

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

СОТНИКОВ Олег Захарович

Исследование источника отрицательных ионов водорода
для инжектора высокоэнергетичных нейтралов

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель:

Кандидат физико-математических наук
Санин Андрей Леонидович

Новосибирск - 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ИСТОЧНИКОВ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ДЛЯ ИНЖЕКТОРОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ НЕЙТРАЛОВ.....	14
1.1 Отрицательные ионы в УТС	14
1.1.1 Управляемый термоядерный синтез.....	14
1.1.2 Методы нагрева плазмы.....	16
1.1.3 Инжекторы нейтралов с ускорением отрицательных ионов	18
1.2 Источники отрицательных ионов для инжекторов УТС	20
1.2.1 Дуговые источники ОИ в действующих инжекторах для УТС	22
1.2.2. ВЧ источники ОИ для инжектора нейтралов ИТЭР.....	24
1.3 ИНЖЕКТОР ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ НЕЙТРАЛОВ, РАЗРАБАТЫВАЕМЫЙ В ИЯФ	27
ГЛАВА 2. ВЧ ИСТОЧНИК ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ДЛЯ ИНЖЕКТОРА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ НЕЙТРАЛОВ ИЯФ	31
2.1 Методы получения сильноточных пучков отрицательных ионов.....	31
2.1.1 Методы получения отрицательных ионов	33
2.1.2 Типы разрядов в поверхностно-плазменных источниках ОИ	38
2.1.3 Требования к источникам ионов для инжекторов УТС	43
2.2 КОНСТРУКЦИЯ ИСТОЧНИКА ИЯФ	45
2.2.1 ВЧ плазменный драйвер	46
2.2.2 Расширительная камера и эмиттер ОИ – плазменный электрод.....	49
2.2.3 Система подачи цезия на плазменный электрод.....	50
2.2.4 Ионно-оптическая система	51
2.2.5 Магнитная система источника	52
2.2.6 Система термостабилизации	53
2.3 НОВЫЕ ИДЕИ, ЗАЛОЖЕННЫЕ В КОНСТРУКЦИЮ ИСТОЧНИКА	55
ГЛАВА 3. ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ.....	57
3.1 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКА	57
3.1.1 Эмиссионные токи источника.....	57
3.1.2 Основные зависимости и оптимизация режима работы источника.....	65
3.1.3 Получение пучка ОИ с необходимыми характеристиками	71
3.2 ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦЕЗИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКА	76
3.2.1 Процедура выделения и подачи цезия	77
3.2.2 Исследование эффекта подачи цезия в источник	79
3.2.3 Исследование механизмов восстановления цезиевого покрытия	86
3.3 УВЕЛИЧЕНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПРОЧНОСТИ ИОС ИСТОЧНИКА	91

3.3.1 Особенности поддержания высоковольтной прочности при работе с цезием.....	91
3.3.2 Влияние нагрева ИОС на высоковольтную прочность вытягивающего и ускоряющего зазоров.....	93
3.3.3 Механизм восстановления высоковольтной прочности при нагреве	99
3.4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ В ВЧ ДРАЙВЕРЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКА	101
3.4.1 Влияние потенциала плазмы на зависимость тока пучка от напряжения на плазменном электроде	101
3.4.2 Влияние разности потенциалов плазмы и плазменного электрода на характеристики источника	105
ГЛАВА 4. ТРАНСПОРТИРОВКА ИНТЕНСИВНОГО ПУЧКА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ЧЕРЕЗ ЛИНИЮ ТРАНСПОРТИРОВКИ.....	108
4.1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ЧЕРЕЗ ЛТ	110
4.1.1 Угловая расходимость пучка.....	110
4.1.2 Расталкивание пучка объемным зарядом	110
4.1.3 Компенсация объемного заряда пучка	112
4.1.4 Обдирка пучка ОИ.....	113
4.2 ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПУЧКА.....	114
4.2.1 Влияние энергии пучка на его транспортировку	115
4.2.2 Типичный профиль пучка на расстоянии 3.5 м.....	116
4.2.3 Сепарация пучка от атомов обдирки в ЛТ.....	119
4.3 АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	127

Введение

Актуальность работы. В настоящее время одним из основных методов нагрева плазмы в экспериментальных термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы является инжекция высокоэнергетичных нейтралов, которые получают за счет нейтрализации ускоренных заряженных частиц. Эффективность нейтрализации ускоренных положительных ионов водорода имеет высокую величину при энергиях ионов 1-50 кэВ/нуклон, и быстро уменьшается при дальнейшем увеличении энергии частиц. Для отрицательных ионов (ОИ) водорода высокая эффективность нейтрализации 60% сохраняется в широком диапазоне энергий частиц. Инжекторы нейтралов с энергией частиц до 100 кэВ основаны на нейтрализации пучков положительных ионов, а с энергией инжекции более 100 кэВ - на нейтрализации пучков отрицательных ионов водорода. В частности, для нагрева плазмы на установке LHD были разработаны инжекторы нейтралов с энергией пучка до 190 кэВ, позволяющие получать от одного источника пучок ОИ током до 36 А в импульсах длительностью 2 сек.

Создание крупных установок с магнитным удержанием плазмы требует повышения энергии инжектируемых частиц. Например, для строящегося токамака ИТЭР необходимы инжекторы нейтралов с энергией частиц более 0.5 МэВ, при этом ионный источник инжектора нейтралов установки ИТЭР должен обеспечивать получение пучков ОИ с током 48 А и длительностью импульса до 3600 с. С целью создания инжекторов со столь высокими параметрами становятся насущными разработка новых принципов и поиск новых методов получения мощных пучков ОИ в сильноточных многоапертурных источниках.

В настоящее время в ионных источниках высокоэнергетичных инжекторов применяется поверхностно-плазменный метод генерации ОИ, для повышения эффективности которого в источник подаётся цезий. Эмиссионная плотность тока ОИ, получаемых в современных поверхностно-плазменных источниках с большой длительностью импульсов ограничена на уровне 100-200 мА/см² - для источников с малой эмиссионной поверхностью, и до 45 мА/см² - для источников с

протяженными электродами. Для получения пучков ОИ с током 40-50 А необходимо создание эмиттеров ОИ большой площади со стабильным однородным цезиевым покрытием, а для увеличения энергии пучков – повысить высоковольтную прочность многоапертурных систем формирования и ускорения пучка. Возможным направлением совершенствования ионных источников инжекторов также является увеличение плотности тока эмиссии ОИ, и формирование пучков с большей плотностью тока в многоапертурных ионно-оптических системах.

Степень разработанности проблемы. Исследование и развитие фундаментальных основ поверхностно-плазменного метода получения ОИ, а также создание принципиально новых сильноточных поверхностно-плазменных источников ОИ является актуальной задачей с момента открытия поверхностно-плазменного метода получения ОИ в 1972 г. в ИЯФ и до настоящего времени. Наибольший вклад в развитие физики сильноточных поверхностно-плазменных источников отрицательных ионов с позиций увеличения тока, энергии и длительности импульса пучка внесли коллективы авторов ИЯФ, NIFS, JAERI, IPP, Consorzio RFX. Результаты этих исследований широко отражены в научной литературе, в частности в трудах проводившихся регулярно с 1977 по 2006 г. Брукхейвенских симпозиумов по получению и нейтрализации пучков отрицательных ионов и в продолжающих их симпозиумах NIBS (2008-2018).

Инжекторы на основе поверхностно-плазменных источников ОИ с использованием цезия надежно работают для нагрева плазмы на установке LHD в Японии с 1998 г., которые обеспечивают 13,1 МВт мощности, вкладываемой в плазму. Каждый инжектор обеспечивает мощность, вкладываемую в плазму 5,7 МВт с энергией 184 кэВ и длительностью инъекции до 10 с. Для нагрева плазмы и поддержания тороидального тока на установке JT-60U (JAERI) были разработаны 2 инжектора нейтралов, использующие ОИ, с суммарной мощностью инъекции 3,2 МВт и энергией частиц до 400 кэВ. Для международного экспериментального токамака ИТЭР разрабатываются инжекторы нейтралов мощностью до 16.7 МВт, энергией пучка свыше 0,5 МэВ и длительностью

импульса 3600 с. На прототипе источника ОИ для инжектора ИТЭР, разрабатываемом в Германии (установка ELISE) получен пучок ОИ водорода с током 18,3 А (средняя плотность тока в эмиссионных отверстиях $18,5 \text{ mA/cm}^2$), энергией 36 кэВ и длительностью импульса пучка 10 секунд.

Результаты, полученные на разработанных инжекторах высокоэнергетичных нейтралов на LHD и JT-60U и прототипах источников ОИ для ИТЭР, показывают, что задачи получения требуемых значений тока, энергии и длительности пучка ОИ, необходимых, например, для экспериментального термоядерного реактора ИТЭР к настоящему времени не достигнуты и требуют дальнейших исследований. Требуется увеличить плотность тока эмиссии ОИ при сборе пучка с большой эмиссионной поверхности. Также требуется увеличить высоковольтную прочность примыкающего ускорителя и снизить тепловую нагрузку на его электроды.

Целью диссертационного исследования являлась разработка и изучение сильноточного поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов нового типа. Источник разработан в Институте ядерной физики им. Будкера и использует классическую схему генерации пучка с большой площадью эмиссии, ранее применённую JAERI, LHD, IPP и Consorzio RFX. Новыми элементами, введенными в конструкцию источника ИЯФ являются прогрев и охлаждение электродов ионно-оптической системы (ИОС) горячим теплоносителем, использование распределенной направленной подачи цезия на эмиттер и формирование оптимальной геометрии магнитного поля (с выпуклыми силовыми линиями) в области магнитного фильтра и вытягивания пучка с помощью внешних постоянных магнитов. Задачей диссертационной работы было исследование влияния новых элементов, введенных в конструкцию источника, на его свойства, характеристики и процессы получения сильноточных пучков ОИ.

Для реализации поставленной цели были решены следующие **исследовательские задачи**:

- осуществлен запуск прототипа высокочастотного поверхностно-плазменного источника ОИ;

- проведены расчетно-теоретические и экспериментальные исследования параметров получения сильноточных пучков ОИ в многоапертурном ВЧ источнике;
- исследовано влияние поддержания высокой (до 220 °С) температуры электродов ионно-оптической системы источника ОИ на образование цезиевого покрытия, которое обуславливает характеристики источника ионов и качество формируемого пучка ОИ;
- получен пучок ОИ с проектными током и энергией в режиме длинных импульсов;
- достигнута надежная работа ВЧ источника сильноточных пучков ОИ с высокой воспроизводимостью характеристик;
- проанализированы условия снижения расходимости пучка ОИ в низкоэнергетичной линии транспортировки;
- предложены методы повышения эффективности работы источника ОИ для применения в разрабатываемом инжекторе высокоэнергетичных атомов водорода.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке теоретических и прикладных принципов получения, ускорения и транспортировки сильноточных пучков ОИ в многоапертурных источниках для инжекторов высокоэнергетичных нейтралов.

Элементы научной новизны заключаются в следующем:

1. Разработан и исследован ВЧ источник ОИ с большой площадью эмиссии, использующий принципиально новые элементы, позволяющие увеличить ток, энергию и длительность импульса пучка ОИ.
2. Экспериментально проверена и доказана эффективность применения физических принципов, заложенных в конструкцию источника и впервые использованных в ВЧ источниках с большой площадью эмиссии. Разработана новая методика создания устойчивого цезиевого покрытия на эмиссионной поверхности многоапертурного ВЧ источника ОИ, а также новая методика повышения высоковольтной прочности источника, работающего с подачей

цезия. Экспериментально подтверждено и исследовано влияние потенциала плазмы источника на эффективность эмиссии отрицательных ионов и сопутствующих электронов.

3. Впервые экспериментально исследована транспортировка интенсивного пучка ОИ через линию транспортировки с широкой апертурой, необходимую для очистки от вторичных и сопутствующих частиц. Показано, что в линии транспортировки пучок ОИ отделяется от высокоэнергетичных нейтралов, образующихся при обдирке.

Результаты проведенных исследований имеют высокое практическое значение для улучшения характеристик источников ОИ, применяемых в инжекторах высокоэнергетичных атомов водорода, а также для повышения эффективности получения и транспортировки пучка ОИ в подобных инжекторах. Полученные результаты позволяют сформировать систему прикладных рекомендаций по увеличению тока, энергии и длительности пучка. Предложенные и исследованные методы повышения высоковольтной прочности ионно-оптических систем источников ОИ и новый метод распределенной подачи цезия на поверхность эмиттеров большой площади могут быть использованы в разрабатываемых и действующих инжекторах высокоэнергетичных атомов водорода.

Практически важной для инжекторов высокоэнергетичных атомов водорода является проведенная разработка и обоснование новой методики измерения и обработки параметров пучка ОИ, основанной на оперативной регистрации токов источника в цепях систем питания источника и позволяющей исследовать формирование, транспортировку пучка и динамику его характеристик в течение импульса.

Проведенные исследования позволяют выработать подходы к дальнейшему развитию ВЧ источников отрицательных ионов водорода и модернизации их конструкции, способствующие:

- увеличению тока пучка за счет создания цезиевого покрытия с помощью распределенной подачи цезия на плазменный электрод;

- увеличению энергии пучка и высоковольтной прочности ИОС за счет нагрева электродов и выпуклой геометрии магнитного поля;
- увеличению длительности пучка за счет уменьшения тепловой нагрузки на электроды при использовании щелевого ускоряющего электрода;
- улучшению высоковольтной прочности источника и ускорителя путём разделения области источника и ускорителя промежуточной линией транспортировки.

Положения, выносимые на защиту.

1. На созданном прототипе ВЧ источника получен пучок с рекордной для ВЧ источников совокупностью параметров: с током пучка ионов H^+ 0,8 А, энергией 93 кэВ и длительностью импульсов 12 с и с током 1,2 А, энергией 84 кВ с длительностью импульсов 1,7 с при средней плотности тока в эмиссионных отверстиях 28 mA/cm^2 .
2. Экспериментально доказано, что при транспортировке пучка ОИ через линию с поворотными магнитами, обеспечивающими смещение ионного пучка перед его вводом в ускоритель производится эффективная очистка пучка ОИ от сопутствующих паразитных частиц. Доказано, что при типичном для источников давлении водорода в газоразрядной камере 0,4 Па и достигнутом давлении в линии транспортировки пучка $3 \cdot 10^{-3}$ Па значительная часть обдирки пучка происходит в области вблизи ИОС источника, а транспортировка через 3,5 м линию не приводит к значительному уменьшению тока пучка.
3. Подтверждено, что эмиссионные токи источника зависят от разности потенциалов между плазмой вблизи плазменного электрода и плазменным электродом. Доказано, что изменение потенциала плазмы в ВЧ драйвере при установке экрана драйвера или изменении давления водорода не влияет на эмиссионные токи источника и может быть компенсировано соответствующим изменением напряжения на плазменном электроде.
4. Разработана и исследована процедура подачи цезия на эмиттер отрицательных ионов в источнике, использующая ввод цезия непосредственно на периферию нагретого до $120 \text{ }^\circ\text{C}$ плазменного электрода (эмиттера отрицательных

ионов) через распределительную трубку. Доказано, что однократная подача цезия в распределительную трубку обеспечивает продолжительную (до 2 месяцев) работу без дополнительной подачи цезия в источник. Последующий нагрев трубки разрядом обеспечивает плавное выделение цезия из трубки и поддерживает на поверхности эмиттера ВЧ источника стабильное цезиевое покрытие, обеспечивающее интенсивную генерацию ОИ.

5. Разработана и исследована методика повышения высоковольтной прочности источника с большой площадью эмиссии в режимах работы с подачей цезия, использующая нагрев плазменного и вытягивающего электродов. Доказано, что нагрев электродов источника приводит к повышению высоковольтной прочности ИОС источника.

