

На правах рукописи

**АНДЕРСОН Майкл Гордон**

**ФОРМИРОВАНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВКА СИЛЬНОТОЧНЫХ  
ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ И ИОННЫХ ПУЧКОВ В  
ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ И ЗАМАГНИЧЕННОЙ  
ПЛАЗМЕ**

**01.04.20 - Физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук**

**Томск - 2006 г.**

**Работа выполнена в Калифорнийском университете, г. Ирвайн, Калифорния, США.**

**Научный руководитель:** Доктор физико-математических наук,  
профессор Быстрицкий Виталий Михайлович  
Калифорнийский Университет, г. Ирвайн, США

**Официальные оппоненты:** Доктор технических наук,  
профессор Усов Юрий Петрович

Доктор технических наук,  
профессор Окс Ефим Михайлович

**Ведущая организация:**  
Институт Сильноточной Электроники СО РАН, Томск

**Защита состоится « 19 » февраля 2007 г., в « 15 » часов  
на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 Томского  
политехнического университета.  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 2а, "НИИ ЯФ – Научно-Исследовательский  
Институт Ядерной Физики"**

**С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке  
Томского политехнического университета.**

**Автореферат разослан «27» декабря 2006 г.**

**Учёный секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук**

**Кожевников А.В.**

# **Общая характеристика работы**

## **Актуальность исследования**

Низкоэнергетические ( $\sim 10^5$  эВ), сильноточные, с микросекундной длительностью, нейтрализованные ионные пучки (ИП), и плазменные пучки (ПП) с энергией ( $\sim 10^{1-2}$  эВ) считаются многообещающими кандидатами для различных приложений, где требуется распространение поперек магнитного поля (МП) на удаленные мишени, и/или захват в замагниченных плазмах, а именно: конфигурация с реверсом поля (КРП), токамак, магнитные зеркала и т.д. [1]. Наиболее близко из этих систем удержания плазмы к данной диссертации относится КРП, которая в последнее десятилетие стала предметом широких исследований благодаря ее потенциалу, в качестве альтернативного подхода к магнитному термоядерному синтезу [2]. Тем не менее, формирование и транспортировка сильноточных, низкоэнергетических пучков до сих пор представляет нетривиальные проблемы. Некоторые из них: расходимость пучка вследствие неполной нейтрализации пространственного заряда и неоднородности, различные неустойчивости пучка при транспортировке, ограничение длительности импульса пучка шунтированием плазмой ускоряющего анод-катодного (АК) зазора, либо в связи с Холл-эффектом в случае ИП и ПП, соответственно [3,4]. В то же время, существующие экспериментальные данные по транспортировке ПП/ИП в поперечных МП ограничены, а данные по инъекции ИП/ПП поперёк МП в стационарную плазменную конфигурацию отсутствуют, что впоследствии и стимулировало выполнение данной работы [5].

## **Цель исследования**

Исследование формирования и транспортировки сильноточных ПП и ИП в вакууме и замагниченной плазме поперек МП в плане их будущего применения для нагрева и удержания стационарных плазменных конфигураций. Проведение экспериментов с использованием инъекции

ПП/ИП для увеличения времени жизни КРП и МП.

## **Научная новизна результатов**

Получены новые экспериментальные данные в более широком диапазоне параметров ( $E \sim 100$  эВ,  $J \sim 10$  до  $100$  А/см<sup>2</sup>) по транспортировке ПП поперёк МП (0.1 - 1.5 кГц) по сравнению с предыдущими экспериментами в вакууме и замагниченной плазме. Обнаружено уменьшение плотности периферийных слоев ПП, сильное торможение ПП с ярко выраженным банчированием его сердцевины с увеличением ее плотности более, чем на порядок величины ( $> 200$  А/см<sup>2</sup>). Продемонстрированы диамагнитный и коллективный режимы транспортировки ПП в вакууме с МП и замагниченной плазме.

Получены новые экспериментальные данные по повышению эффективности транспортировки ИП вдоль нового ведущего канала, и по транспортировке пучка поперек МП (0.1 - 1.5 кГц) в вакууме и замагниченной плазме в более широком диапазоне параметров ( $E \sim 60$  до  $120$  кэВ,  $J \sim 1$  до  $25$  А/см<sup>2</sup>) по сравнению с предыдущими экспериментами. Продемонстрированы коллективный и одночастичный режимы транспортировки ИП в вакуумном МП и замагниченной плазме соответственно.

Проведены систематические эксперименты по формированию КРП с аксиальной инжекцией кольцевых плазменных потоков в коаксиальном соленоидальном реакторе.

Разработаны, выполнены и проанализированы первые эксперименты по тангенциальной инжекции ПП и ИП в КРП.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Показано для широкого диапазона параметров пучков, по сравнению с предыдущими экспериментами, что транспортировка импульсных сильнотоочных плазменных пучков (ПП) ( $E \sim 100$  эВ,  $J \sim 10$  до  $100$  А/см<sup>2</sup>) и ионных пучков (ИП) ( $E \sim 60 - 120$  кэВ,  $J \sim 1 - 25$  А/см<sup>2</sup>) поперек МП (0.1-1.5 кГц) в вакууме контролируется коллективным механизмом  $E \times B$  дрейфа, сопровождаемым уменьшением плотности периферийных слоев

пучка вдоль линий МП, а в случае транспортировки ПП, ярко выраженным банчированием сердцевины пучка ( $> 200 \text{ A/cm}^2$ ).

2. Предложено и доказано, что для нового метода формирования долгоживущей конфигурации с реверсом поля (КРП) посредством аксиальной инжекции кольцевых плазменных потоков большую роль играет величина остаточного МП ( $< 10 \text{ Гс}$ ) в коаксиальной области во время запуска КРП, что определяет баланс давления на конфигурацию плазмы.
3. Продемонстрировано, что тангенциальная инжекция импульсного сильноточного ПП в предварительно сформированную КРП приводит к захвату пучка в конфигурации и соответственному увеличению времени жизни КРП (10%) и амплитуды МП (50%).
4. Показана возможность захвата импульсного сильноточного ИП, инжектированного поперек МП в предварительно сформированную КРП.

