, дается следующим выражением:

$$n_p \approx \frac{n_g \cdot N \cdot \sigma \cdot v_g \cdot R}{2 v_{T_i}} \quad (6)$$

где N - плотность нейтрального газа, σ - сечение ионизации, R - радиус пучка, v_{T_i} - тепловая скорость ионов плазмы. Для параметров эксперимента ($n_g \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N \approx 10^{13} + 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $v_g = 3 \cdot 10^9 \text{ см/с}$, $R = 1 \text{ см}$, $v_{T_i} \approx 10^8 \text{ см/с}$)

$n_p \leq n_{pmax} \approx 10^8 \text{ см}^{-3}$, что обеспечивает возможность резонансного возбуждения плазменных колебаний ионным пучком, промодулированным на частоте $\omega_M: \omega_p \sim \omega_M \approx 2\pi f \approx 1,5 \cdot 10^8 \text{ 1/с}$. Учитывая, что время образования такой плазмы $\tau \approx \frac{n_p}{n_0 \sigma v_0 N} \sim 10^{-6} - 10^{-7} \text{ с}$, а длительность импульса тока протонного пучка $T = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, т.е. $T \gg \tau$, можно рассматривать движение основной части пучка в плазме с $n_p \sim n_{pmax}$, когда возможно развитие пучково-плазменной неустойчивости с пространственным инкрементом

$$\alpha_1 = \frac{\sqrt{3}}{2^{1/2}} \left(\frac{\pi e}{n_p} \cdot \frac{\pi}{M} \cdot \frac{v_0^2}{v_{Te}^2} \right)^{1/2} \frac{\omega_p}{v_0 \gamma} \quad (7)$$

Для рассматриваемых нами параметров $\alpha_1 \approx 0,05 \text{ см}^{-1}$, то есть усиление при пролете ионным пучком системы $L = 2 \cdot 10^2 \text{ см}$ оказывается значительным.

Развитие пучково-плазменного разряда при $P > P_{кр}$ и аномальный рост плотности плазмы приводит к увеличению частоты столкновений, что вызывает уменьшение обратного тока, времени его существования и, в конечном итоге, уменьшение степени нейтрализации тока протонного пучка.

В Заключении приведены основные результаты экспериментальных исследований взаимодействия модулированных моноэнергетических с малой угловой расходимостью электронных и ионных пучков большой энергии с плазмой и нейтральным газом, а также указаны области использования полученных в диссертации результатов.

1. Березин А.К., Файнберг Я.Б., Егоров А.М., Киселев В.А., Курилко В.И., Буц В.А., Толстолужский А.П. Взаимодействие модулированного релятивистского пучка с плазмой // ЖЭТФ. - 1972. - Т. 63, вып. 3(9). - С. 861-873.

2. Березин А.К., Киселев В.А., Онищенко И.Н., Файнберг Я.Б. Коллективное взаимодействие моноэнергетических РЭП большой энергии с плазмой // Харьков, 1989. - 16 с (Препринт / АН УССР, ХЭТИ, 89-3).

3. Золототрубов И.М., Киселев В.А., Новиков Л.М. Исследование процессов в коаксиальном плазменном источнике // ЖТФ. - 1964. - Т. 34, вып. 6. - С. 998-1006.

4. Золототрубов И.М., Киселев В.А., Новиков Л.М. Распределение тока в коаксиальной плазменной пушке // ЖТФ. - 1965. - Т. 35, вып. 2. - С. 253-261.

5. Золототрубов И.М., Киселев В.А., Новиков Л.М., Рыков Н.М., Толоч В.Т. Коаксиальная плазменная пушка в продольном магнитном поле // ЖТФ. - 1966. - Т. 36, вып. 6. - С. 1040-1045.

6. Киселев В.А., Линник А.Ф., Новиков Л.М. Электродинамический клапан для импульсного напуска газа // ПТЭ. - 1986. - № 4. - С. 178-179.

7. Киселев В.А., Березин А.К., Беличенко Е.И. Измерение продольного градиента плотности плазмы // ПТЭ. - 1974. - № 3. - С. 153-155.

8. Киселев В.А., Новиков Л.М., Скоблик И.П., Толстолужский А.Г., Золототрубов И.М. Источник плотной плазмы для экспериментов по пучково-плазменному взаимодействию // В кн.: "Источники и ускорители плазмы", Сборник статей, вып. 3, Харьков, ХАИ, 1978, с. 39-45.

9. Киселев В.А., Линник А.Ф., Усков В.В., Скоблик И.П. Особенности формирования плазменного фокуса коаксиального ускорителя // ВИНИТИ, № 5002-В 88, 1988 г.

10. Киселев В.А., Березин А.К., Файнберг Я.Б., Никольский И.К. Взаимодействие релятивистского электронного пучка с плотной плазмой // Письма в ЖТФ. - 1976. - Т. 2, вып. 2. - С. 53-57.

11. Белан В.Н., Волотин Л.И., Киселев В.А., Линник А.Ф., Усков В.В. Анализатор энергии протонного пучка // ПТЭ. - 1988. - № 6. - С. 31-32.

12. Березин А.К., Файнберг Я.Б., Волотин Л.И., Егоров А.М., Киселев В.А., Курилко В.И., Толстолужский А.П. Исследование взаимодействия модулированных РЭП с плазмой. - Харьков, 1971. - 10 с (Препринт / АН УССР, ХЭТИ; 71-12).

13. Березин А.К., Волотин Л.И., Егоров А.М., Киселев В.А., Файнберг Я.Б. Экспериментальное исследование взаимодействия модулированных релятивистских пучков с плазмой // Письма в ЖЭТФ. - 1971. - Т. 13, вып. 3 - С. 496-503.