Структура работы. Основное содержание работы изложено на 134 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованной литературы из 85 источников. Работа содержит 7 таблиц, 44 рисунков. В первой главе дан обзор источников ОИ, разработанных для инжекторов нейтралов УТС, которые в настоящее время являются одной из основных систем нагрева плазмы в экспериментальных установках с магнитным удержанием плазмы для применения в реакторах УТС. Во второй главе приведено описание ВЧ источника ОИ, разработанного в ИЯФ для использования в инжекторе высокоэнергетичных нейтралов. В начале второй главы рассматриваются процессы и механизмы получения интенсивных пучков ОИ, вторая часть второй главы посвящена конструкции источника ОИ, разрабатываемого в ИЯФ, и описанию его отличительных характеристик. В третьей главе приведено описание экспериментов по получению интенсивного пучка ОИ, исследованию формирования и транспортировки пучка ОИ и экспериментальному подтверждению эффективности заложенных в конструкцию ВЧ источника ИЯФ новых элементов. Были изучены эмиссионные характеристики источника, влияние цезия на характеристики источника, увеличение высоковольтной прочности источника при нагреве электродов ИОС, влияние положительного напряжения смещения на плазменном электроде на

эмиссионные характеристики источника. Глава 4 посвящена исследованию транспортировки пучка через разделительную линию транспортировки и исследованию его характеристик.

Достоверность полученных результатов была подтверждена проведением экспериментов с использованием нескольких независимых диагностик и обеспечивалась высокой воспроизводимостью полученных характеристик. Получено удовлетворительное совпадение полученных численным моделированием траекторий ионов и электронов с экспериментальными данными. Сформулированные выводы и рекомендации обоснованы большим объёмом проанализированных данных, полученных автором в процессе подготовки работы и анализом работ, проведенных на других источниках ОИ инжекторов высокоэнергетичных атомов.

Апробация диссертации. По теме диссертационного исследования опубликовано 12 работ общим авторским объемом 2,5 печ. л., в том числе 7 научных статей (общим авторским объемом 1,7 печ. л.) в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК при Минобрнауки России и приравненных к ним.

В ведущих рецензируемых научных журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией и приравненных к ним опубликованы статьи:

1. Сотников О.З. Сравнительный анализ стационарных источников отрицательных ионов водорода с различной геометрией разряда / Ю.И. Бельченко, А.Л. Санин // Ядерная физика и инжиниринг.— 2015.— №6
2. Сотников О.З. Характеристики мощного ВЧ источника отрицательных ионов водорода для инжекторов нейтралов УТС / Г.Ф. Абдрашитов, Ю.И. Бельченко, А.Л. Санин., др. // Физика плазмы.— 2017.— №43.
3. Sotnikov O. Inductively driven surface-plasma negative ion source for N-NBI use / G. Abdrashitov, Y. Belchenko, A. Sanin, etc. // Review of Scientific Instruments.— 2016.— №87.

4. Sotnikov O. High voltage holding in the negative ion sources with cesium deposition / G. Abdrashitov, Y. Belchenko, A. Sanin, etc. // Review of Scientific Instruments.— 2016.— №87.
 5. Sotnikov O. Effect of plasma grid bias on extracted currents in the RF driven surface-plasma negative ion source / Y. Belchenko, A. Ivanov, A. Sanin, etc. // Review of Scientific Instruments.— 2016.— №87.
 6. Sotnikov O. Efficient cesiation in RF driven surface plasma negative ion source / Y. Belchenko, A. Ivanov, A. Sanin, etc. // Review of Scientific Instruments.— 2016.— №87.
 7. Sotnikov O. Comparative analysis of continuous-wave surface-plasma negative ion sources with various discharge geometry / Y. Belchenko, A. Sanin // Review of Scientific Instruments.— 2014.— №85.
- В материалах научных конференций опубликованы статьи:
8. Sotnikov O. Negative Ion Production in the RF Multiaperture Surface-Plasma Source / G. Abdrashitov, Yu. Belchenko, A. Dranichnikov; etc. // AIP Conf. Proc.— 2015.— №1655.
 9. Sotnikov O. Operation of RF driven Negative Ion Source in a Pure-Hydrogen Mode / G. Abdrashitov, Yu. Belchenko, A. Ivanov, etc. // AIP Conf. Proc.— 2015.— №1655
 10. Sotnikov O. Emission properties of inductively driven negative ion source for NBI / G. Abdrashitov, Yu. Belchenko, A. Ivanov, etc. // AIP Conf. Proc.— 2016.— №1771.
 11. Sotnikov O. Negative ion based neutral injector: Beam formation and transport / A. Ivanov, Yu. Belchenko, P. Deichuli, etc. // AIP Conf. Proc.— 2016.— №1771.
 12. Sotnikov O. Extracted beam and electrode currents in the inductively driven surface-plasma negative hydrogen ion source / Yu. Belchenko, A. Ivanov, A. Sanin, etc. // AIP Conf. Proc.— 2017.— №1869.

Результаты диссертационного исследования были представлены на международных конференциях: 4th International Symposium on Negative ions, Beams and Sources (Garching, Germany, 2014); XII, XIII Курчатовская молодежная научная школа (г. Москва, 2014, 2015); 42, 43, 44 конференция по физике плазмы

и управляемому термоядерному синтезу (г. Звенигород, Московской обл., 2015, 2016, 2017); 16th International Conference on Ion Source (New York City, USA, 2015); 11-th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (Новосибирск, 2016); 5th International Symposium on Negative ions, Beams and Sources (Oxford, UK, 2016). Работы, составляющие материал диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в ИЯФ СО РАН (2012-2017).

Результаты исследования были апробированы и внедрены в практику в ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Личное участие автора. Участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. На всех этапах процесса исследования автор непосредственно участвовал в формулировании цели и задач исследования, выборе методов исследования. При определяющем участии автора проведены экспериментальные исследования оптимизации параметров пучка, разработаны теоретико-методические основы получения, ускорения и транспортировки пучков ОИ, получен пучок ОИ с проектными параметрами, определены пути дальнейшей оптимизации источника. При активном личном участии автора были проведены анализ и обработка результатов исследований, а также подготовлены основные статьи и доклады по результатам работы, доложенные на научных конференциях и семинарах международного и всероссийского уровней.

Глава 1. Обзор источников отрицательных ионов для инжекторов высокоэнергетичных нейтралов

Атомный отрицательный ион представляет собой связанное состояние атома и электрона. В отрицательных ионах взаимодействие валентного электрона с атомом короткодействующее, поэтому число связанных состояний обычно одно. Основной характеристикой отрицательных ионов является энергия связи электрона и захватившего его атома S , которая называется энергией сродства к электрону. Сродство электронов некоторых отрицательных ионов не превышает нескольких эВ, поэтому отрицательные ионы легко теряют свой заряд, что позволяет их использовать в перезарядных технологиях. Раздел 1.1 рассказывает, зачем инжекторам нейтральных атомов для УТС нужны источники ОИ. Раздел 1.2 посвящен обзору созданных и разрабатываемых источников ОИ для инжекторов УТС и выявлены их основные недостатки. Раздел 1.3 посвящён инжектору высокоэнергетичных атомов, разрабатываемому ИЯФ, и его принципиальным отличиям.

1.1 Отрицательные ионы в УТС

Одним из направлений использования ОИ является создание мощных инжекторов нейтральных атомов для нагрева плазмы в установках для получения управляемого термоядерного синтеза на основе источников ОИ [1].

1.1.1 Управляемый термоядерный синтез

Потребности человечества в энергии с его непрерывным ростом населения не могут быть удовлетворены за счет использования традиционных средств получения энергии на основе ископаемого топлива или ядерного деления. Возможным подходом к решению этих проблем может служить управляемый термоядерный синтез.

Термоядерные реакции - это основной тип процессов, в которых ядрам, испытывающим взаимное кулоновское отталкивание, удаётся, преодолев соответствующий электростатический барьер, сблизиться на расстояние действия ядерных сил притяжения и, провалившись в образуемую ими потенциальную яму, совершить экзо-энергетическую перестройку.

Энергия синтеза рассматривается многими исследователями в качестве источника энергии для человечества в долгосрочной перспективе. В качестве основной реакции предполагается использовать смесь дейтерия и трития. Сечение кулоновского рассеяния больше сечения термоядерных реакций. Для осуществления управляемого термоядерного синтеза (УТС) необходимо создавать плазму с $T = 20$ кэВ. Для удержания такой плазмы предполагается использовать сильные магнитные поля.

Установки для магнитного удержания плазмы для исследования УТС можно разделить на 3 основных группы: открытые ловушки, стелараторы, токамаки.

Для открытых ловушек характерна линейная геометрия, причём силовые линии магнитного поля пересекают торцевые поверхности плазмы. Открытые ловушки обладают рядом важных преимуществ по отношению к другим системам удержания: они привлекательны с инженерной точки зрения; в них эффективно используется удерживающее плазму магнитное поле; они допускают работу в стационарном режиме; в них относительно просто решается проблема удаления из плазмы продуктов термоядерной реакции и тяжелых примесей. Вместе с тем открытые концы ловушки приводят к большой скорости потерь плазмы вдоль силовых линий магнитного поля.

Для предотвращения потерь на концах в токамаках и стелараторах плазму замыкают в тор. Тороидальная компонента магнитного поля обеспечивается внешними обмотками. А полоидальная компонента в случае токамака создаётся индуцированным в плазме тороидальным током, а в случае стеларатора - внешними обмотками. Генерировать тороидальный ток в токамаке можно с помощью внешнего индуктора (внешней обмотки трансформатора) или с помощью пучка высокоэнергетичных нейтралов.

Сегодня токамак является наиболее исследованной схемой для магнитного удержания плазмы, и именно он выбран для крупнейшего реактора для осуществления УТС ИТЭР, который станет первым шагом в направлении коммерческого термоядерного реактора.

Условие того, что нагрев плазмы за счет энергии D-T реакции достаточен для поддержания температуры плазмы при всех потерях энергии в отсутствии внешнего нагрева, называется критерием Лоусона и определяет плотность плазмы n , время удержания энергии τ_E и температуру термоядерной плазмы T

$$n\tau_E T > 3 \cdot 10^{21} \text{ с} \cdot \text{м}^{-3} \text{кэВ} \quad (1.1)$$

За последние несколько десятилетий был достигнут значительный прогресс, величина $n\tau_E T$ была увеличена на несколько порядков. В современных экспериментах по УТС удерживаемая плазма достигает плотности $n=10^{20} \text{ м}^{-3}$, при $T=10\text{-}20 \text{ кэВ}$. Время удержания 1 с с $Q=0,6$ было достигнуто на токамаке JET [2].

Для достижения $Q=1$ необходимо увеличить время удержания. Этого можно достичь увеличением объема плазмы. Для экспериментального реактора ИТЭР радиус составит 6,2 м (у JET = 3 м). Ожидаемая выделяемая мощность на ИТЭР 500 МВт, что соответствует $Q=10$.

Для нагрева плазмы в ИТЭР до 10 кэВ будут применены несколько внешних систем нагрева.

1.1.2 Методы нагрева плазмы

Основные методы дополнительного нагрева плазмы перечислены в таблице

1.1. Для иллюстрации показаны мощности, проектируемые для ИТЭР [3].

Таблица 1.1 – Методы дополнительного нагрева плазмы на ИТЭР

система нагрева	мощность, МВт	основные функции
инжекция нейтралов	33	Нагрев, создание тороидального тока
ИЦР нагрев	20	Нагрев ионов
ЭЦР нагрев	20	Нагрев электронов, создание тороидального тока

Омический нагрев. Тороидальный ток в плазме, который в токамаках получают за счет внешнего индуктора, приводит к джоулеву нагреву. Этот базовый метод нагрева плазмы применим только к токамакам, и нагрев плазмы

при нем недостаточен для достижения температур, необходимых для УТС. Электрическая проводимость плазмы увеличивается с ростом ее температуры, что приводит к уменьшению мощности омического нагрева. Таким образом, максимальная температура нагрева ограничена $T = 1 \div 2$ кэВ. Поэтому, для достижения температуры плазмы, при которой вероятность термоядерных реакций достигнет значения, необходимого для поддержания энергетического баланса наряду с омическим нагревом необходимо применять дополнительные методы нагрева.

СВЧ нагрев. Стандартным методом нагрева является радиочастотный (СВЧ) нагрев, который использует электромагнитные волны для передачи энергии в плазму. Ионы и электроны плазмы, удерживаемые магнитным полем, движутся вдоль магнитных силовых линий с характерным радиусом и частотой вращения. Если частота введенной электромагнитной волны совпадает с частотой вращения, происходит резонансный нагрев. Это позволяет нагревать различные составляющие плазмы при использовании различных частот волн, соответствующих плотности и составу плазмы. Для СВЧ нагрева обычно используются три частотных диапазона. Ионно-циклотронный резонансный (ИЦР) нагрев использует частоты между 30 - 100 МГц в соответствии с частотой вращения ионов. Для электронов соответствующая резонансная частота находится в диапазоне между 50 и 150 ГГц, она используется для метода электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева. Асимметричное фазирование элементов антенны позволяет генерировать ток в плазме с помощью быстрых волн в направлении или против тока плазмы. Нижнегибридный нагрев работает в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц, использует возбуждение коллективных плазменных колебаний и приводит к нагреву как ионной, так и электронной компоненты плазмы.

Инжекция высокоэнергетичных нейтралов. Важным способом нагрева плазмы является нагрев плазмы за счет инъекции в нее пучка высокоэнергетичных нейтралов. На пучок нейтралов не действует сильное магнитное поле, которое удерживает плазму, поэтому они могут проникнуть в

плазменный тор, где в результате взаимодействия с ионами и электронами плазмы могут ионизоваться. Образованные таким образом первичные быстрые ионы удерживаются магнитным полем установки. Дальнейшие последовательные столкновения с частицами плазмы приводят к передаче кинетической энергии от первичных ионов к ионам и электронам плазмы, приводя к её нагреву. Для уменьшения потерь энергии на излучение плазмы, для инжекции в плазму используются элементы с малым Z (водород и его изотопы).

За получение первичных высокоэнергетичных ионов в плазме отвечают следующие процессы: ионизация нейтралов пучка электронным ударом, ионизация нейтралов пучка ионным ударом, резонансная перезарядка атомов пучка с ионами плазмы. Таким образом, нейтральный пучок в идеальной однородной водородной плазме экспоненциально затухает вдоль направления распространения в результате его ионизации и перезарядки.

Для нагрева плазмы в современных токамаках, например, ASDEX Upgrade с плотностью плазмы $n = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и малым радиусом 0,5-0,8 м необходима энергия нейтральной инжекции $\sim 90 \text{ кэВ}$. Для будущих токамаков, например, ИТЭР с малым радиусом 2 м будет необходима энергия инжекции порядка 1 МэВ [4].

1.1.3 Инжекторы нейтралов с ускорением отрицательных ионов

Магнитное поле, удерживающее плазму в термоядерном реакторе, препятствует инжекции заряженных частиц. Для легких атомов, таких, как водород, необходима нейтральная инжекция. Если нейтралы будут обладать достаточной энергией, они могут быть использованы для нагрева плазмы от температуры 1 кэВ, достижимой путем омического нагрева, до температуры $\sim 10 \text{ кэВ}$, необходимой для осуществления самоподдерживающейся термоядерной реакции. При прохождении пучка через плазму происходит его ионизация и торможение. Для получения необходимой глубины проникновения пучка, в плазму и пучок должен иметь энергию 400 кэВ и выше [4].

Пучки нейтралов с высокой энергией могут быть созданы как из положительных, так и из отрицательных ионов. Быстрый нейтрал может быть

образован из быстрого положительного иона путем передачи ему электрона от молекулы нейтрального газа. При энергии иона H^+ меньше 20 кэВ эффективная толщина перезарядной мишени может быть сделана достаточно большой для осуществления практически 90% преобразования. С ростом энергии происходит уменьшение сечения захвата электрона и возрастает сечение конкурирующего процесса реионизации, вследствие чего дальнейшее увеличение толщины мишени уже не дает необходимого преобразования в нейтралы. Для пучков H^+ с энергией 100 кэВ и D^+ с энергией 200 кэВ выход нейтралов составляет уже 20% и с ростом энергии падает так быстро, что это делает малоэффективным использование положительных ионов для получения нейтралов высоких энергий [5].