### **Научная и практическая значимость работы**

Разработана и протестирована новая схема формирования и транспортировки ИП, которая представляет ценность для множества прикладных и фундаментальных исследований, связанных с использованием пучков частиц для термоядерного синтеза с магнитным удержанием, плазменной накачки лазеров, транспортировки ИП к удаленным мишеням.

Подтверждены имеющиеся данные по транспортировке ПП и ИП поперёк МП в вакууме и замагниченной плазме и добавлены новые данные для более широкого диапазона экспериментальных условий.

Результаты первых экспериментов по инжекции ПП/ИП поперёк МП в КРП значимы для различных исследований, связанных с нагревом и удержанием магнитно-замкнутых плазменных систем, в которых используются пучки частиц.

В настоящее время данные результаты используются совместными усилиями Калифорнийского Университета г. Ирвайн и компании Три-Альфа Энерджи, для определения оптимальных параметров пучка, для

эффективного нагрева и удержания КРП большого диаметра.

## **Публикации результатов**

Опубликовано 13 работ по теме данной диссертации в научных журналах и трудах конференций (см. список публикаций, [P1-P13], в конце автореферата), в том числе 6 работ в реферируемых научных изданиях. Результаты данной диссертационной работы докладывались на: the 14<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference, (Пискатауай, Нью-Джерси, США, 2003); the 31<sup>st</sup> IEEE International Conference on Plasma Science, (Пискатауай, Нью-Джерси, США, 2004); the 13<sup>th</sup> International Symposium on High Current Electronics, (Томск, Россия, 2004); the 15<sup>th</sup> International Conference on High Power Particle Beams, (Санкт-Петербург, Россия, 2004); the 6<sup>th</sup> Symposium on Current Trends in International Fusion Research, (Вашингтон, округ Колумбия, США, 2005); the 32<sup>nd</sup> IEEE International Conference on Plasma Science, (Monterey, California, USA, 2005) и the 14<sup>th</sup> International Symposium on High Current Electronics, (Томск, Россия, 2006).

## **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 137 страниц, 47 рисунков и 5 таблиц. Список цитируемой литературы включает 116 источников.

## **Содержание диссертации**

**Во введении** представлены актуальность исследования, цели работы и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** дан краткий обзор важных, существующих экспериментальных и теоретических данных по формированию и транспортировке импульсных сильноточных ПП/ИП поперек магнитного поля в вакууме и плазме. Дано обоснование выбора магнитно-изолированного диода (МИД) в качестве источника ИП и коаксиальной плазменной пушки в качестве источника ПП, использовавшихся для выполнения исследования. Основываясь на обзоре и анализе существующих

релевантных данных, в рамках программы общих исследований лаборатории Профессора Ростокера Калифорнийского Университета г. Ирвайн, основные задачи представленной диссертации сфокусированы на исследовании формирования и транспортировки ИП/ПП поперек МП в вакууме и замагниченной плазме в широком диапазоне экспериментальных параметров, имеющих отношение к их инжекции и захвату в КРП, и наконец, на экспериментальном подтверждении данного процесса.

**Вторая глава** посвящена описанию экспериментальной установки и диагностики. Схема эксперимента приведена на Рис. 1а, 1б.

Мишенная плазма со средним диаметром 50 см генерировалась двумя кольцевыми наборами из 16 титаново-водородных плазменных пушек (ПП) типа J x B [P1-P3], или двумя индукционными плазменными драйверами [P4,P5]. Мишенная плазма инжектировалась вдоль внешнего МП с обоих торцов вакуумной камеры.

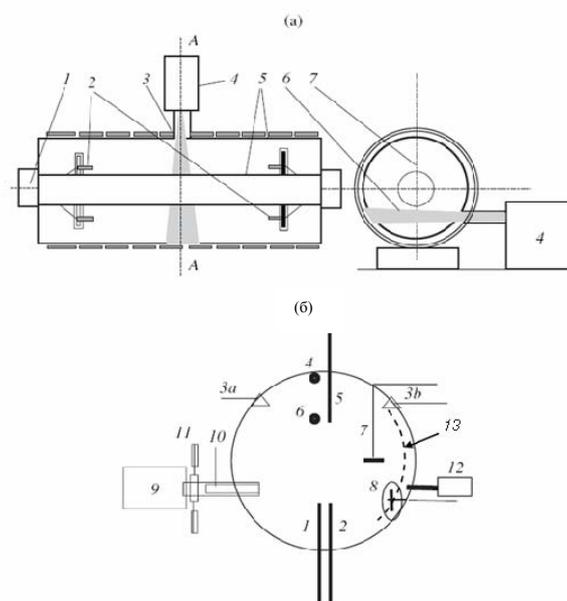


Рис. 1. (а) Схема экспериментальной установки: (1) источники питания систем плазменных пушек, (2) системы плазменных пушек, (3) транспортный соленоид, (4) плазменный/ионный ускоритель, (5) внешние и внутренние коаксиальные обмотки, (6) плазменный/ионный пучок, (7) исходная плазма, и (А) средняя плоскость. (б) Диагностическая аппаратура и ее положение: (1) двойной Лэнгмюровский зонд, (2,5) линейные, вертикально расположенные наборы КЦФ, (3а, 3б) СВЧ источник и приёмник, (4,6) два набора  $dV/dt$  - датчиков вдоль оси камеры и большой пояс Роговского, (7)  $90^\circ$  – поворотный набор КЦФ, (8) кольцевой вращающийся набор КЦФ типа «лейка», (9) ускоритель ПП/ИП, (10) транспортирующий соленоид, (11) кабельные пушки, и (12) Н- $\alpha$  детектор, (13) набор КЦФ, установленный у стенки [P3].