14. Березин А.К., Березина Г.П., Файнберг Я.Б., Киселев В.А. и др. Теоретические и экспериментальные исследования плазменных методов ускорения. - Харьков, 1972. - 32 с (Препринт / АН УССР. ХЭТИ: ХЭТИ 72-7).

15. Киселев В.А., Березин А.К., Файнберг Я.Б. О коллективном взаимодействии релятивистского электронного пучка с плотной плазмой // Письма в ЖЭТФ. - 1974. - Т. 20, вып. 9. - С. 603-606.

16. Киселев В.А., Березин А.К., Файнберг Я.Б. Локализация рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии релятивистского пучка с плотной плазмой // Письма в ЖЭТФ. - 1975. - Т. 22, вып. 8. - С. 405-408.

17. Киселев В.А., Березин А.К., Файнберг Я.Б. Взаимодействие релятивистского электронного пучка с плотной плазмой // ЖЭТФ. - 1976. - Т. 71, вып. 1(7). - С. 193-201.

18. Киселев В.А., Березин А.К., Файнберг Я.Б. Взаимодействие моноэнергетического РЭП с плотной плазмой // Тр. 2-го симпоз. по коллективным методам ускорения. Дубна, 29-ое сент. - 2-ое окт., 1976. - Дубна. ОИЯИ, 1977. - С. 121-123.

19. Киселев В.А., Березин А.К., Гришаев И.А., Зейдлиц В.П., Сафронов Б.Г., Файнберг Я.Б., Фурсов Г.Я. Взаимодействие моноэнергетического РЭП с большим γ с плотной плазмой // Письма в ЖЭТФ. - 1978. - Т. 4, вып. 12. - С. 732-736.

20. Киселев В.А., Березин А.К., Гришаев И.А., Зейдлиц В.П., Сафронов Б.Г., Файнберг Я.Б., Фурсов Г.П. Взаимодействие моноэнергетического РЭП с большим γ с плотной плазмой. - Тр. шестого Всесоюзного совещания по ускорите-

лям заряженных частиц. Дубна, II-13 окт. 1978. - Дубна: ОИЯИ, 1979. - Т. 2. - С. 39-42.

21. Beresin A.K., Kiselev V.A., Painberg Ya.B. Collective interactions of monoenergetic high energy relativistic electron beam with a dense plasma // Ibid. - Vol. 1. - P. 113-122. - Ref: 7. (1979).

22. Киселев В.А., Березин А.К., Файнберг Я.Б. Взаимодействие моноэнергетического РЭП с плотной плазмой // УФЖ. - 1979. - Т. 24, вып. I. - С. 94-101.

23. Киселев В.А., Березин А.К., Файнберг Я.Б. Возбуждение СВЧ-излучения миллиметрового диапазона при взаимодействии моноэнергетического РЭП с плотной плазмой // Радиотехника и электроника. - 1980. - Т. 25, № 10. - С. 2258-2260.

24. Киселев В.А., Березин А.К., Файнберг Я.Б., Линник А.Ф., Усков В.В., Курилко В.И., Зыков А.И., Фурсов Г.Л. О нагреве плотной плазмы моноэнергетическим РЭП большой энергии // Физика плазмы. - 1987. - Т. 13, вып. II. - С. 1394-1398.

25. Березин А.К., Киселев В.А., Файнберг Я.Б., Линник А.Ф., Усков В.В., Курилко В.И., Зыков А.И., Фурсов Г.Л. О коллективном взаимодействии моноэнергетического РЭП ($\tau = 30$) с плотной плазмой // УФЖ. - 1989. - Т. 34. - № 6. - С. 881-885.

26. Березин А.К., Киселев В.А., Линник А.Ф., Онищенко И.Н., Сотников Г.В., Усков В.В. Взаимодействие модулированного РЭП с плазмой, образуемой при его прохождении через нейтральный газ. - Харьков, 1990. - 17 с. (Препринт / АН УССР, ХФТИ; ХФТИ 90-40).

27. Киселев В.А., Березин А.К., Файнберг Я.Б., Зейдлиц В.П., Усков В.В. Взаимодействие релятивистского моноэнергетического электронного пучка с плазмой, образованной в атмосфере // Письма в ЖЭТФ. - 1979. - Т. 29, вып. 12. - С. 762-766.

28. Киселев В.А., Березин А.К., Зейдлиц В.П., Усков В.В. Об использовании релятивистского электронного пучка в плазмохимии // УФЖ. - 1984. - Т. 29. - № 3. - С. 383-386.

29. Киселев В.А., Линник А.Ф., Березин А.К., Онищенко И.Н., Усков В.В. Нейтрализация тока высокоэнергетических протонных сгустков при прохождении через газ. - Харьков, 1989. - 6 с (Препринт / АН УССР, ХФТИ; ХФТИ 89-21).

30. Киселев В.А., Линник А.Ф., Белан В.Н., Березин А.К., Иванов Б.И., Онищенко И.Н., Егоров А.М., Усков В.В. Развитие ППР при прохождении высокоэнергетичного модулированного протонного пучка через нейтральный газ // Письма в ЖТФ. - 1989. - Т. 15, вып. 8. - С. 23-26.

31. Березин А.К., Киселев В.А., Линник А.Ф., Онищенко И.Н., Усков В.В. Токовая нейтрализация высокоэнергетичных протонных сгустков при их прохождении через газы при различных давлениях // ЖТФ. - 1994. - Т. 61, вып. 2. - С.131-135.

Подписано в печать 11.11.92. Формат 60x84/16. Офсетн.печать.
Усл.п.л. 2,1. Уч.-изд.л. 1,7. Тираж 100. Заказ № 713.

Харьков-108, ротاپринт ХФТИ.

469443

AB 26.444

AB 26.444