В случае высоких энергий частиц для получения быстрых атомов предпочтительно использовать обдирку ОИ. Сечение получения быстрых атомов путем отрыва дополнительного электрона от ОИ слабо изменяется с увеличением энергии отрицательных ионов. Сечение конкурирующего процесса “реионизации” образующихся в мишени атомов зависит от типа мишени. При использовании фотонной или плазменной мишени “реионизация” атомов определяется плотностью сопутствующего газа и имеет малую величину. В работе [6] экспериментально наблюдался выход нейтралов ~80% на литиевой и магниевой плазме. В газовых мишенях при высоких энергиях отношение сечений процессов нейтрализации отрицательных ионов и ионизации высокоэнергетичных атомов есть величина постоянная. Правильно подобранная толщина обдирочной газовой мишени [7] позволяет получать равновесный выход атомов 55—60% в широком диапазоне энергии исходного пучка ионов H^- .

Удерживаемая магнитным полем плазма может быть нагрета до термоядерной температуры высокочастотными методами, но это сопряжено со значительными трудностями. Развитие интенсивных и слабо расходящихся пучков отрицательных ионов водорода может привести к разрешению проблемы нагрева плазмы, и поэтому во многих лабораториях мира сейчас занимаются этим вопросом.

1.2 Источники отрицательных ионов для инжекторов УТС

Исследование и развитие фундаментальных основ поверхностно-плазменного метода получения ОИ, а также создание принципиально новых сильноточных поверхностно-плазменных источников ОИ является актуальной задачей с момента открытия поверхностно-плазменного метода получения ОИ в 1972 г. в ИЯФ и до настоящего времени.

Импульсные источники ИЯФ. Ранее в ИЯФ для программы УТС разрабатывались различные варианты сильноточных импульсных ППИ, использующими газовой разряд в скрещенных полях. Основное внимание было направлено на получение высоких удельных характеристик генерации отрицательных ионов. Совершенствование этих источников было связано с расширением эмитирующей поверхности электродов и реализацией геометрической фокусировки в источниках с катодной генерацией ОИ. Из источников с цилиндрической (одномерной) геометрической фокусировкой [15] были получены импульсные пучки ионов Н⁻ с током до 4 А с плотностью тока 8 А/см² [8]. Высокие параметры, достигнутые в работе импульсных источников отрицательных ионов связаны с эффективным поверхностно-плазменным механизмом генерации отрицательных ионов (описан в разделе 2.1) на катоде разрядов в скрещенных полях и геометрической фокусировкой ОИ в эмиссионные отверстия источника.

В сотовом источнике с большой площадью катода (600 ячеек, площадь катода 60 см²), использующего сферическую двумерную геометрическую фокусировку потока ОИ на эмиссионные отверстия многоапертурной системы формирования был получен пучок ионов Н⁻ током 11 А, энергией 20 кВ в импульсах длительностью 1 мс [15]. Высокие параметры, достигнутые в работе импульсных источников отрицательных ионов связаны с эффективным поверхностно-плазменным механизмом генерации отрицательных ионов на катоде разрядов в скрещенных полях и геометрической фокусировкой ОИ в эмиссионные отверстия источника.

При дальнейшем развитии источников с разрядами в скрещенных полях и разработке квазистационарных сотовых источников была снижена плотность мощности вкладываемой в плазму, что привело к снижению эмиссионного тока ОИ. Из квазистационарного сотового источника с эмиссионной поверхностью катода 10 см^2 был получен пучок ионов Н⁺ током 1 А, эмиссионной плотностью тока 2 А/см^2 и продолжительностью импульсов до 1 сек. Основными проблемами при работе с пучками ОИ столь высокой плотности в режиме длинных импульсов было обеспечение однородной генерации ОИ на поверхности катода и охлаждение электродов ИОС.

Источник с независимым конвертером Беркли. На ППИ источнике ОИ, разработанном в лаборатории Беркли, был получен пучок ОИ с током 1,2 А, энергией 80 кэВ и длительностью импульса 30 с. Для создания плазмы в источнике использовалось 8 накаливаемых катодов, плазма удерживалась мультипольным магнитным полем. Конвертер был смещен на отрицательный потенциал до 200 В относительно анода разрядной камеры. Площадь конвертера, на котором происходила генерация ОИ, составляла 525 см^2 . Конвертер обеспечивал одномерную фокусировку ОИ в щель. Время жизни накаливаемых катодов составляло более 300 часов. Для работы источника требовалась большая подача цезия $\sim 100 \text{ мг/час}$. [16]

Источники ОИ на действующих и разрабатываемых инжекторах высокоэнергетичных атомов. Характеристики действующих и проектируемых инжекторов нейтралов для УТС показаны в таблице 1.2. В ней показаны параметры, достигнутые на существующих прототипах и инжекторах нейтралов, а также требования для инжектора нейтралов ИТЭР. Во втором и третьем столбцах таблицы показаны характеристики источников BATMAN [9] и ELISE [10], разработанных в качестве прототипов инжекторов ИТЭР, в четвертом и пятом столбцах - характеристики существующих инжекторов установок JT60U [11] и LHD [12]. Шестой столбец показывает характеристики, достигнутые на стенде по исследованию ускорения пучка до энергии 1 МэВ [13]. В седьмом столбце показаны характеристики источников, планируемых для инжекторов ИТЭР [14].

Таблица. 1.2 Параметры разработанных и планируемых инжекторов высокоэнергетичных нейтралов.

Параметр	IPP прототипы		LHD	JT60U	MV TF	ИТЭР
	BATMAN	ELISE				
Частицы	H, D	H, D	H, D	D	H	H,D
Мощность нейтральной инъекции, МВт	-	-	5,7(13.1)	3,2(6,4)	-	16,5 (33)
Энергия пучка, кВ	25	36	180	400	1000	1000
Источник плазмы	ВЧ разряд		Дуга с накаливаемыми катодами			ВЧ разряд
Размеры, м ²	0,59-0,32	1·0,9	1,45-0,35	1,22-0,64	0,22-0,22	1.95-0,9
Количество апертур	140	640	770	1080	9-12	1280
Ток пучка H ⁺ , А	2.1	18.3	17	36	0.32	48
Длительность, с	4	10	10	30	60	3600
Мощность разряда, кВт	100	360	180	350	40	800
Давление водорода, Па	0,3	0,3	0,3-0,4	0,3-0,4	0,25	0,3

1.2.1 Дуговые источники ОИ в действующих инжекторах для УТС

Инжектор на LHD. Инжекторы высокоэнергетичных нейтралов на основе ППИ ОИ с использованием цезия надежно работают на LHD с 1998. Три инжектора обеспечивают 13,1 МВт мощности, вкладываемой в плазму. Один инжектор обеспечивает мощность, вкладываемую в плазму 5,7 МВт с энергией 184 кэВ. Инжекторы используются для тангенциальной инъекции. Длительность инъекции составляет 10 с при использовании водорода. Также были проведены эксперименты с 120 с инъекцией пучка нейтральных атомов с одного инжектора нейтралов с полной мощностью, вкладываемой в плазму 0,3 МВт [12].

Инжектор нейтралов на основе ОИ используется на LHD как первичное устройство для нагрева плазмы. Поэтому необходима надежная работа с высокой повторяемостью. Для каждого инжектора нейтралов, которые используют по два источника ОИ, требуемая энергия и мощность инъекции составляет 180 кэВ и 5 МВт соответственно [12].

Однородность вытягиваемого пучка ОИ тесно связана с однородностью плотности плазмы в источнике. Дипольное магнитное поле вблизи плазменного электрода, необходимое для подавления вытягиваемых из плазмы электронов, которые сопутствуют пучку отрицательных ионов, приводит к E×B дрейфу в большой плазменной камере источника. Это приводит к неоднородности распределения плазмы в направлении поперек магнитного поля. Для компенсации этой неоднородности на источниках LHD на катоды, расположенные в 12 местах вдоль E×B дрейфа, прикладывается разный ток нагрева и напряжения дуги, которые управляются удаленно и независимо друг от друга [12].

Было обнаружено, что контроль температуры сегментов плазменного электрода важен для улучшения однородности пучка. Это связано с тем, что эффективность конверсии в ОИ зависит от цезиевого покрытия на плазменном электроде. Поэтому, секции на плазменном электроде теплоизолированы таким образом, чтобы обеспечивать их правильную температуру при их нагреве во время импульса плазмы и пучка. Теплоизоляция секций определялась в том числе из неоднородности плазмы вдоль плазменного электрода [12].

Расход цезия на источнике определялся по изменению веса печки. На 22000 выстрелов в течение 2003 года было израсходовано 14-15 г цезия [12]. Длительность импульсов пучка составляла 1-2 с, плазмы 7-8 с. Время жизни накаливаемых катодов определяло время между обслуживаниями источников, в среднем накаливаемые катоды заменялись после $\sim 10^4$ импульсов.

Инжектор на JT-60U. Разработанный для инжектора нейтралов на JT-60U источник ОИ состоит из дугового генератора отрицательных ионов, экстрактора и трехступенчатого ускорителя. Внутренний диаметр ускорителя составляет 1,8 м, длина одной секции ускорения 0,315 м. Одна из наиболее сложных задач получения 10 МВт, 100 с пучка - это поддержание высокой высоковольтной прочности ускорителя [11]. На текущий момент энергия ускорения ограничена на уровне ~ 400 кВ из-за пробоев между ускоряющими сетками. Более того, высоковольтная прочность ускорителя ограничена на уровне 450 кВ даже в отсутствии пучка ОИ.

Еще одна важная задача - это уменьшение тепловой нагрузки на последнем электроде ускорения пучка. На электроде применена многоапертурная схема ускорения, которая сделана из 5 сегментов, в каждом из которых сделано 24×9 круглых апертур для ускорения элементарных струек пучка до энергии до 500 кВ. В случае длительной работы с получением 3,2 МВт пучка нейтральных атомов соответствующая пучку ОИ с током 29 А и энергией 320 кэВ, температура воды через электрод повышается и выходит на уровень до $\Delta T \sim 40^\circ\text{C}$ за 20 с. Это соответствует нагреву ускоряющей сетки с мощностью 600 кВт в каждом источнике. Для работы с инжекцией 10 МВт требуется уменьшение осаждаемой на ускоряющем электроде мощности до ~ 500 кВт. Возможны две причины нагрева ускоряющих электродов. Первая - это прямой перехват ОИ пучка на электрод. Были проведены эксперименты показывающие, что пространственный заряд струек приводит к увеличенному оседанию струек на электрод [17]. Вторая причина связана с обдиркой ОИ, которая приводит к бомбардировке ускоряющего электрода электронами, и быстрыми нейтралами, рожденными при обдирке.

Существуют три основные проблемы на пути к длительной генерации отрицательных ионов на JT-60U: срок службы накаливаемого катода, контроль температуры плазменного электрода и однородность пучка. Срок службы накаливаемого катода определяется дугообразованием, испарением и распылением тяжелыми частицами, например, цезием.

Неоднородность плазмы из-за $E \times B$ дрейфа приводит к неоднородности эмиссии пучка ОИ и увеличивает его оседание на ускоряющих электродах. Поэтому, для обеспечения более однородной эмиссии и уменьшения тепловой нагрузки на ускоряющий электрод было предложено использовать магнитный фильтр зонтикового типа [18], который обеспечивает замкнутый дрейф электронов.

1.2.2. ВЧ источники ОИ для инжектора нейтралов ИТЭР

Инжекция нейтралов в ИТЭР будет состоять из двух идентичных систем, каждая из которых оборудована источником ОИ с областью вытягивания

1,9x0,9 м² с генерацией 40 А пучка ОИ, соответствующего мощности нейтральной инжекции 16,5 МВт. ВЧ источники ОИ, разрабатываемые в ИРР, были выбраны как основа источника ИТЭР [14].

Как было сказано выше, инжекторы нейтралов, на основе источников ОИ уже эффективно применяются на установках по магнитному удержанию плазмы LHD и JT-60U. Однако, для достижения параметров работы, требуемых для инжектора ИТЭР необходимы дальнейшие исследования: нужно увеличить энергию пучка до 1 МэВ, а ток D⁻ до 40 А, при длительности импульса до 1 ч. Еще одним важным параметром при конструировании источника для ИТЭР было то, что источник должен иметь как можно меньше заменяемых деталей. Источники с накаливаемыми катодами требуют регулярной замены катодов, распыление которых приводит к запылению цезиевого покрытия, что увеличивает расход цезия. Поэтому, для создания плазмы в источнике планируется использовать разряд с внешней ВЧ антенной. Для создания необходимой плазмы планируется использовать 4 ВЧ генератора плазмы с суммарной мощностью 800 кВт, работающих на частоте 1 МГц.

Проектируемая плотность тока эмиссии H⁻ составляет 285 А/м² в течение 3600 с, и 330 А/м² в течение 1000 с, при этом общая площадь 1280 эмиссионных апертур составит 0,2 м², а площадь плазменного электрода составит 2 м². Для удовлетворительной обдирки ОИ необходимо, чтобы источник работал при низком давлении водорода 0,3 Па. Также необходимо, чтобы ток сопутствующих электронов не превышал ток вытягиваемых ОИ.

Вследствие того, что эти параметры не были получены одновременно, для разработки источника ОИ для ИТЭР создаётся семейство прототипов. Для исследования генерации ОИ и формирования пучка созданы BATMAN и ELISE. Размеры BATMAN 59 x 32 см², что меньше размеров источников на действующих инжекторах. Размер ELISE сравнимы с источниками для инжекторов JT-60U, LHD и планируемого для ИТЭР.

Прототип источника для ИТЭР – BATMAN. Источник BATMAN создан для исследования вытягивания пучка с достаточно большой площадью

плазменного электрода [9]. Площадь его плазменного электрода составляет примерно 1/8 площади источника ИТЭР, при этом используется всего 1 ВЧ драйвер вместо 8.

Плазма создаётся в цилиндрическом ВЧ драйвере при помощи внешней ВЧ антенны с частотой 1 МГц и максимальной мощностью 120 кВт. Затем плазма попадает в прямоугольную расширительную камеру. Поле магнитного фильтра уменьшает температуру электронов с ~ 10 эВ вблизи ВЧ драйвера, до ~ 1 эВ вблизи плазменного электрода. Для подачи цезия на торец расширительной камеры, примыкающей к ВЧ драйверу, установлена цезиевая печь. Пучок вытягивается трех-электродной ИОС и ускоряется до полной энергии 25 кэВ. Для облегчения перераспределения цезия на плазменном электроде стенки расширительной камеры и плазменного электрода нагреваются плазмой до температуры 35 °С и 150 °С соответственно.

Полученная плотность тока ОИ при площади вытягивания 60 - 70 см² и длительности импульса 2 с составляет 33 мА/см² для Н⁻ и 23 мА/см² для D⁻ при давлении водорода в источнике 0.3 Па.

Прототип источника для ИТЭР – ELISE. Для исследования параметров работы источника с площадью плазменного электрода, сравнимой с площадью плазменного электрода источника для инжектора ИТЭР, создан источник ELISE [19]. Площадь его плазменного электрода составляет примерно половину площади источника ИТЭР, при этом для того, чтобы обеспечить необходимый поток частиц, для создания плазмы используется 4 ВЧ драйвера. Кроме того, источник ELISE спроектирован для ускорения пучка ОИ до энергии 60 кэВ.

Цель ELISE - продемонстрировать, что большие ВЧ источники (с площадью плазменного электрода ~ 1 м² при мощности ВЧ 360 кВт) могут получить параметры, необходимые для ИТЭР: плотность тока, низкий ток сопутствующих электронов, работа при давлении водорода в источнике 0,3 Па. Одной из основных задач ELISE является показать однородность образования и вытягивания ОИ в ВЧ источнике с большой площадью плазменного электрода и подачей цезия [20]. С этой целью исследовалась однородность его подачи. Также исследовалась

необходимая сила магнитного фильтра, динамика и асимметрия тока сопутствующих электронов.