Составной набор dB/dt- датчиков с диаметром обмоток 5мм (см Рис. 1) позволил исследовать топологии МП во времени при инжекции ПП и ИП. Измерения температуры исходной плазмы проводились с помощью двойных Лэнгмюровских зондов. На основании этих данных оцениваемое полное количество потока ионов исходной плазмы, составило  $\sim 10^{18}$  ионов. Параметры плазмы и ионных пучков даны в Таблице 1.

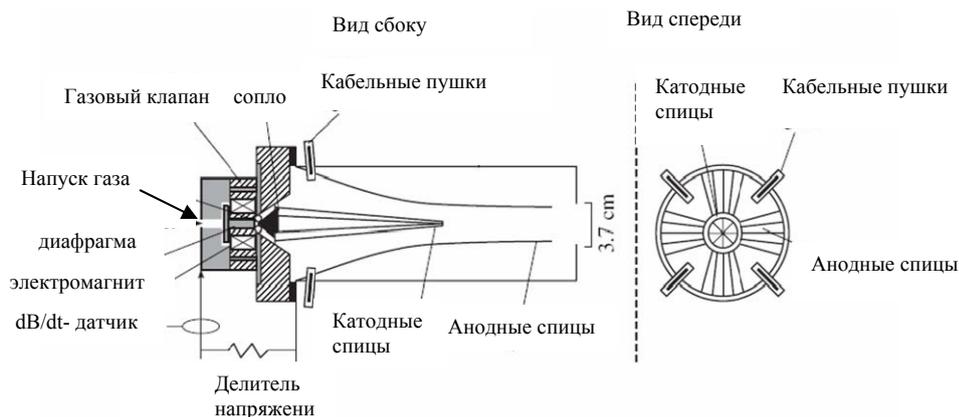
**Таблица 1. Основные параметры ИП и ПП [Р3].**

	Плазменный Пучок	Ионный Пучок
Ионы плазмы	$H^+$	$H^+$
Плотность, $n_i = n_e$ ( $см^{-3}$ )	$(1-3) \times 10^{12}-10^{13}$	$(2-5) \times 10^{11}$
Направленная скорость, $v_i/ (v_i/c)$	$(0.5-1.5) \times 10^7 / (1.7 -5.0) \times 10^4$	$(3-5) \times 10^8 / (1-1.6) \times 10^{-2}$
Направленная энергия ионов, (эВ)	$10 - 10^2$	$(0.6- 1.3) \times 10^5$
Поперечная энергия ионов, (эВ)	$\sim 6-10$	$\sim 500$
Поперечная энергия электронов (эВ)	$\sim 20$	$\sim 100$
Диэлектрическая константа, $\epsilon$	$2 \times 10^3 - 6.8 \times 10^5$	$1.5 \times 10^3 - 2 \times 10^4$
Ионный giro-радиус $\rho_i$ ( см )	$0.7 - 2.8$	$25-90$

Параметры в Таблице 1 приведены для  $B_z = 1$  кГс

**Третья глава** посвящена экспериментам и их анализу по формированию и транспортировке ПП в поперечном МП в вакууме и замагниченной плазме [Р1-Р3].

Обсуждается конструкция плазменного ускорителя, отличающегося модифицированной коаксиальной пушкой Маршала (см Рис. 2). Данный ускоритель генерировал на выходе пушки, ПП с поступательной энергией  $\sim 100$  эВ, длительностью импульса  $\sim 20$  мкс, плотностью  $> 3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и углом расходимости  $\alpha/2 \sim 10-20^\circ$ .



**Рис.2** Схема ускорителя плазменного пучка [РЗ].

Для ослабления влияния «кризиса тока» и увеличения длительности ускоряемой плазмы, использовалось несколько (до 4 штук) плазменных кабельных пушек (см Рис. 2), расположенных в радиальном направлении внутри ускорителя вблизи внутренней поверхности изолятора. С помощью этой модификации были получены ионные импульсы с длительностью до 40 - 50 мкс.

Обсуждаются эксперименты по транспортировке ПП поперек МП в вакууме и окружающей плазме и анализируются соответствующие данные. Транспортировка ПП в вакуумном МП характеризовалась ярко выраженным уменьшением плотности его периферийных слоев, сопровождаемым резким увеличением плотности ПП (на один порядок и более вплоть до  $n_b \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) в неотклоненной приосевой части пучка ( $> 200 \text{ А/см}^2$ ) при МП с величиной  $>1 \text{ кГс}$ , и уменьшением кинетической энергии ПП, как показано на Рис. 3.

Транспортировка ПП в замагниченной исходной плазме характеризовалась более однородным ослаблением по всему поперечному сечению ПП. ПП не проявлял заметного банчирования, как и явного отклонения как целого "вверх" по отношению к направлению его инжекции. Первый эффект мог быть связан с неустойчивостями ПП (такими, как расслоение широкого ПП на несколько струй), тогда как второе явление могло быть связано с низкой проводимостью окружающей плазмы,

недостаточной для обеспечения надежного шунтирования индуцированного в ПП поляризационного Е-поля (см Рис. 4).

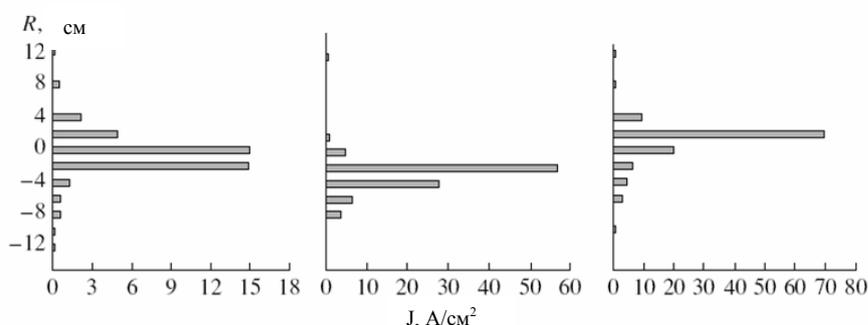


Рис. 3. Типичные распределения плотности тока поперёк коллимированного ПП в вакууме в средней плоскости вакуумной камеры для магнитных полей 0.3 кГс (слева), 0.8 кГс (посередине) и 1.2 кГс (справа). R (вертикаль) – радиальное расстояние КЦФ от оси инжекции ПП (линейный набор КЦФ в позиции 2, см. Рис. 1б) [Р3].

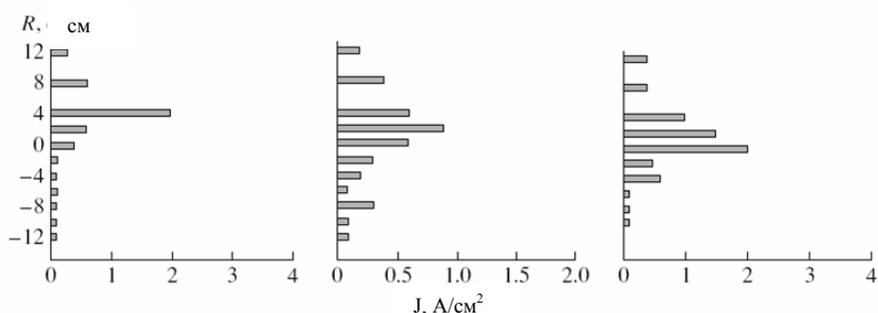


Рис. 4. Типичные распределения плотности тока поперёк коллимированного ПП в исходной плазме в средней плоскости вакуумной камеры для магнитных полей 0.3 кГс (слева), 0.8 кГс (посередине) и 1.2 кГс (справа). R (вертикаль) – радиальное расстояние КЦФ от оси инжекции ПП (линейный набор КЦФ в позиции 2; см. Рис. 1б) [Р3].

**Четвёртая глава** посвящена результатам и анализу генерации и транспортировки ИП в вакууме поперек МП и в замагниченной плазме [Р1-Р3, Р6-Р9]. Дано краткое описание ИП ускорителя и приведены его параметры.

Магнитно изолированный диод (МИД) был разработан в коллаборации с НИИ Ядерной Физики, г. Томск. Он имеет кольцевую геометрию с баллистической фокусировкой анод-катодного зазора и внешним изолирующим радиальным МП. Магнитная линза с тороидальным МП (ТМЛ) служила для трансформации баллистически сходящегося к оси ИП со средней энергией 90 – 100 кэВ и внутренней расходимостью  $\gamma = 3^\circ$  в прямой

пучок. Одночастичные ионные траектории рассчитывались в предположении полной токовой и пространственной зарядовой нейтрализации ИП для оптимизации конфигурации ТМЛ и амплитуды тока через нее (20-25 кА).

Транспортный соленоид ИП (ТС), являвшийся частью транспортного канала был расположен на расстоянии 11 см от выхода ТМЛ. Оптимизация транспортного канала, включая баллистическую фокусирующую секцию ТМЛ и ТС, была выполнена при условии, что ИП совершает один полный оборот в соленоиде во время своего движения. Экспериментальное распределение плотности тока ИП в канале дано на Рис. 5.

В целом ИП показал очень небольшое отклонение от оси инжекции пучка при его транспортировке в вакууме поперек МП в диапазоне от 0.1 до 1.5 кГс, как и ожидалось, согласно картине транспортировки в ЕхВ полях. В то же время, его транспортировка в поперечном МП характеризовалась сильным ослаблением плотности тока ИП поперёк ширины пучка, включая его сердцевину, в отличие от случая банчирования сердцевины ИП при транспортировке в подобных условиях.

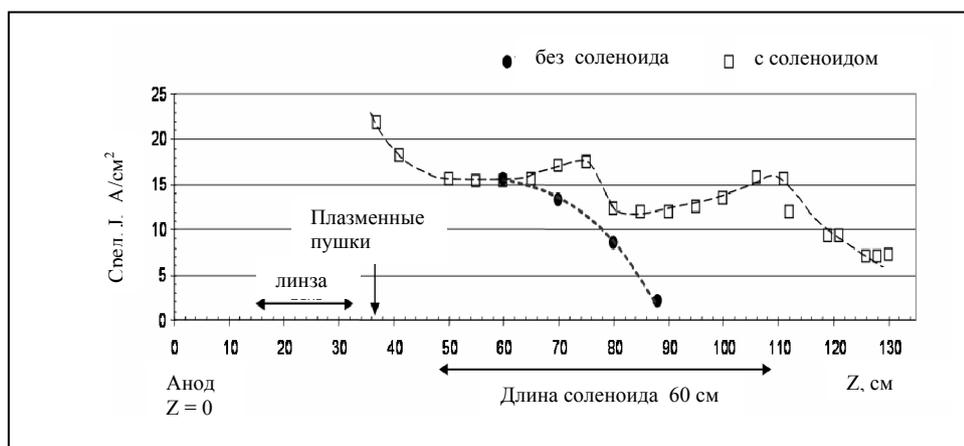
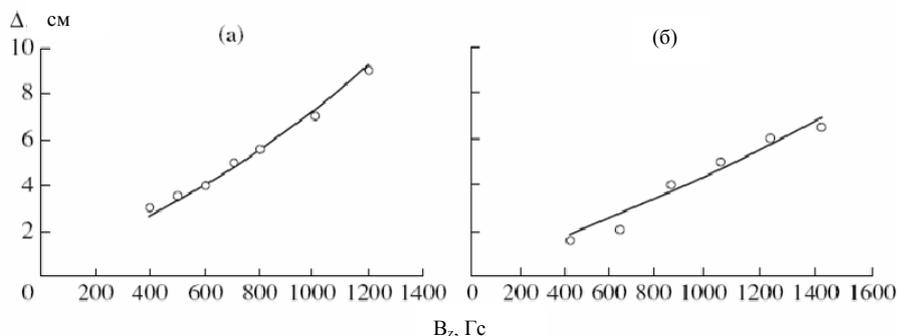


Рис. 5. Средняя плотность тока ИП в приосевой области (измеренная системой КЦФ) относительно расстояния транспортировки от анода. Средняя энергия ИП~ 90 кэВ [Р6].