На источнике была получена плазма 80 кВт в течение 3600 с. Пучок вытягивался импульсами длительностью 10 с при паузах 150 с. При работе на высокой мощности, вкладываемой в плазму (220 кВт), длительность плазменного импульса составляла 20 с, а длительность вытягивания 10 с [10].

Для облегчения перераспределения цезия и обеспечения воспроизводимости эксперимента стенки расширительной камеры и плазменный электрод нагреваются до 35°C и 125°C соответственно. Для подачи цезия на конец расширительной камеры, примыкающий к ВЧ драйверу, установлено 2 цезиевые печи [21]. Поле магнитного фильтра изменялось за счет пропускания тока через плазменный электрод, что позволяло изменить его величину, не изменяя его топологию. Было показано, что увеличение поля магнитного фильтра до 0,15-0,25 мТ·м приводит к уменьшению тока сопутствующих электронов, однако слишком высокое магнитное поле приводит к уменьшению тока пучка ОИ. Оптимальное поле магнитного фильтра зависит от потенциала, прикладываемого к плазменному электроду [20].

Как показано в таблице 1.2 на источнике ELISE получен пучок с током 18,3 А (18,5 мА/см²), энергией 36 кэВ и длительностью импульса пучка 10 секунд. В настоящее время работы по достижению проектных параметров прототипа продолжаются, причем основными проблемами используемых прототипов являются ВВ прочность источника и увеличение длительности импульсов. Следующим шагом будет создание прототипа источника SPIDER с площадью плазменного электрода как у источника для инжектора ИТЭР [22].

1.3 Инжектор высокоэнергетичных нейтралов, разрабатываемый в ИЯФ

В 2009 году в институте ядерной физики был предложен детальный план сооружения высоковольтного (с энергией пучка 0,5-1 МэВ) инжектора атомов для

использования на установке с магнитным удержанием плазмы для УТС [23]. Схема инжектора показана на рисунке 1.1. Инжектор включает в себя ионный источник, ускоритель, нейтрализатор, сепаратор и рекуператоры.

Согласно выбранной схеме пучок ОИ от ВЧ источника ионов ускоряется до энергии 120 кВ и транспортируется через секцию с поворотными магнитами, находящуюся под потенциалом -880 кВ относительно земли. Проходя через эту секцию пучок смещается с оси источника и фокусируется на вход одноапертурного ускорителя, который осуществляет дальнейшее ускорение пучка до энергии 0,5-1 МэВ. Ускоренный пучок ОИ в камере нейтрализатора конвертируется в пучок высокоэнергетичных нейтралов. Образовавшийся пучок нейтралов в камере сепаратора отделяется от сопутствующих пучков положительных и отрицательных ионов и выводится на мишень, тогда как сопутствующие пучки положительных и отрицательных ионов после сепарации направляются на рекуператоры энергии. В рамках программы по созданию инжектора высокоэнергетичных атомов в институте ИЯФ ведутся работы по всем перечисленным этапам получения, ускорения и нейтрализации пучков ОИ.

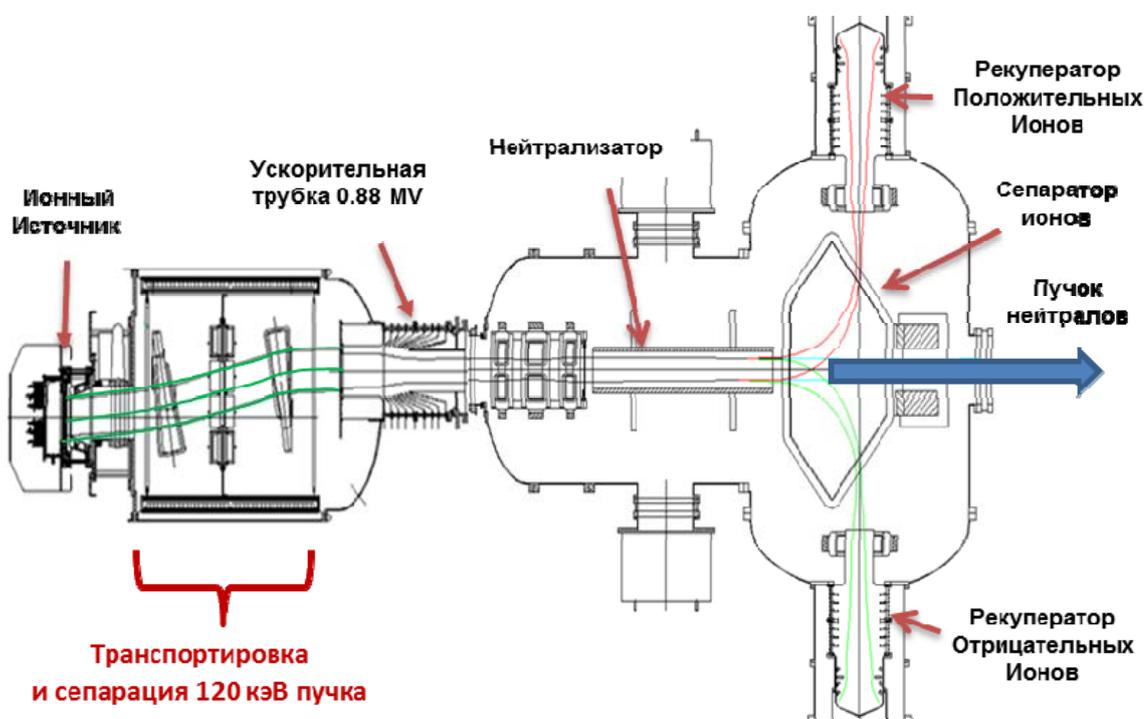


Рисунок 1.1. Схема высоковольтного инжектора ИЯФ с ускорением отрицательных ионов.

В 2014 году был создан экспериментальный стенд для разработки и исследования ВЧ источников ОИ, показанный на рисунке 1.2. Стенд состоит из вакуумного бака диаметром 2,1 м и длиной 3,1 м с откачкой двумя крионасосами и двух поворотных магнитов, используемых для параллельного сдвига пучка ОИ от оси источника на ось ускорителя.

Для диагностики пучка в баке установлен передвижной коллектор типа цилиндра Фарадея, а на выходном фланце закреплен калориметр пучка. Вакуумная секция с поворотными магнитами, осуществляющая сдвиг осей источника и ускорителя, необходима для очистки пучка ионов перед его инжекцией от первичных частиц, выходящих из источника и от вторичных частиц, образующихся в процессе формирования пучка. Смещение осей источника и ускорителя защищает ионный источник от встречного потока положительных ионов из ускорителя. Интенсивная откачка вакуумного бака крионасосами способствует уменьшению обдирки ОИ, а также уменьшает образование и размножение вторичных частиц в области транспортировки пучка и в ускорителе.

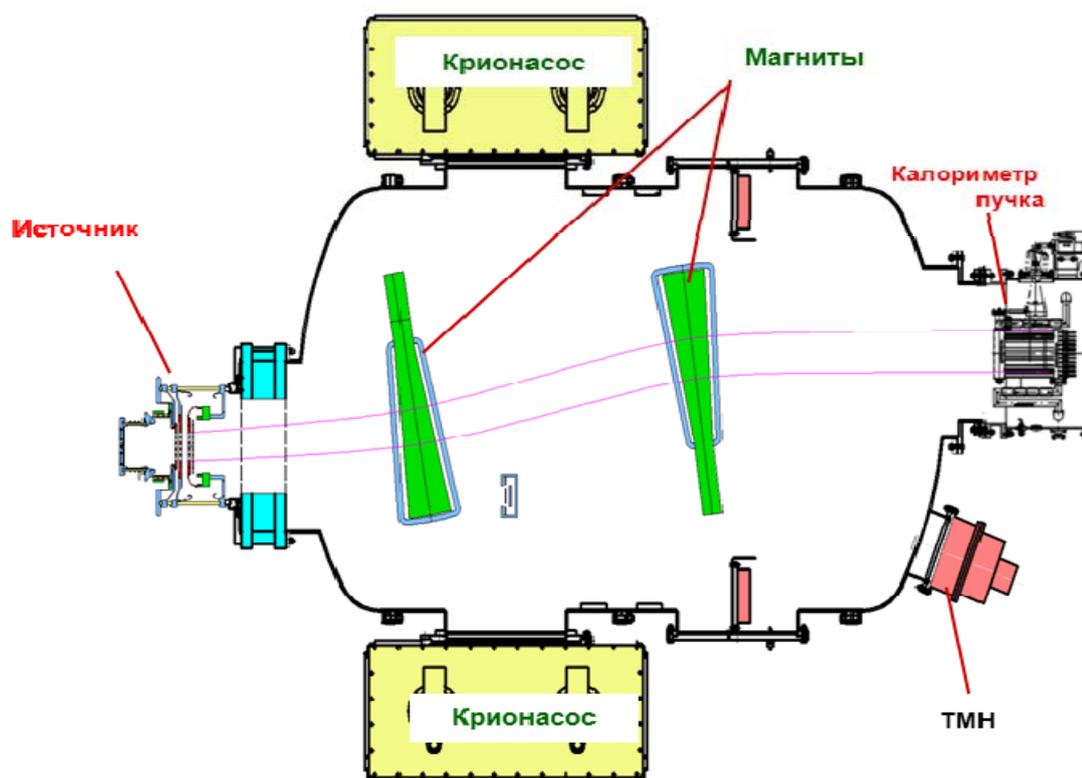


Рисунок 1.2. Схема экспериментального стенда для получения и транспортировки интенсивных пучков ОИ.

Полномасштабный источник с током до 9 А энергией до 120 кэВ и длительностью до 100 с будет создан с учетом опыта, полученного на экспериментальном стенде прототипа источника. После успешных испытаний на стенде и внесения необходимых изменений в конструкцию источник будет установлен в 5 МВт инжектор высокоэнергетичных атомов.

Глава 2. ВЧ источник отрицательных ионов для инжектора высокоэнергетичных нейтралов ИЯФ

В главе 2 описываются работы по созданию и исследованию сильноточного источника ОИ для инжектора высокоэнергетичных нейтралов, разрабатываемого в ИЯФ. В разделе 2.1 рассмотрены методы получения интенсивных пучков ОИ и сформулированы требования к источникам ионов для инжекторов УТС. В разделе 2.2 описываются конструкция и характеристики созданного в ИЯФ высокочастотного поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов. В разделе 2.3 проанализировано влияние новых элементов, введенных в конструкцию ВЧ источника и их соответствие требованиям, предъявляемым к источникам ионов для инжекторов УТС.

2.1 Методы получения сильноточных пучков отрицательных ионов

Для изложенных в главе 1 применений отрицательных ионов водорода разработано множество источников отрицательных ионов. Ионный источник - это устройство для получения ионного пучка, пространственно сформированного потока ионов скорость направленного движения которых много больше их тепловых скоростей [24]. Ионный источник состоит из эмиттера ионов и ионно-оптической системы для их экстракции. Атомы ускоряемых элементов могут вводиться в ионный источник либо напуском в виде газа, либо испарением жидкой или твердой примеси. В источнике они ионизируются и вытягиваются в ускоряющий зазор, где приобретают нужную энергию. ИОС источников ионов, как правило, используют классическую четырехэлектродную схему, состоящую из плазменного, вытягивающего, ускоряющего и запирающего электродов. Плазменный электрод ограничивает плазму, вытягивающий электрод служит для вытягивания ионов из плазмы при оптимальном для угловой расходимости положении плазменной границы. Для перехвата совместно вытягиваемых

электронов до ускорения до полной энергии вытягивающем электроде изготовлен специальный карман. Ускоряющий электрод используется для ускорения пучка до полной энергии. На четвертый электрод подано положительное смещение относительно потенциала земли для предотвращения вытягивания положительных ионов из вторичной плазмы области транспортировки пучка в источник.

Процесс вытягивания ионов из плазмы связан в основном с приложением высокого напряжения между эмиттером ионов и вытягивающим электродом. На траектории ускоряемых ионов, которые непосредственно определяют качество пучка, влияет несколько факторов, в том числе напряженность поля в вытягивающем зазоре, форма эмитирующей поверхности [25], плотность пространственного заряда пучка. Эмитирующая поверхность может быть твердой (источники с поверхностной ионизацией) или подвижной (плазменные и поверхностно-плазменные источники). В случае плазменных источников эмитирующая поверхность действует как пограничный слой между плазмой разряда и ускоренными частицами пучка. Из-за того что граница плазмы изменяет своё положение и кривизну поверхности при изменении концентрации плазмы или напряжённости вытягивающего электрического поля, необходимо, чтобы параметры газоразрядной плазмы (концентрация ионов и температуры) были согласованы с характеристиками ионно-оптической системы — геометрией электродов и напряжённостью электрического поля.

Отметим, что в основу ионно-оптической системы сильноточных ионных источников положен единый для всех типов источников принцип - создание многоапертурной электростатической системы, в каждом электроде которой содержится большое количество идентичных апертур круглой или щелевой формы. Форма и напряжения на электродах ИОС выбираются для получения пучка с минимальной угловой расходимостью.

2.1.1 Методы получения отрицательных ионов

Источники отрицательных ионов можно разделить на 4 основные группы: плазменные источники (с генерацией ОИ в объеме плазмы), перезарядные, поверхностные (термоэмиссионные и с неравновесной кинетической эмиссией), поверхностно-плазменные источники [26].

Плазменный (объемный) метод. Плазменные ионные источники широко используются для создания интенсивных пучков положительных и отрицательных ионов [27]. Эмиттером ионов служит плазма, создаваемая, как правило, дуговым разрядом низкого давления в газоразрядной камере. Для лучшего удержания ионов и быстрых электронов в объёме разряда используется периферийное магнитное поле, что повышает одновременно энергетическую и газовую эффективности ионного источника [28].

Сечения образования ОИ водорода в объеме газоразрядной плазмы (при энергии 1-100 эВ) на 4-5 порядков ниже, чем сечение их разрушения. Поэтому в объемных источниках ОИ вытягиваются в основном с периферии плазмы.

В основе объемно-плазменного источника лежит создание газоразрядной плазмы с высокой концентрацией ОИ. Основную роль в образовании ОИ играют два процесса: возбуждение молекул водорода на высшие колебательные уровни (2.1) и последующее диссоциативное присоединение электрона к колебательно возбуждённой молекуле (2.2).



Колебательное возбуждение молекул H_2 электронами с энергией >15 эВ увеличивает вероятность образования ОИ. Однако эти высокоэнергетичные электроны приводят к усилению разрушения образованных ОИ электронным ударом ($\sigma \sim 6 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ при $T_e \sim 15$ эВ).

Для уменьшения обдирки ОИ в плазме используется тандемный принцип. Объем плазмы делится на 2 области: с горячими электронами $T_e \sim 15$ эВ для возбуждения H_2 и область с холодными электронами $T_e \sim 2$ эВ ($\sigma \sim 6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ при $T_e \sim 2$ эВ) для образования ОИ из возбужденных H_2 . Для разделения областей

используется поперечное градиенту температур магнитное поле – магнитный фильтр [18]. Принцип работы магнитного фильтра заключается в том, что электроны в поперечном поле движутся по ларморовским окружностям с радиусом меньше размера магнитного фильтра. Диффузия электронов через магнитное поле осуществляется в основном с помощью кулоновского рассеяния. Сечение рассеяния $\sigma \propto E^{-2}$, поэтому в эмиссионную область разряда попадают в основном холодные электроны.

Перезарядный метод. Для генерации пучков ОИ применяют также метод двойной перезарядки. В нём пучки отрицательных ионов получают при проведении сформированных пучков положительных ионов низкой энергии через мишени из паров щелочных металлов (Na, Cs) [29]. Эффективность выхода ОИ водорода составляет от 10 % до 30 % в зависимости от выбора паров металла и энергии первичного пучка. Использование ионных источников позволяет получать пучки ОИ в несколько ампер.

Поверхностно-плазменный метод. Один из способов получения ионов основан на процессах ионной эмиссии - испускание свободных положительных или ОИ поверхностью твёрдого тела в вакуум, газообразную среду или плазму. Эмиссия ОИ - явление захвата электрона (с уровня ферми металла) атомом [30].