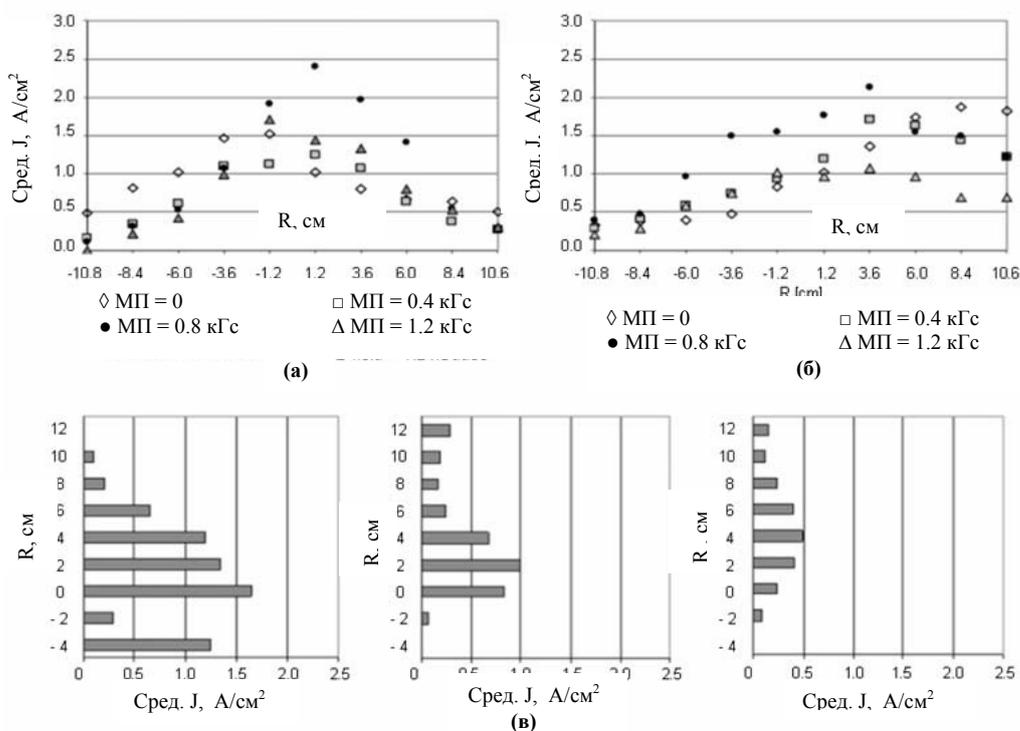
Были выполнены и проанализированы эксперименты по транспортировке ИП в замагниченной плазме. В общем, как показали измерения КЦФ, установленного у стенки, ИП продемонстрировал одночастичный характер поведения и следовал классической траектории,

определяемой силой Лоренца (см Рис. 1б). Это устанавливает границу на длину транспортировки ИП в замагниченной плазме  $\sim R_L$  (см. Рис. 6 а,б, для иллюстрации отклонения ИП, с двумя разными средними энергиями).



**Рис. 6.** Радиальное смещение «центра массы» плотности тока относительно оси инъекции ИП как функция поперечного магнитного поля. Кружками отмечены экспериментальные данные, а линиями показаны вычисленные результаты для (а) 60 кэВ и (б) 120 кэВ ИП соответственно [РЗ].

При этом транспортировка ИП характеризовалась сильным уменьшением плотности по всему поперечному сечению пучка (см. Рис. 7а-д) с преимущественным расширением вдоль магнитных силовых линий.



**Рис. 7.** (а). Распределения плотности тока ИП вблизи медианной плоскости с поперечным МП.  $R$  – (вертикальное) радиальное расстояние КЦФ от оси фланца инъекции ИП. (б) Распределения плотности тока ИП вблизи медианной плоскости с поперечным В-полем.  $R$  – (горизонтальное) радиальное расстояние КЦФ от оси фланца инъекции ИП. (в)

Распределения плотности тока ИП вакууме в медианной плоскости экспериментальной камеры с поперечной индукцией магнитного поля 0.3 кГс (слева), 0.8 кГс (в центре), 1.2 кГс (справа). R – (вертикальное) радиальное расстояние КЦФ от оси инжекции ИП [P3].  
Сред. J, A/cm<sup>2</sup>