Различают два процесса эмиссии ионов: термоионная эмиссия – когда энергия атома $\ll 1$ эВ или кинетическая эмиссия – когда энергия атома ≥ 1 эВ. Термоэмиссия ОИ эффективна когда сродство иона к электрону больше работы выхода металла, так как в этом случае электрону энергетически выгодно перейти с уровня ферми металла в связанное состояние иона. В случае, когда сродство к электрону меньше работы выхода металла, у электрона нет энергии, чтобы попасть в связанное состояние и образовать ОИ. Образование ОИ в этом случае возможно за счет процесса кинетической эмиссии, когда кинетическая энергия иона достаточна, чтобы он мог преодолеть потенциал, препятствующий уходу электрона с поверхности.

Термоэмиссия ионов происходит в результате испарения частиц, находящихся на поверхности металла (в том числе примесей). Адсорбированные

на поверхности атомы приходят к термическому равновесию с металлом. Ширина потенциального барьера на границе металл-атом конечного размера, электроны металла и атома за счет туннельного эффекта могут преодолевать его. Таким образом, атом может захватить электрон на уровень электронного сродства. При удалении атома от поверхности ширина потенциального барьера увеличивается, обмен электронами между металлом и атомом затрудняется. Электрон может локализоваться на уровне сродства к электрону, образовать свободный ОИ. Если энергия электронного сродства иона S меньше чем работа выхода из материала ϕ , то у ОИ энергия десорбции на величину $(S-\phi)$ меньше, чем у атома, так как электрон из металла опускается на уровень сродства. Количественной характеристикой термоионной эмиссии является степень ионизации α , равная отношению числа слетающих ионов к числу нейтральных частиц, слетающих с поверхности в единицу времени. В приближении термодинамического равновесия степень ионизации описывается формулой Саха-Ленгмюра (2.3) [31].

$$\alpha = \frac{I^-}{I_0} = \frac{g^-}{g_0} \exp\left[-\frac{e \cdot (\phi - S)}{kT}\right] \quad (2.3)$$

где g^- - статистический вес ионного состояния, g_0 – статистический вес атомного состояния адсорбированного атома, e – заряд иона, k – постоянная Больцмана, T – температура поверхности.

Процесс кинетической эмиссии ОИ позволяет получить отрицательные ионы с энергией сродства электрона меньше, чем работой выхода электрода [32]. В этом случае ОИ преодолевает дополнительный поверхностный барьер $\phi-S$ за счет своей кинетической энергии. При кинетической эмиссии ОИ-атом проходит три характерных положения: атом-ион вблизи поверхности, атом-ион в конце критической зоны и свободный ОИ вдали от электрода.

Вблизи поверхности атом захватывает электрон. Чтобы успеть захватить электрон, атом должен пройти ближнюю зону за время, сравнимое со временем электронного обмена. Чтобы сохранить электрон ион должен быстро пройти за критическую зону, где обмен электронами прекращается. Для эмиссии ион

должен иметь кинетическую энергию больше чем $\phi - S$ ($\sim 0,75$ эВ для отрицательного иона водорода).

Степень отрицательной ионизации α^- - произведение вероятностей захвата вблизи поверхности P_{0-} и вероятности не потерять электрон P_{-0} при удалении от поверхности (2.4) [33].

$$\alpha^- = P_{0-}(1 - P_{-0}) \propto \frac{1}{v_{\perp}} \exp\left(-\frac{\phi - S}{\delta \cdot v_{\perp}}\right) \quad (2.4)$$

Таким образом, для получения пучков ОИ водорода с генерацией ОИ на поверхности необходимо применять электроды с малой работой выхода. Работа выхода превышает энергию электронного средства водорода. Поэтому, для создания сильноточных пучков отрицательных ионов используют кинетический механизм эмиссии. Как правило, для конструирования плазменного электрода источников используют Mo, W, Cu, различную бронзу. ОИ получают при бомбардировке быстрыми частицами плазмы поверхности, покрытой цезием [34].

Нанесение атомов щелочных металлов (цезия, бария) на поверхности металлических электродов приводит к уменьшению работы выхода и усилению генерации ОИ. Следует отметить, что наименьшая работа выхода поверхности определяется не чистым цезиевым слоем. Наиболее низкая работа выхода достигается при частичном покрытии металлической подложки (менее 1 монослоя) за счет дипольного взаимодействия атомов цезия с атомами металла. Напыление цезия на Mo, W, Cu, Fe уменьшает работу выхода до $\phi \sim 1,5$ эВ [35].

При низких значениях степени заполнения θ (вычисляемой в монослоях) весь адсорбированный цезий на поверхности находится в виде ионов. При увеличении степени заполнения тип связи изменяется и с некоторого определенного значения θ весь цезий оказывается адсорбированным в виде атомов. Под влиянием поля металла происходит поляризация этих атомов. Поле, образованного дипольного слоя приводит к понижению потенциального барьера, удерживающего электроны, уменьшая работу выхода. С увеличением заполнения дипольные моменты адсорбированных атомов уменьшаются вследствие взаимной поляризации. Когда уменьшение дипольного момента, приходящееся на один

атом, уже не компенсируется увеличением числа диполей на единицу поверхности, наблюдается минимум работы выхода. При оптимальном покрытии $\theta \sim 0,7$ монослоя ($\sim 2 \cdot 10^{14}$ атомов/см², что соответствует $\sim 0,5 \cdot 10^{-8}$ г/см² цезия) работа выхода минимальна $\phi \sim 1,5$ эВ. При увеличении заполнения выше оптимального уменьшение дипольного момента приводит к росту работы выхода до $\phi \sim 2,1$ эВ. При $\theta > 1$ ϕ не зависит от материала подложки [35].

Высокая энергия десорбции $H = 1,5$ эВ атомов цезия из слоев с $\theta < 1$ позволяет получить устойчивое субмонослойное цезиевое покрытие. Из-за высокого десорбционного потока цезия рост многослойного покрытия подложки не происходит при температурах выше 20°C и низком давлении паров цезия.

Итак, для получения ОИ с малым сродством к электрону S путем кинетической эмиссии необходимо создать поток высокоэнергетичных (энергией $K > 2$ эВ) первичных частиц с поверхности электрода с малой работой выхода. Существует два способа получения первичных высокоэнергетичных частиц: за счет распылительного метода (распылительный источник) и за счет плазменного метода (поверхностно-плазменный источник).

Распылительный источник использует распыление первичных частиц на поверхности электрода ускоренным пучком тяжелых ионов, бомбардирующим электрод. Он может быть использован для получения пучков ОИ практически любых элементов. В источнике распылительного типа отсутствует газовый разряд, что позволяет исключить канал потерь ОИ за счет обдирки их внутри плазмы. Из-за отсутствия газового напуска, рабочее давление в таких источниках может поддерживаться на уровне 10^{-5} Па. Ток пучка тяжелых положительных ионов на эмиссионный электрод ограничен пространственным зарядом (закон Чайлда-Ленгмюра), поэтому извлекаемый ток ОИ ограничен. В существующих источниках отрицательных ионов углерода C^- он достигает порядка 1 мА/см² [36].

Поверхностно-плазменный источник основан на использовании быстрых частиц плазмы, создаваемой вблизи электрода. Быстрые частицы плазмы (положительные ионы и нейтралы) бомбардируют электрод и создают два потока частиц с электрода: поток распыленных частиц с поверхности электрода и поток

отраженных частиц. Компенсация заряда положительных ионов, бомбардирующих электрод, электронами плазмы приводит к тому, что ток положительных ионов на электрод не ограничен. Закон Чайлда-Ленгмюра в этом случае определяет размер зоны пристеночной области нескомпенсированного заряда. Ток пучка отрицательных ионов водорода при использовании поверхностно-плазменного метода может достигать порядка 8 А/см^2 [37].

2.1.2 Типы разрядов в поверхностно-плазменных источниках ОИ

Для создания плазмы в поверхностно-плазменных источниках используют водородно-цезиевые разряды. Цезий подается от внешнего испарителя через отверстия или поры на поверхность эмиттера. Важную роль на параметры плазмы таких разрядов оказывают неравновесные поверхностные процессы: усиленная эмиссия электронов, образование ОИ, распыление электродов разряда цезием. Вблизи поверхности электрода создается слой плотной плазмы. Между плазмой и электродом прикладывается напряжение в несколько десятков вольт, которое ускоряет положительные ионы плазмы и обеспечивает интенсивную бомбардировку поверхности электрода. В приповерхностном слое электрода создается динамически поддерживаемая структура внедренных и адсорбированных атомов. Такой электрод эффективно конвертирует поток налетающих ионов в обратный поток быстрых отраженных и распыленных из слоя частиц.

Преимущества поверхностно-плазменного механизма интенсивной генерации ОИ в разрядах с пониженной работой выхода электродов привело к интенсивным исследованиям плазменных разрядов подходящих для создания интенсивных потоков частиц на электрод [15].

Общим для всех источников с низкотемпературной плазмой является то, что для эффективной ионизации плотность электронов должна быть достаточно высокой, чтобы могло происходить множество столкновений электронов с атомами. Температура электронной компоненты не должна быть чрезмерно высокой, так как сечение ионизации при превышении некоторого порога

уменьшается с дальнейшим ростом энергии. Необходимо эффективно задействовать повторное использование электронов, а не выбивание новых из нейтральных атомов с последующим их нагревом. В плазме существуют горячие электроны, которые осуществляют ионизацию, и вторичные холодные электроны, образующиеся наряду с положительными ионами. Сохранить первичные горячие электроны можно следующими способами:

1. за счет удержания аксиальным магнитным полем, при этом вдоль поля электроны удерживаются отражением от отрицательно заряженных электродов;
2. за счет использования периферийного мультипольного магнитного поля, формирующего магнитный барьер, окружающий плазменный разряд;
3. за счет использования магнитных зеркал [38].

Для создания плазмы в поверхностно-плазменных источниках отрицательных ионов используют сильноточные ВЧ, СВЧ, дуговые разряды и разряды в магнитном поле (с пеннинговской и магнетронной геометрией электродов), работающие при пониженном (0.3 - 5 Па) давлении водорода в газоразрядной камере источника.

Эмиттером ОИ в таких газоразрядных системах могут выступать катод, анод или конвертер с независимо регулируемым потенциалом, вводимый в газоразрядную плазму. Генерация ОИ на катоде применяется в импульсных источниках (с длительностью ~ 1 мс) для ускорителей. Анодная генерация ОИ применяется в импульсных и стационарных источниках для ускорителей и для инжекторов нейтралов для управляемого термоядерного синтеза. Для уменьшения тока электронов, вытягиваемых из плазмы, вытягивание пучка производится в направлении перпендикулярном направлению магнитного поля.

Разряды с магнетронной геометрией электродов. Магнетронная геометрия разряда является эффективным способом получения плазмы для осуществления поверхностно-плазменного метода получения ОИ водорода на катоде разряда. Основным источником электронов в магнетроном разряде является вторичная электронная эмиссия на поверхности катода. Электроны

осциллируют в магнитном поле между двумя торцевыми пластинами катода. ЕхВ дрейф приводит к замкнутому движению электронов вокруг центральной пластины катода разряда, позволяя работать при низких давлениях водорода в газоразрядной камере и напряжении разряда ~ 100 В. Поток положительных ионов H^+ , H_2^+ , H_3^+ и Cs^+ ускоряется в прикатодном слое к поверхности катода. Отраженные частицы летят от катода с энергиями от нулевой до полной. Часть атомарного водорода уходит с поверхности в виде ОИ, которые ускоряются прикатодным падением потенциала, проходят через плазму разряда и через эмиссионное отверстие попадают в ИОС, где формируется пучок.

За счет создания сферической лунки на катоде можно обеспечить сбор ОИ с площади заметно большей, чем площадь эмиссионного отверстия. Часть ОИ проходя через плазму участвуют в резонансной перезарядке на атомарном водороде, что приводит к формированию второй группы ОИ (с тепловой энергией) на выходе из источника. Движение электронов к эмиссионному отверстию затруднено поперечным магнитным полем. Таким образом, плазма вблизи эмиссионного отверстия состоит в основном из положительных и отрицательных ионов, поэтому поток электронов из источника снижен.

Разряды с пеннинговской геометрией электродов. Источники с пеннинговской геометрией разряда используют генерацию на поверхности анода. Источником электронов в разряде является вторичная эмиссия на катоде. Магнитное поле препятствует прямому пролёту электронов от катода к аноду. Электроны, рождаемые на поверхности катода, осциллируют между катодом и антикатодом и постепенно дрейфуют на анодное кольцо. ОИ образуются на катоде и аноде разряда, за счет кинетической эмиссии из быстрых нейтральных атомов.

В отличие от магнетронного источника, в пеннинговском источнике ОИ, образующиеся на катоде, непосредственного вклада в пучок не дают. В пучок собираются ОИ, образующиеся вблизи эмиссионного отверстия. Также в пучок собираются ОИ, которые образуются в объеме плазмы за счет резонансной

перезарядки с энергетичными атомами водорода отрицательных ионов, образованных на катоде и аноде.

Разряды с периферийным мультипольным магнитным полем.

Поверхностные процессы являются ключевыми для плазмы в источниках с пеннинговской и магнетронной геометриями разряда. Интенсивная бомбардировка катода быстрыми ионами разряда необходима для стабильной работы разряда. Это обстоятельство усложняет поддержание стабильного цезиевого покрытия на катоде в длинных импульсах из-за его распыления высокоэнергетичными ~ 100 эВ ионами плазмы. В случае магнетронной геометрии это может приводить к снижению эффективности генерации ОИ [39]. При работе в источниках с большим объемом разряда перенос цезия, облегчающего вторично-электронную эмиссию на катоде источника, может приводить к усилению неоднородности плазмы в источнике. Распыление катода ионами плазмы приводит к переносу материала катода (обычно молибдена) на анод источника и приводит к запылению цезиевого покрытия на аноде, что усложняет поддержание однородного цезиевого покрытия. Для ослабления роли электродных процессов в генерации ОИ применяют удержание плазмы в периферейном мультипольном магнитном поле.

Из-за того, что ионы получают конверсией ионов и атомов водорода на поверхности плазменного электрода, для получения мощных пучков ОИ необходим большой поток положительных ионов и атомов на плазменный электрод-эмиттер, что обуславливает необходимость высокой эффективности удержания плазмы в источнике ОИ. Количество протонов в разряде увеличивается с длительностью электронного удержания, которое определяется отношением объема плазмы к площади потерь электронов на стенки камеры вдоль линий магнитного поля. Поэтому, для получения ОИ следует использовать большие камеры с мощным мультипольным удержанием плазмы. С одной стороны, для эффективной ионизации электроны должны иметь энергию $>13,6$ эВ. С другой стороны, ОИ легко разрушаются при столкновении с электронами с энергией 2 эВ. Поэтому, для уменьшения разрушения ОИ вблизи

плазменного электрода перед ним создаётся более сильное поперечное магнитное поле, чтобы предотвратить попадание высокоэнергетических электронов в область извлечения и уменьшить электронную температуру до ~ 1 эВ. Источником плазмы в этом случае могут выступать разряд с накаливаемым катодом и индукционный ВЧ разряд.

Эмиссия электронов в разрядах с накаливаемым катодом происходит за счет термоэмиссии. Материал катода разогревается до температуры, когда из-за высокой тепловой энергии электроны легко преодолевают потенциальный барьер по выходу из материала катода. Электроны ускоряются с поверхности катода в источник, ионизуют газ и создают плазму. ОИ образуются на поверхности анода за счет поверхностно-плазменного механизма. Накаливаемые вольфрамовые нити используются в качестве катодов с током порядка 1 кА, при температуре нитей $1700\div 2700$ °С. Дуговые источники с накаливаемыми катодами надежны и использовались с момента разработки первых систем нейтральной инжекции. Тем не менее, эти источники имеют серьезные недостатки. Вольфрам непрерывно испаряется во время работы, что ограничивает срок службы катодов. Распыление вольфрама также загрязняет внутренние стенки источника запывая цезиевое покрытие, необходимое для получения ОИ [40].

Индукционный ВЧ разряд - это разряд, возбуждаемый током, текущим по индуктору, расположенному на боковой или торцевой поверхности цилиндрического источника плазмы. Индукционный разряд вызывается и поддерживается вихревым электрическим полем, которое создается переменным магнитным полем. Плазма индукционных ВЧ разрядов заряжена положительно относительно стенок газоразрядной камеры, положительные ионы ускоряются к электроду, контактирующему с плазмой. ОИ образуются на поверхности электрода за счет конверсии быстрых франк-кондоновских атомов и положительных ионов плазмы, а также за счет объемного механизма, описанного выше.

Перспективным направлением является удержание плазмы с использованием прямой осесимметричной ловушки простой пробочной конфигурации. Ввод СВЧ

излучения осуществлялся квазиоптическим способом через кварцевое окно [41]. Конфигурация магнитного поля служит как для обеспечения ЭЦР, т. е. перекачки энергии микроволн в энергию электронов, так и для удержания сформированных энергичных электронов [38].

2.1.3 Требования к источникам ионов для инжекторов УТС

Как показано в главе 1, для использования в инжекторе нейтралов для установки УТС, такой как ИТЭР, источник ОИ должен обладать высоким током ~ 48 А, большой энергией ~ 1 МэВ, и длительностью импульса ~ 3600 с. Как показано в разделе 2.1.2, источник с ВЧ плазмой является предпочтительным для получения такого пучка из-за снижения влияния приэлектродных процессов.

При увеличении площади эмиссионной поверхности в 2 раза (для источника ELISE) при сохранении плотности тока эмиссии ОИ порядка 22 мА/см², полученной в коротких импульсах длительностью 4 секунды [10], достижимо необходимое значение тока. Ограничение длительности импульса связано с осаждением пучка ОИ из-за его неоднородности на ускоряющем электроде, находящемся на потенциале ~ 45 кВ относительно плазменного электрода, и сопутствующих электронов вытягиваемых из источника на потенциале вытягивающего электрода ~ 9 кВ.

В инжекторах JT-60U и ИТЭР используются многоапертурные ускорители, примыкающие непосредственно к источнику ОИ. Многоапертурная структура затрудняет удаление сопутствующего газа из пучка и усиливает генерацию вторичных частиц на сопутствующем газе и поверхностях электродов. Кроме того, встречный поток положительных ионов, вытягиваемый из вторичной плазмы [22], образующейся на выходе из ускорителя, попадает в ионный источник и может нарушать его работу.

Результаты, полученные на разработанных прототипах ВЧ источников ОИ для ИТЭР показывают, что необходимые значения совокупности тока, энергии и длительности, пока не были достигнуты.

На основании мирового опыта по исследованию получения высокоэнергетичных интенсивных пучков ОИ были сформулированы требования к источникам ОИ для инжекторов УТС. Для получения высокого тока пучка необходимо использовать поверхностно-плазменный механизм с максимально-возможной плотностью эмиссии ОИ. При этом следует собирать ОИ с большой эмиссионной поверхности, поддерживать высоковольтную прочность ионно-оптической системы при работе с цезием и обеспечивать достаточно низкую нагрузку на электроды ИОС. Для этого необходимо:

1. Создать однородное цезиевое покрытие на эмиттере.
2. Обеспечить интенсивный однородный поток первичных частиц из плазмы на поверхность эмиттера.
3. Предотвратить накопление цезия в рабочих зазорах электродов ИОС. Накопление цезия в рабочих зазорах ИОС приводит к снижению высоковольтной прочности зазоров ИОС. Вынос цезия увеличивается при увеличении площади эмиссионной поверхности, а для увеличения ухода цезия из ИОС необходимо предпринимать специальные меры.
4. Использовать геометрию отклоняющего магнитного поля, препятствующую удержанию, размножению и накоплению электронов в зазорах ИОС.
5. Уменьшить осаждение пучка на кромках электродов, которое в случае источников с большой площадью эмиссии может быть вызвано неоднородностью плотности тока пучка ОИ, вытягиваемого из плазмы.
6. Уменьшить разрушение и оседание пучка, которые приводят к образованию вторичных частиц.
7. Уменьшить ток сопутствующих электронов, вытягиваемых из плазмы.

Итак, для увеличения тока пучка необходимо увеличивать площадь эмиссии ОИ и мощность, вкладываемую в разряд. Это приводит к увеличению потока паразитных частиц (электронов, быстрых атомов, распыленного цезия) в ускоритель и ухудшает его высоковольтную прочность. Увеличение площади эмиссионной поверхности также приводит к различию параметров элементарных струек пучка на входе ионной оптики и увеличивает их оседание на электродах,

что также ухудшает высоковольтную прочность. Тепловая нагрузка на электроды ИОС ограничивает возможную длительность импульса пучка. Сейчас для его удлинения уменьшают мощность ВЧ, вкладываемую в плазму, что приводит к уменьшению тока пучка. Приведенные противоречия были преодолены в источнике ОИ, разрабатываемом в ИЯФ, за счет внедрения новых элементов (см. разделы 2.2 и 2.3).

Таким образом, доказана необходимость и выявлены основные проблемы одновременного достижения совокупности параметров источника: тока, энергии и длительности.

2.2 Конструкция источника ИЯФ

Исследуемый источник с номинальным током 1,5 А - это прототип 9А источника в масштабе 1/4. Целью испытаний источника являлось изучение работы всех основных систем полномасштабного источника. Источник использует классическую схему поверхностно-плазменных источников ОИ с ВЧ генератором плазмы, обеспечивающую вытягивание ОИ с эмиттера большой площади [36, 42]. Принципиальная схема ВЧ источника с током до 1,5 А показана на рисунке 2.1. Его основными элементами являются ВЧ драйвер, расширительная камера, плазменный электрод, являющийся эмиттером ОИ, ионно-оптическая система, магнитная система, система подачи цезия и система термостабилизации электродов.

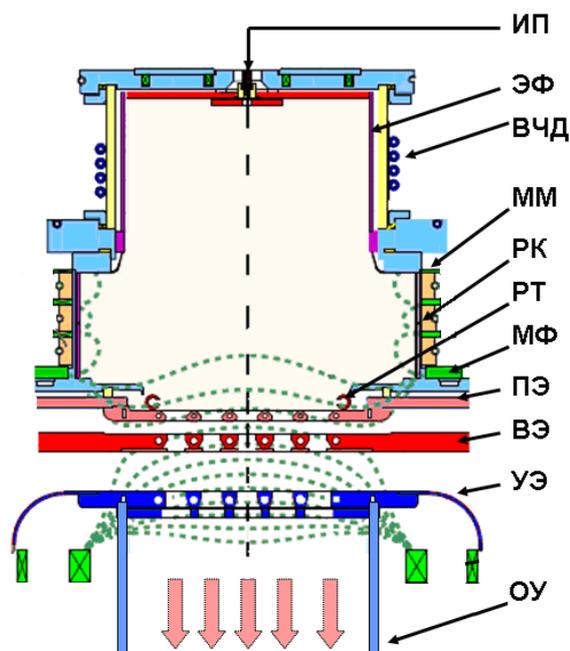


Рисунок 2.1. Принципиальная схема источника: ИП – искровой поджиг, ВЧД – ВЧ драйвер, ЭФ – фарадеевский экран, ММ– постоянные магниты расширительной камеры, РК – расширительная камера, РТ – распределительная трубка подачи цезия, МФ – дипольный магнитный фильтр, ПЭ – плазменный электрод, ВЭ – вытягивающий электрод, УЭ – ускоряющий электрод, ОУ – опора ускоряющего электрода. Линии магнитного поля показаны пунктиром.

2.2.1 ВЧ плазменный драйвер

Высокочастотный плазменный драйвер предназначен для создания плазмы в ионном источнике. Плазма создается в цилиндрической камере драйвера с помощью индукционного ВЧ разряда в водороде. Основной частью высокочастотного драйвера является цилиндрическая керамическая камера: внутренний диаметр 180 мм, высота камеры 100 мм, толщина керамики 6 мм. Газ (водород) подается через клапан с дозатором и узел поджига (на заднем фланце в центре). Поток газа в источник регулируется давлением водорода перед клапаном и размером диафрагмы в клапане. Для защиты керамики драйвера от эрозии плазмой внутри драйвера устанавливался щелевой молибденовый фарадеевский экран.

Для облегчения зажигания ВЧ разряда между электродами поджига прикладывался короткий импульс напряжением 6 кВ, который приводит к пробое

по поверхности изолятора. Высокочастотный разряд возбуждался на частоте 4 МГц при помощи внешней антенны. Антенна изготовлена из медной трубки диаметром 3 мм и имеет 3 витка. На заднем фланце газоразрядной камеры установлен набор постоянных магнитов. Поле этих магнитов увеличивает энергетическую эффективность разряда и снижает поток плазмы на задний фланец.

Механизм поглощения мощности в плазме высокочастотного разряда в общем случае достаточно сложен. В нашем случае в разряде образуется слабоионизованная плазма, в которой проводимость определяется упругими столкновениями электронов с молекулами газа. Разряд возбуждается на частоте $f = \omega/2\pi = 4$ МГц, которая много меньше электронной плазменной частоты (~ 50 МГц).

Размер скин-слоя $\delta_{ан}$, который принято называть аномальным [43], в нашем случае составляет 1 см (в соответствии с 2.5) и меньше длины пробега электронов до столкновения с частицами газа ~ 7 см.

$$\delta_{ан} = \left(\frac{c^2 \cdot V_e}{\omega \cdot \omega_p^2} \right)^{1/3} \quad (2.5)$$

где c – скорость света, V_e – скорость электронов, ω_p – плазменная частота.

Исследование характеристик плазменного эмиттера проводилось на отдельном стенде без формирования пучка ионов. В этом случае на выходе ВЧ драйвера был установлен передвижной сеточный зонд для измерения профиля плотности ионного тока. Профиль плотности тока и эффективность разряда зависели от расположения магнитов, расположенных на торце ВЧ драйвера. На рисунке 2.2 показано распределение плотности ионного тока по радиусу плазменного эмиттера. Как видно из рисунка 2.2, средняя плотность тока по эмиттеру 0,9-1 о.е., а неоднородность в пределах диаметра 130 мм составляет $\pm 15\%$. В этом режиме в разряде поглощается мощность около 20 кВт.

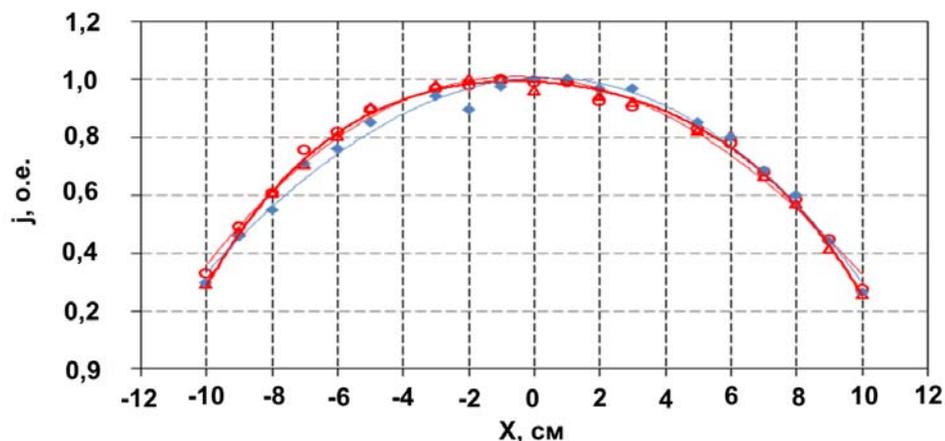


Рисунок 2.2. Нормализованное распределение плотности тока положительных ионов на выходе из ВЧ драйвера для разных конфигураций ЭФ: j – нормализованная плотность тока положительных ионов, X – положение зонда (0 соответствует оси драйвера) [44].

Измерения плотности ионного тока при увеличении поглощаемой в разряде мощности показывают, что плотность тока эмиттера растет линейно с ростом мощности вкладываемой в плазму. Изменения плотности тока положительных ионов на выходе из ВЧ драйвера характеризуют изменение в передаче ВЧ мощности в плазму при установке разных ЭФ драйвера и показаны на рисунке 2.3. Видно, что при увеличении толщины защитного ЭФ для получения требуемой плотности тока положительных ионов на выходе из ВЧ драйвера необходимо прикладывать большее напряжение на антенне.

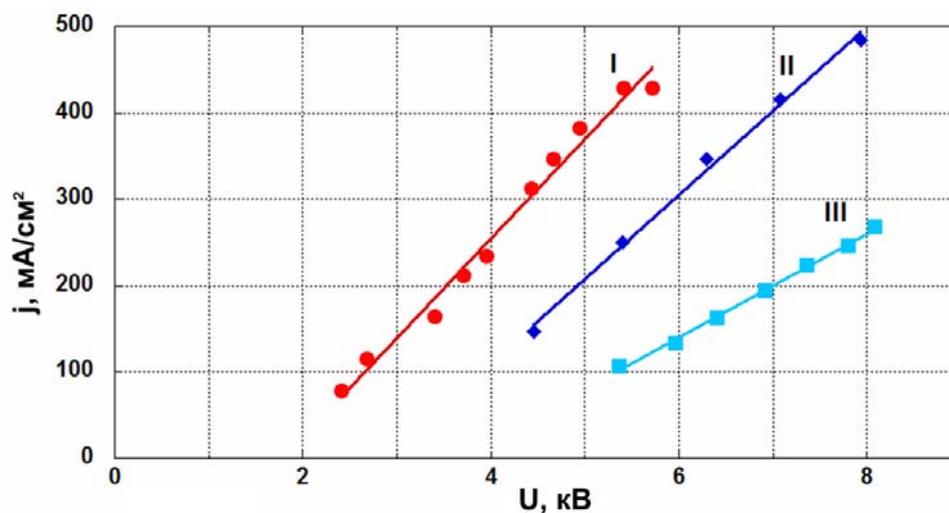


Рисунок 2.3. Зависимость плотности тока положительных ионов на выходе из ВЧ драйвера от напряжения на ВЧ антенне U : круги – конфигурация драйвера без ЭФ, ромбики драйвер с 0,5 мм ЭФ, квадратики – драйвер с 3 мм ЭФ [44].

2.2.2 Расширительная камера и эмиттер ОИ – плазменный электрод

Плазма из драйвера распространяется в расширительную камеру (РК) с периферийным мультипольным магнитным полем, создаваемым постоянными магнитами. ВЧ драйвер должен работать при давлении водорода 0,3-0,5 Па и создавать плазму в расширительной камере с плотностью до 10^{12} см⁻³ при мощности, вкладываемой в плазму 40 кВт. Быстрые частицы (ионы и нейтралы) плазмы ВЧ разряда бомбардируют плазменный электрод, ограничивающий расширительную камеру.

Расширительная камера предназначена для транспортировки плазмы из ВЧ драйвера к поверхности плазменного электрода. При транспортировке к плазменному электроду и расширении плазмы уменьшается поперечная температура ионов. Внешние постоянные NIB магниты (см. рисунок 2.1) обеспечивают удержание электронов. Камера сделана из нержавеющей стали и имеет водяное охлаждение. Чтобы предотвратить накопление цезия на холодных поверхностях расширительной камеры, стенки камеры прикрыты молибденовыми щитками, которые нагреваются ВЧ разрядом.

Схема плазменного электрода с магнитным фильтром представлена на рисунке 2.4. Дипольное поле магнитного фильтра отделяет область драйвера с горячими электронами от области вытягивания около плазменной сетки с холодными электронами. Как видно из рисунка 2.4 магнитное поле в плоскости плазменного электрода однородно и имеет величину 12 ± 1 мТ.

Механизм отсечки электронов высоких энергий поперечным магнитным полем связан с тем, что в случае, когда циклотронная частота больше частоты столкновений электронов, то есть плазма «замагничена», коэффициент диффузии обратно пропорционален корню из температуры и, соответственно, существенно меньше для горячих электронов [18].