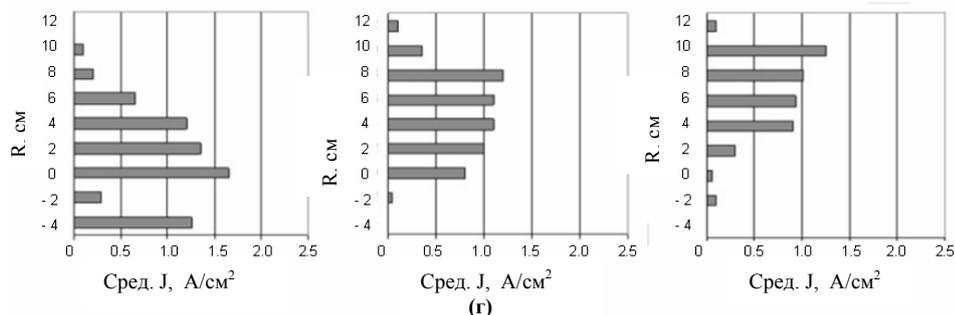
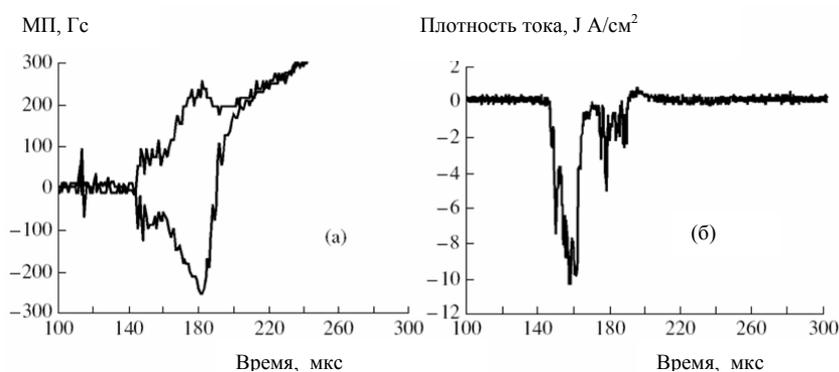


Рис. 7 (г) Распределения плотности тока поперек вертикального поперечного сечения ИП в замагниченной плазме в медианной плоскости экспериментальной камеры для значений индукции магнитного поля: 0.3 кГс (слева), 0.8 кГс (в центре),  $B=1.2$  кГс (справа). R – (вертикальное) радиальное расстояние КЦФ от оси инжекции ИП [P3].

В пятой главе представлены результаты и анализ формирования КРП и инжекции в нее ПП/ИП [P10-P13]. Из различных сценариев формирования конфигурации с реверсом поля (КРП) был выбран коаксиальный соленоидный реактор. В предыдущих исследованиях [6], использование данного подхода обеспечило формирование КРП с временем жизни в диапазоне от 50 до 100 мкс.

В большинстве экспериментов КРП формировалась в описанном выше коаксиальном соленоидном реакторе при срабатывании системы плазменных пушек, формирующих цилиндрические плазменные потоки за  $\Delta t \sim 5$  до 20 мкс до включения НС и ВС, что было необходимо для получения требуемой плотности плазмы в центральной части камеры. Формирование КРП по данному типичному сценарию происходило, когда в плазме разгонялся достаточный индукционный ток (с  $E_{\text{инд}} \sim 1$  до 3 В/см) в процессе нарастания магнитного потока внутреннего соленоида. Последующее расцепление магнитных полей НС и ВС сопровождалось обращением МП внутри плазменного тороида и пересоединением магнитных силовых линий на его концах с формированием замкнутой КРП. В типичных импульсах КРП формировалось между 5 и 20 мкс после возбуждения НС и ВС. КРП достигла максимума обращенного поля через 30 – 60 мкс и длилась в течение 50 – 130 мкс, до тех пор, пока индукционная азимутальная ЭДС могла поддерживать

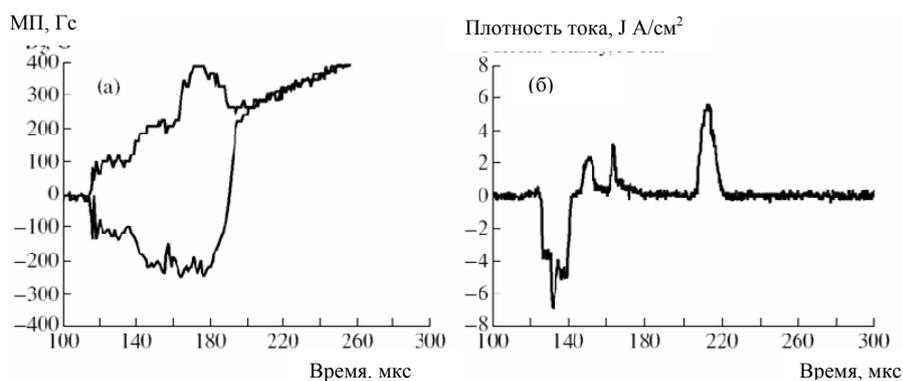
необходимую амплитуду азимутального тока в плазменном тороиде. Типичные сигналы двух  $dV/dt$ - датчиков и набора КЦФ показаны на Рис. 8 а,



**Рис. 8. (а) Типичные  $V_z$ -сигналы во время формирования КРП только в исходной плазме:  $Z=0$ ,  $R_{нс} = 40$  см, и  $R_{вс} = 12$  см; верхняя и нижняя кривая соответствуют системе  $V_z$ -dot датчиков в позициях 4 и 6 ( см. Рис. 1б), соответственно. (б) Типичные сигналы КЦФ во время формирования КРП только в исходной плазме: потенциал смещения = -40 В, радиус = 25 см, линейный набор КЦФ в позиции 5 ( см. Рис. 1б) [P11].**

Время распада КРП чётко соответствовало релаксации плазменного тока (измеряемого большим поясом Роговского) и длительностям  $H_\alpha$ - излучения, и отсечки СВЧ-сигнала. Измеренные плотность и температура КРП были равны  $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-3} > n_{pl} > 3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и от 5 до 10 эВ соответственно.

По сценарию формирования КРП без предварительного заполнения исходной плазмой, ПП инжектировался в реактор в вакууме через несколько (до десяти) микросекунд после возбуждения НС и ВС или одновременно. Критичные в данном подходе величины токов в НС и ВС были подобраны таким образом, что без исходной плазмы или ПП, начальное поле в камере было близким к нулю. Измеряя время между последовательными положительными вершинами сигналов на верхнем линейном наборе КЦФ, были определены энергии потоков захваченных ионов в диапазоне 15 – 30 эВ. Отрицательная часть сигнала представляет потоки быстрых электронов с энергиями выше приложенного напряжения смещения ( $E_e > 50$  до 90 эВ).