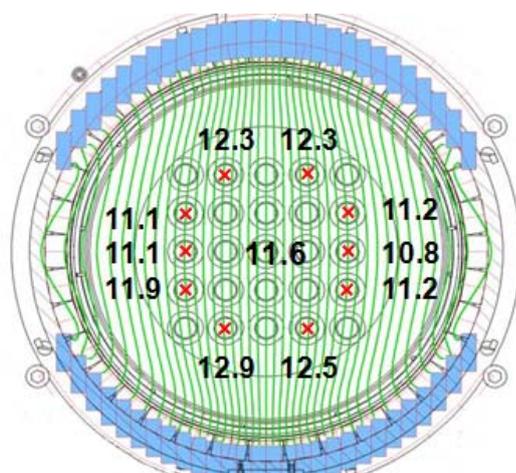


Рисунок 2.4. Схема плазменного электрода источника и поле магнитного фильтра. Поле создается внешними постоянными магнитами показаны голубым. Геометрия магнитного поля [45] показана зелеными линиями. Измеренные значения магнитного поля [мТ] в плоскости плазменного электрода показаны черными цифрами, красными крестиками показаны точки измерений.

2.2.3 Система подачи цезия на плазменный электрод

Плазменный электрод является эмиттером ОИ, которые образуются за счет конверсии быстрых частиц плазмы на его поверхности. Для усиления генерации ОИ на поверхность плазменного электрода подавались пары цезия, которые вводились в источник через распределительно - накопительную трубку при нагреве внешнего контейнера с цезий-содержащими таблетками [46].

Схема системы подачи цезия в источник, показана на рисунке 2.5. Контейнер из нержавеющей стали (1 на рисунке 2.5) с цезий-содержащими таблетками нагревается внешним нагревателем (2 на рисунке 2.5). Затем, в результате экзотермической химической реакции между твердыми компонентами таблеток выделяется металлический цезий и накапливается в нагреваемом контейнере. Подача цезия из контейнера в распределительную трубку регулируется контролем температуры «холодной точки» (ХТ - 3 на рисунке 2.5). ХТ нагревается за счет теплообмена с нагреваемым контейнером, а её контролируемое охлаждение осуществляется с помощью внешнего вентилятора (стрелка на рисунке 2.5). Для предотвращения образования цезиевых пробок в распределительной системе, распределительная трубка из нержавеющей стали нагревается во время подачи цезия до температуры 250°C с помощью внутреннего термокабеля (5 на рисунке

2.5). На источнике сделано 2 линии подачи цезия, которые окружают эмиссионную область плазменного электрода. Использование двух линий подачи цезия позволяет производить увеличенную подачу в область в направлении $E \times B$ дрейфа для обеспечения более однородного цезиевого покрытия. Цезий попадает на плазменный электрод из распределительной трубки через отверстия 0.3 мм, просверленные с шагом 10 мм (6 на рисунке 2.5).

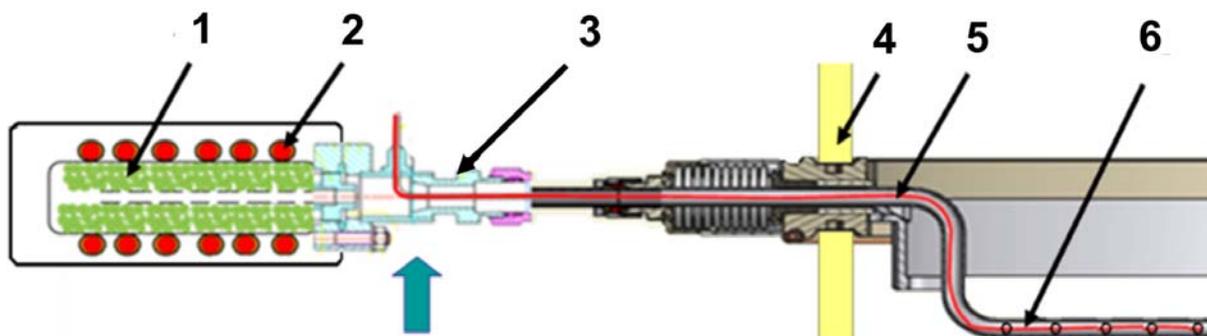


Рисунок 2.5. Схема подачи цезия: 1 - цезиевые таблетки, 2 - нагреватель контейнера, 3 - холодная точка, 4 - граница атмосфера-вакуум, 5 - термокабель для нагрева распределительной трубки, 6 - отверстия для выхода цезия

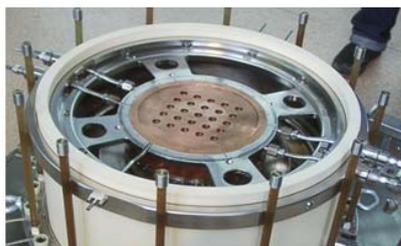
2.2.4 Ионно-оптическая система

Образующиеся на эмиттере ОИ вытягивались и формировались в пучок с помощью трехэлектродной многоапертурной ионно-оптической системы. Для повышения электрической прочности высоковольтных промежутков ИОС в источнике была применена термостабилизация электродов, при которой электроды предварительно нагревались, а в течение рабочего импульса охлаждались горячим теплоносителем. Конфигурация магнитного поля в области ИОС имела форму силовых линий, препятствующую накоплению электронов, так что силовые линии выгнуты в сторону плазменного и вытягивающего электродов [47]. Геометрия силовых линий магнитного поля в центральной плоскости источника вдоль магнитных силовых линий магнитного фильтра показана на рисунке 2.1 пунктирными линиями. Большинство сопутствующих электронов, вытягиваемых совместно с ОИ, отклоняются поперечным магнитным полем, создаваемым в ИОС, и поглощаются на стенках вытягивающего электрода.

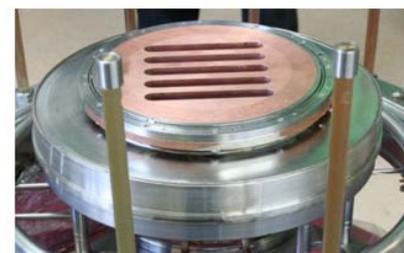
Фотографии многоапертурных электродов ионно-оптической системы источника показаны на рисунке 2.6. В плазменном электроде были просверлены 25 конических отверстий с проходным диаметром 16 мм каждое для вытягивания образующихся ОИ. В вытягивающем электроде были сделаны конические отверстия диаметром 14 мм для прохождения вытягиваемого пучка. В ускоряющем электроде использовались щелевые отверстия шириной 16 мм, длиной 108 мм. Щели ускоряющего электрода установлены соосно с коническими отверстиями плазменного и вытягивающего электродов, а их длина ориентирована перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Вытягивающий зазор между плоскостями плазменного и вытягивающего электродов имеет величину 4,8 мм, ускоряющий зазор между вытягивающим и ускоряющим электродами – 48 мм.



а)



б)



в)

Рисунок 2.6. Электроды ионно-оптической системы: а) плазменный электрод, б) вытягивающий электрод, в) ускоряющий электрод.

2.2.5 Магнитная система источника

Магнитная система источника показана на рисунке 2.7. Она состоит из четырех групп: магнитного фильтра (M_1), корректирующий магнит ИОС (M_2), магниты драйвера (M_3) и магниты расширительной камеры (M_4). Магнитный фильтр понижает температуру и плотность электронов в области ПЭ, магнит УЭ отклоняет электроны в карманы ВЭ и корректирует геометрию поля в ИОС, магниты ВЧ драйвера увеличивают плотность плазмы в ВЧ драйвере, магниты расширительной камеры удерживают плазму в расширителе. Вторая группа магнитов за ускоряющим электродом собирает магнитное поле, уменьшая его пересечение с керамикой ускоряющего зазора.

Значения и распределение магнитного поля вдоль оси источника показаны в нижней части рисунка 2.7 (синие точки – данные измерений, сплошная красная линия - моделирование по коду MAG-3D [45]). Как видно из рисунка 2.7, интеграл поля магнитного фильтра составляет $\sim 0,9$ мТ·м. Магнитное поле вблизи плазменного электрода составило 12 мТ, максимум магнитного поля находится вблизи ускоряющего электрода и составляет 16,5 мТ. Силовые линии магнитного поля начинаются или заканчиваются на электроде, являющимся в зазоре ИОС анодом. Такая геометрия магнитного поля препятствует удержанию, размножению и накоплению электронов в зазорах ИОС.

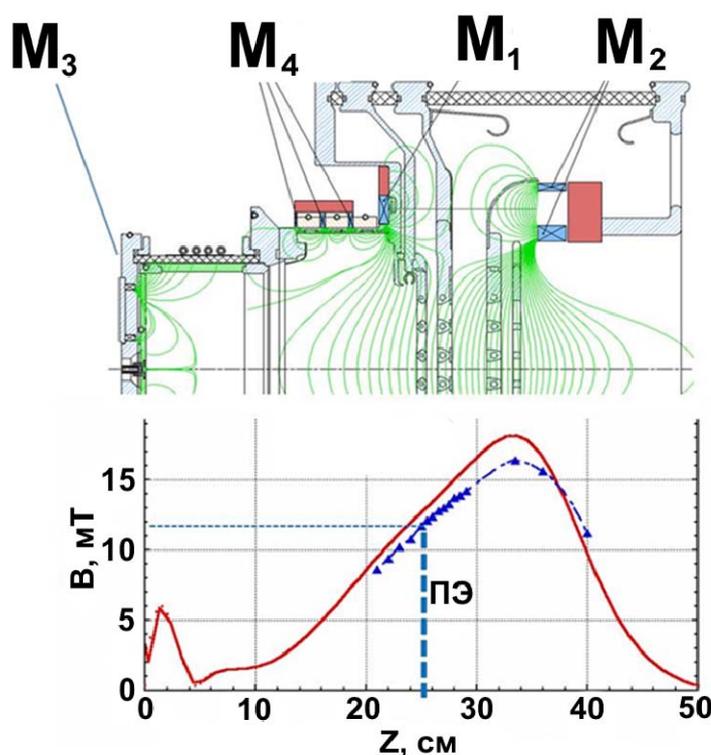


Рисунок 2.7. Магнитная система и распределение магнитного поля в источнике. На верхней части рисунка: зеленые линии - геометрия магнитных силовых линий; буквами M1, M2, M3, M4 обозначены четыре основные группы магнитов источника. На нижней части: красная линия - моделирование распределения магнитного поля вдоль оси источника с помощью MAG-3D [44], синие треугольники и пунктир - данные измерений магнитного поля вдоль оси источника.

2.2.6 Система термостабилизации

Нагрев и охлаждение электродов при работе источника в режиме работы с подачей цезия осуществляется горячим теплоносителем. Нагрев плазменного

электрода необходим для оптимизации цезиевого покрытия и увеличения генерации ОИ, тогда как повышенная температура вытягивающего электрода ($100-250^{\circ}\text{C}$) необходима для улучшения высоковольтной прочности ИОС. Нагрев помогает предотвратить накопление цезия на кромках электродов ИОС и его неконтролируемую десорбцию при бомбардировке ускоряемыми ОИ, сопутствующими электронами и потоками встречных положительных ионов. Предварительный нагрев плазменного и вытягивавшего электродов до температуры $150-250^{\circ}\text{C}$ и их охлаждение горячим теплоносителем во время импульсов обеспечивается за счет прокачки высокотемпературного теплоносителя (MarloTherm [48]) через каналы, просверленные в электродах ИОС. Основным компонентом системы термостабилизации является блок теплообмена. Общая тепловая мощность, которую он может выдать, составляет до 12 кВт для нагрева жидкости и до 70 кВт для её охлаждения. Все элементы системы термостабилизации (блок теплообмена и подводы к источнику) размещены на платформе высокого напряжения (до 120 кВ).

На рисунке 2.8 показана схема плазменного электрода источника, на ней показаны подводы дистиллята для охлаждения внешнего фланца источника. Также показаны вводы горячего теплоносителя для нагрева внутренней части плазменного электрода и четыре разделительных промежуточных фланца.

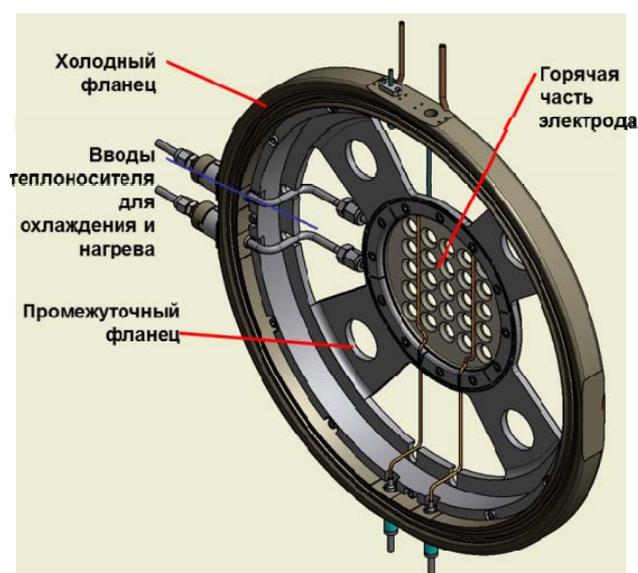


Рисунок 2.8. Схема плазменного электрода, позволяющая осуществлять активный контроль температуры рабочей части ускоряющего электрода.

Часть электрода, находящаяся в непосредственной близости к области формирования и ускорения пучка, поддерживалась горячей при работе в водородно-цезиевом режиме (см. раздел 3.3). Для сохранения соосности электродов ИОС во время выстрелов с получением пучка на стыке между горячей частью плазменного и вытягивающего электродов и холодных внешних фланцев сделаны специальные пружинные пазы, позволяющие горячей части свободно расширяться, сохраняя соосность.

2.3 Новые идеи, заложенные в конструкцию источника

Принципиально новыми элементами, введенными в конструкцию ВЧ источника ИЯФ, требующими дополнительного исследования, являлись нагрев и охлаждение электродов ИОС прокачкой горячего теплоносителя, использование поперечного магнитного поля в ИОС с искривленными силовыми линиями и подача цезия непосредственно на поверхность эмиттера через накопительно-распределительную трубку.

Нагрев электродов приводит к усиленному перераспределению цезия и способствует образованию однородного цезиевого покрытия на эмиттере отрицательных ионов. Нагрев электродов также приводит к увеличению скорости ухода цезия с поверхностей электродов ИОС, это уменьшает паразитное накопление цезия на кромках электродов ИОС и таким образом увеличивает ВВ прочность зазоров ИОС. Отсутствие пеннинговских ловушек в зазорах ИОС источника препятствует удержанию, размножению и накоплению электронов в зазорах ИОС и способствует поддержанию высоковольтной прочности зазоров ИОС источника. Разделение зоны источника ОИ и ускорителя позволяет обеспечить более высокую скорость откачки газа из ИОС, что должно уменьшить токи осаждения на электроды ИОС источника, которые обусловлены перехватом ОИ, сопутствующими электронами и вторичными частицами.

При разделении источника ОИ и ускорителя промежуточной линией транспортировки задачи получения пучка с энергией до 120 кэВ и его последующего ускорения можно решать независимо. Разрушение пучка в области его формирования в этом случае не приводит к потоку высокоэнергетичных нейтралов и электронов в примыкающий ускоритель. При этом положительные ионы, образующиеся в ускорителе и ускоряющиеся в сторону источника, не попадают в источник из-за сдвига оси источника относительно оси ускорителя и, соответственно, не нарушают его работу.

Экспериментальная проверка заложенных в конструкцию новых принципов и исследование их эффективности представлено в 3 и 4 главах.

Глава 3. Получение пучка отрицательных ионов

Эксперименты, проведённые на стенде по исследованию формирования и транспортировки пучка прототипа источника ОИ, описанного в главе 2, были главным образом посвящены получению требуемого пучка, исследованию и экспериментальному подтверждению эффективности заложенных в конструкцию ВЧ источника ИЯФ новых элементов. Были исследованы эмиссионные характеристики источника (раздел 3.1), влияние цезия на характеристики источника (раздел 3.2), увеличение высоковольтной прочности источника при нагреве электродов ИОС (раздел 3.3) и влияние положительного напряжения смещения на плазменном электроде на эмиссионные характеристики источника (раздел 3.4).