**Рис. 9. (а) Типичные dB/dt сигналы ( $Z = 0$ ,  $R_{\text{внеш}} = 40$  см,  $R_{\text{внут}} = 13$  см,  $V_z$  датчики в позиции #4 and #6, см Рис. 1б) во время формирования КРП только с ПП. (б) Типичный сигнал КЦФ ( $-40$  В – смещение при радиусе 25 см, линейный набор КЦФ в позиции # 5, см. Рис. 1б) во время формирования КРП только с ПП [P11].**

В экспериментах по инъекции ПП в предварительно сформированную КРП, ПП инжектировался спустя 10 - 30 мкс после формирования исходной плазмы и КРП (обычно, когда амплитуда обращённого поля составляла  $\sim 200$  Гс). Типичные сигналы  $V_z$ - датчиков и набора КЦФ показаны на Рис. 9 а, б. Сигналы с КЦФ, размещённых на противоположной стенке вдоль линии инъекции пучка, имели структуру ионных импульсов с предшествовавшими им электронными (отрицательными) импульсами с амплитудами до нескольких  $\text{A}/\text{cm}^2$ . Исходя из время-пролётных измерений, эти КЦФ сигналы можно приписать части ПП, которая прошла прямолинейно через КРП. Однако, сигналы от линейного набора КЦФ, размещённого в верхней половине медианной плоскости (см Рис. 9б), также отличались чёткими составными биполярными сигналами с большими положительными амплитудами (до  $10 \text{ A}/\text{cm}^2$ ). Из этих результатов следует, что ПП был захвачен. Эти сигналы появлялись спустя 20 - 40 мкс после формирования КРП и поджига плазменного ускорителя, и соответствовали энергии ионов в диапазоне от 10 до 20 эВ.

В эксперименте по инъекции ИП в предварительно сформированную КРП, ток и плотность частиц ИП были, по меньшей мере, в  $10^1$  и  $10^2$  раз ниже значений тока и плотности частиц плазмы КРП. Эти факторы обусловили появление проблемы непосредственного измерения ИП захваченного в КРП. В случае инъекции ИП в предварительно сформированную КРП, измеренные

плотности тока ИП, зарегистрированные тем же набором КЦФ, расположенным вблизи стенки были по амплитуде на порядок ниже сигналов с инъекцией ИП в замагниченную плазму. Следовательно, данные результаты указывают на частичный захват ионного пучка в КРП.

В заключении суммируются основные результаты и полученные новые данные.

## **Основные результаты работы**

1. Разработан, построен, протестирован и запущен в эксплуатацию новый тип комбинированного транспортного канала ИП для его формирования и проводки поперёк МП в вакууме и плазме. Выполнены первые эксперименты по транспортировке импульсного ИП с использованием новой комбинации, описанной выше, с повышенной эффективностью транспортировки.
2. Разработан, построен, протестирован и запущен в работу модифицированный тип коаксиальных плазменных пушек с увеличенной длительностью импульса плазмы, для изучения формирования ПП и его транспортировки поперек МП.
3. Разработаны, построены, протестированы и использованы в экспериментах различные типы плазменных пушек и плазменных индукционных драйверов для создания мишенной плазмы.
4. Продемонстрировано что, транспортировка интенсивных ПП в вакууме в МП может быть адекватно описана коллективной  $E \times V$  модой транспортировки, для  $0.1 \sim \beta < 1$ , и диамагнитной модой для  $\beta \geq 1$ , здесь  $\beta = 8\pi n_{пл} E_k / V^2$ , где  $E_k$  – кинетическая энергия ионов.
5. Продемонстрировано что, транспортировка ПП поперек вакуумного МП  $> 500$  Гс в вакууме приводит к увеличению плотности ПП на оси с уменьшением плотности его периферийных слоёв. Это можно объяснить формированием высокой  $E$ -потенциальной области (виртуального анода) на фронте ПП и/или воздействию  $J \times V$  сил на пучок с соответственным торможением и банчированием центральной части

- ПП, сопровождаемым частичным отражением и уменьшением плотности периферийных слоев ПП вдоль магнитных силовых линий.
6. Было показано, что наличие холодной замагниченной фоновой плазмы, с плотностью имеющей тот же порядок ( $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) что и ПП, приводит к уменьшению эффективности транспортировки ПП в плазме. Это явление может быть использовано для эффективного нагрева и/или возбуждения тока для плазмы КРП.
  7. Было показано, что транспортировка ИП с энергией 100 кэВ и начальной  $v_{\perp} / v_{\parallel} \sim 0.1$  в вакууме поперек МП характеризовалась уменьшением плотности периферийных слоёв пучка и демонстрировал коллективную моду транспортировки в  $E \times B$  полях, и была ограничена к расстоянием  $\sim R_L$  (радиус Лармора).
  8. Выполнены первые эксперименты по формированию КРП с помощью аксиально инжектированных кольцевых потоков плазмы в коаксиальном соленоидальном реакторе.
  9. Тангенциальная инжекция ПП в предварительно сформированную КРП (при тех же условиях, что и без инжекции ПП) обеспечивала увеличение среднего времени жизни ( $\sim 10\%$ ) и усилению реверса напряженности магнитного поля ( $\sim 50\%$ ).
  10. Зарегистрировано формирование КРП в отсутствие окружающей плазмы при тангенциальной инжекции ПП в коаксиальный соленоидальный реактор, во время его настройки на минимальное остаточное магнитное поле в камере до  $< 10$  Гс.
  11. Выполнены первые эксперименты по инжекции ПП/ИП в предварительно сформированную КРП, и получены данные по их захвату в конфигурацию .

## Цитируемая литература

1. N. Rostoker, A. Qerushi and M. Binderbauer, "Colliding beam fusion reactors", *Journal of Fusion Energy*, **22**, 83, (2004).

2. M. Tuszewski, "Field reversed configurations", *Nuclear Fusion*, **28**, 2033, (1988).
3. V.M. Bystritskii and A.N. Didenko, *High Power Ion Beams*, (New York: AIP, 1990).
4. J. Song, "Injection, Propagation and Magnetization of Plasma Beams in Transverse Magnetic Field and Magnetized Plasma," PhD Dissertation Thesis, University of California, Irvine, (1990).
5. A.I. Morozov, "The conceptual development of stationary plasma thrusters", *Plasma Physics Reports*, **29**, 235, (2003).
6. Z.A. Pietrzyk, G.C. Vlases, R.D. Brooks, K.D. Hahn, and R. Raman, "Initial results from the coaxial slow source FRC device", *Nuclear Fusion*, **27**, 1478, (1987).

### **Список публикаций по теме диссертации**

- P1. Anderson M, Bystritskii V, Garate E, Rostoker N, Song Y, VanDrie A, Binderbauer M., Propagation across B-field of intense plasma and ion beams in vacuum and magnetized plasma. *IEEE Conference Record - Abstracts. 31st IEEE International Conference on Plasma Science (IEEE Cat. No.04CH37537). IEEE. 2004, pp.313. Piscataway, NJ, USA .*
- P2. Michael Anderson, Michl Binderbauer, Vitaly Bystritskii, Eusebio Garate, Norman Rostoker, Yuanxu Song, Alan Van Drie. Propagation Across B-field of Intense Plasma and ion Beams in Vacuum and Magnetized Plasma. *15<sup>th</sup> International Conference on High Power Particle Beams (BEAMS). July 2004, pp. 24. St. Petersburg, Russia.*
- P3. M. Anderson, Vit. Bystritskii, E. Garate, N. Rostoker, Y. Song and A. Van Drie. Propagation of intense plasma and ion beams across B-field in vacuum and magnetized plasma. *Laser and Particle Beams, vol.23 ,2005, pp.117-129, Cambridge University Press.*

- P4. M. Anderson, V. Bystritskii, and J. K. Walters. Double and multi-pulsed operations of inductive plasma sources. *Nuclear Instruments and Methods A*, vol.545, 2005, pp.578-592, Elsevier Press.
- P5. M. Morehouse, V. Bystritskii, I. Isakov, I. Allfrey, S. Armstrong and M. Anderson, Repetitive Operation of Inductive Plasma Source. *FIZIKA*, **49**, 244, (2006), Tomsk, Russia.
- P6. Bystritskii V, Garate E, Qerushi A, Rostoker N, Song Y, VanDrie A, Anderson M, Armstrong S, Debolt N, Morehouse M, Matvienko V, Petrov A, Polkovnikova N, Shlapakovsky A, Isakov I, Binderbauer M., Generation and transport of a low energy intense ion beam. *Digest of Technical Papers. PPC-2003. 14th IEEE International Pulsed Power Conference (IEEE Cat. No.03CH37472). IEEE. Part Vol.1, 2003, pp.271-4 Vol.1. Piscataway, NJ, USA.*
- P7. Bystritskii Vit, Garate E, Rostoker N, Song Y, VanDrie A, Anderson M, Qerushi A, Dettrick S, Binderbauer M, Walters JK, Matvienko V, Petrov A, Shlapakovsky A, Polkovnikova N, Isakov I. Generation and transport of a low energy intense ion beam. *Journal of Applied Physics*, vol.96, no.2, 15 July 2004, pp.1249-56. Publisher: AIP, USA.
- P8. Bystritskii V, Garate E, Rostoker N, Yuanxu Song, Van Drie A, Binderbauer M, Anderson M, DeBolt N, Walters JK, Morehouse M, Dettrick S, Qerushi A, Matvienko V, Petrov A, Isakov I, Shlapakovsky A, Polkovnikova N. Generation and transport of a low-energy intense ion beam. *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol.32, no.5, Oct. 2004, pp.1986-92. Publisher: IEEE, USA.
- P9. Michael Anderson, Vitaly Bystritskii, Eusebio Garate and James K. Walters. High Current  $Z > 1$  Ion Beam Accelerator. *IEEE Conference Record - Abstracts. 32<sup>nd</sup> International Conference on Plasma Science (IEEE Cat. No.05CH37707). IEEE. 2005, pp.214. Monterey, California, USA.*
- P10. M. Anderson, M. Binderbauer, V. Bystritskii, E. Garate, N. Rostoker, Y. Song, A. Van Drie, I. Isakov, Plasma and Ion Beam Injection into an FRC. *13<sup>th</sup>*

*International Symposium on High Current Electronics, July 2004, Tomsk, Russia.*

P11. M. Anderson, M. Binderbauer, V. Bystritskii, E. Garate, N. Rostoker, Y. Song, A. Van Drie, and I. Isakov. Plasma and Ion Beam Injection into an FRC. *Plasma Physics Reports*, vol.31, no.10, 2005, pp.809-817.

P12. M. Anderson, M. Binderbauer, V. Bystritskii, E. Garate, N. Rostoker, Y. Song, A. Van Drie, and I. Isakov. Plasma & Ion Beam Injection into an FRC. *6th Symposium on Current Trends in International Fusion Research, March 7-11, 2005. Washington D.C., USA.*

[www.physicsessays.com/symposium2005.asp](http://www.physicsessays.com/symposium2005.asp)

P13. М. Андерсон, М. Биндербауер, В. Быстрицкий, Е. Гарате, Н. Ростокер, Ю Сонг, А. Ван Дри, И. Исаков, Инжекция Плазменных и Ионных Пучков в Плазменную Конфигурацию с Обращенным магнитным Полем , Физика Плазмы, т. 31, №.10, 2005, с. 873-882.