3.1 Исследование эмиссионных характеристик источника

Для оперативного контроля была разработана и обоснована методика измерений и обработки параметров пучка ОИ, основанная на измерении токов в цепях систем питания источника и позволяющая исследовать формирование, транспортировку пучка и изменение его характеристик в течение импульса. С использованием данной методики были оптимизированы параметры работы источника, и был получен пучок с требуемыми характеристиками [49].

3.1.1 Эмиссионные токи источника

Токи, текущие в ИОС источника, в основном обусловлены вытягиванием ОИ и сопутствующих электронов. Обдирка ОИ в ИОС приводит к образованию электронов, которые также ускоряются в ИОС. При неоптимальных напряжениях на электродах пучок ОИ может частично оседать на них, вызывая вторичную эмиссию. Ионизация остаточного газа ионами пучка может приводить к ускорению положительных ионов в зазорах ИОС. Ускоренные положительные

ионы могут вызывать вторичную эмиссию электронов с вытягивающего и плазменного электродов [50].

Моделирование траекторий частиц в ИОС. Для определения состава эмиссионных токов источника было проведено моделирование движения заряженных частиц в ИОС источника. Физика формирования пучка описывается уравнением Пуассона (3.1). Член, описывающий объемный заряд, вычисляется с использованием уравнения Лоренца (3.2) и закона сохранения заряда (3.3). Эти уравнения образуют замкнутую систему. В большинстве случаев, такая система уравнений не может быть решена аналитически, и поэтому используются итерационные вычислительные методы.

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = -4\pi\rho \quad (3.1)$$

$$\frac{dP}{dt} = q(E + \frac{1}{c}[V \times B]) \quad (3.2)$$

$$\text{div}(j) = 0 \quad (3.3)$$

где φ – потенциал электростатического поля, ρ – плотность электрического заряда, P – импульс частицы, q – заряд частицы, V – скорость частицы, B – магнитная индукция, j – плотность тока.

Важным фактором при формировании пучков заряженных частиц является положение плазменной границы. Для частного случая бесконечно протяжённых плоских электродов ток электронов из эмитирующего электрода зависит от расстояния между эмитирующим и вытягивающим электродом d и напряжения между ними U . Зависимость j от вытягивающего напряжения описывается законом Чайлда-Ленгмюра (3.4). Плотность тока ограничена изменением потенциала в межэлектродном промежутке и пространственным зарядом, приводящим к отсутствию электрического поля вблизи эмиссионного электрода (3.5). Для случая эмиссии ионов плотность тока, извлекаемого из плазмы, является функцией её плотности и температуры, а форма и расстояние от центра плазменной границы до электрода являются функцией напряжения на вытягивающем электроде и плотности тока эмиссии (3.6).

$$j = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d^2} \quad (3.4)$$

$$E = \frac{\partial \varphi}{\partial z}(z=0) = 0 \quad (3.5)$$

$$d_{\text{сн}} = \frac{1}{\sqrt{9\pi}} \left(\frac{2e}{M} \right)^{1/4} \frac{U_0^{3/4}}{j_{H^-}^{1/2}} \quad (3.6)$$

где m – масса электрона, M – масса иона.

Для определения положения плазменной границы граничные условия задаются следующими уравнениями. В источнике в плотность объемного заряда дают вклад три сорта частиц: положительные ионы (n_i^+), отрицательные ионы (n_i^-), и электроны (n_e^-). Внутри плазмы условие электронейтральности имеет вид (3.7). Вблизи границы плазмы плотность положительных ионов экспоненциально уменьшается (3.8), а далеко за пределами плазмы положительных ионов нет (3.9). Решение системы уравнений с данными граничными условиями для определения положения плазменной границы также осуществляется итерационным вычислительным методом.

$$n_i^+ = n_i^- + n_e^- \quad (3.7)$$

$$n_i^+ = n_{i0}^+ \cdot \exp(-\Delta\varphi / kT) \quad (3.8)$$

$$n_i^+ = 0 \quad (3.9)$$

Моделирование формирования пучка в ИОС были проведены с помощью кода PBGUNS [51]. Программа решает уравнение Пуассона релаксационным методом, для расчета потенциала и траекторий частиц. PBGUNS автоматически определяет положение плазменной границы.

Пример результатов моделирования формирования пучка в элементарной ячейке ИОС источника ИЯФ с плотностью тока 30 mA/cm^2 и номинальными значениями напряжения на электродах ИОС показаны на рисунке 3.1. Фиолетовым на рисунке 3.1 показаны плазменный (0 кВ), вытягивающий (10 кВ) и ускоряющий (120 кВ) электроды, зеленым показаны эквипотенциальные линии электрического поля, а красным показаны траектории пучка ОИ. Видно, что при номинальных значениях напряжения на электродах ИОС ОИ не оседают на вытягивающем и ускоряющем электроде.

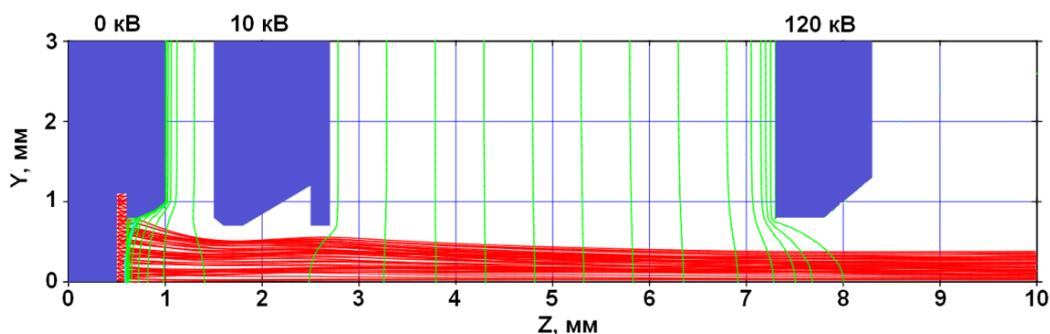


Рисунок 3.1. Моделирование формирования пучка в ИОС источника с помощью программы PBGUNS: $U_{ex}=10$ кВ, $U_{ac}=110$ кВ, $I_b=60$ мА

Уменьшение ускоряющего напряжения приводит к оседанию пучка на ускоряющем электроде. Зависимость прохождения пучка от напряжения на ускоряющем электроде, рассчитанная в PBGUNS для элементарной струйки пучка, показана на рисунке 3.2. I_b показывает ток струйки, прошедший через ИОС, I_{AG} показывает ток ОИ, оседающий на ускоряющий электрод. Из рисунка 3.2 видно, что при напряжении на ускоряющем электроде менее 40 кВ пучок оседает на ускоряющем электроде. Даже при отсутствии ускоряющего напряжения $U_{ac} = 0$ кВ 60% тока пучка проходит через ИОС, оставшиеся 40 % тока пучка I_{AG} оседает на ускоряющем электроде.

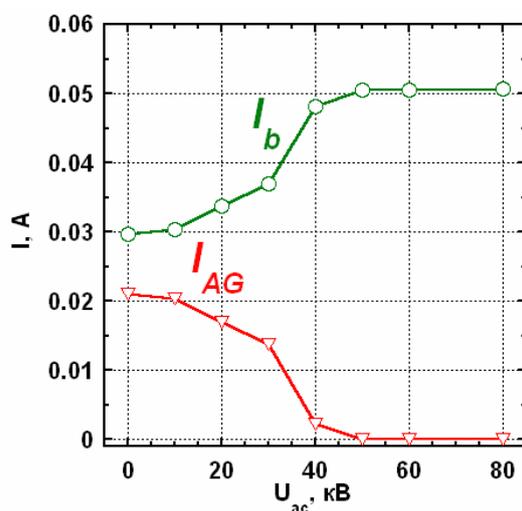


Рисунок 3.2. Расчет прохождения струйки пучка через ИОС в зависимости от напряжения на ускоряющем электроде, выполненный в PBGUNS: $U_{ex}=10$ кВ, полный ток струйки $I_b=50$ мА

На рисунке 3.3 показаны характерные траектории движения электронов в ускоряющем зазоре при различных напряжённостях электрического поля в ускоряющем зазоре. Начальная энергия инжекции сопутствующих электронов

$U_{ex} = 10$ кэВ. Радиус ларморовской окружности для электрона при энергии 10 кэВ $r \sim 1,5$ см меньше длины ускоряющего зазора. Поэтому сопутствующие пучку электроны заперты магнитным полем вблизи вытягивающего электрода. При этом ионизация остаточного газа пучком приводит к рождению заряженной пары электрон-протон, если пара образовалась в ускоряющем зазоре ИОС, то она даёт одинаковый вклад в ток оседающий на ускоряющий электрод и в ток цепи выпрямителя ускоряющего напряжения, если пара образовалась в области цилиндрической опоры ускоряющего электрода, то ион и электрон оседают на ускоряющий электрод и его опору и вклада в I_{AG} не дают. Таким образом, ток, оседающий на ускоряющий электрод при $U_{ac} = 0$, обусловлен только оседанием ОИ и электронами, рождёнными при обдирке ОИ, вблизи ускоряющего электрода. При увеличении ускоряющего напряжения сопутствующие пучку электроны в ускоряющем зазоре движутся по трохоиде и при энергиях более 30 кэВ начинают попадать на ускоряющий электрод. Таким образом, при $U_{ex} + U_{ac} \sim 30$ кэВ может наблюдаться максимум I_{AG} из-за одновременного перехвата ОИ и сопутствующих электронов. Использование длинного стакана ускоряющего электрода обуславливает сбор всех ускоренных электронов при $U_{ex} + U_{ac} = 120$ кэВ на ускоряющем электроде.

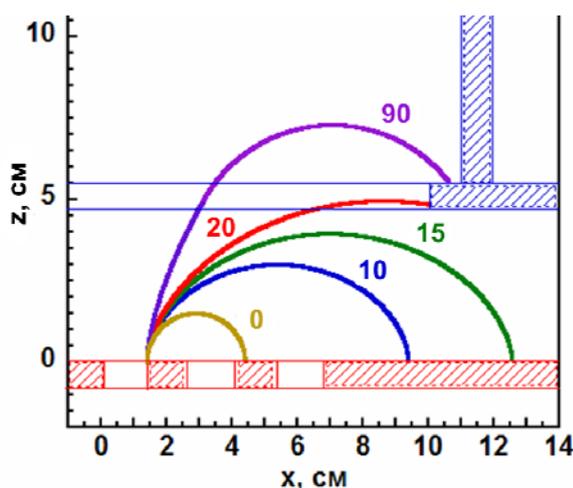


Рисунок 3.3. Траектории электронов в ускоряющем зазоре ИОС в плоскости поперечной магнитному полю при различных значениях ускоряющего напряжения U_{ac} . Красным показан вытягивающий электрод, синим — ускоряющий, $U_{ex}=10$ кВ, $B=10$ мТ.

Ток перехвата I_{AG} при энергии пучка 120 кэВ будет обусловлен в основном сопутствующими электронами и вторичными частицами ускоряющего зазора. Для сбора высокоэнергетичных электронов на ускоряющем электроде был установлен охлаждаемый коллектор.

Увеличение ускоряющего напряжения необходимо не только для улучшения прохождения пучка ОИ через зазоры ИОС, а также для получения пучка с меньшей угловой расходимостью. На рисунке 3.4 показана, рассчитанная в RBGUNS, зависимость максимальной угловой расходимости пучка от ускоряющего напряжения. При увеличении напряжения ускорения с 10 до 90 кВ расходимость пучка уменьшается и достигает минимума 40 мРад.

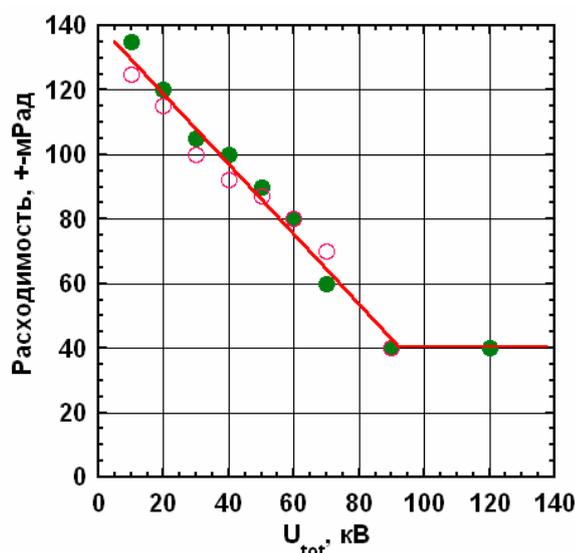


Рисунок 3.4. Зависимость расхождения пучка от напряжения на ускоряющем электроде. Плотность тока эмиссии 50, 60 mA/cm^2 .

Определение состава эмиссионных токов источника в эксперименте.

Для оперативного контроля характеристик работы источника проводились измерения токов в цепи выпрямителей плазменного I_{PG} , вытягивающего I_{ex} и ускоряющего I_{ac} напряжений, а также тока перехвата на ускоряющий электрод I_{AG} , схема которых показана в левой части рисунка 3.5. Эти измерения позволяли контролировать изменение характеристик ускоряемого пучка в течение импульса, а также определять состав эмиссионных токов источника [49].

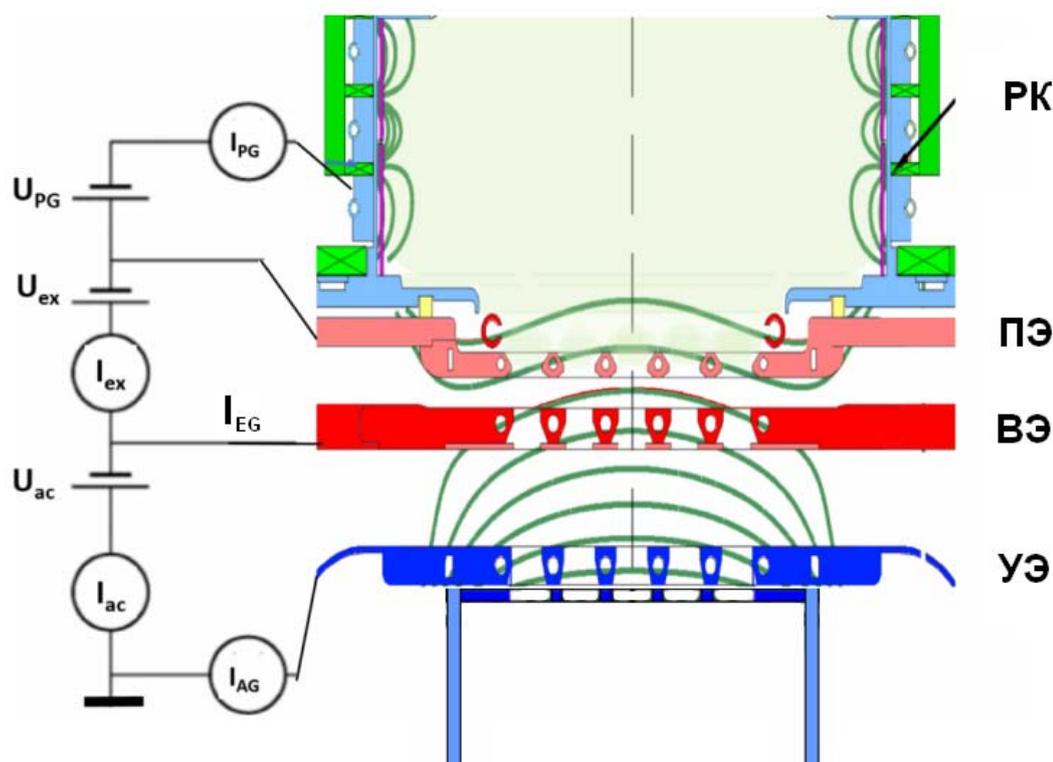


Рисунок 3.5. Схема подключения выпрямителей к электродам источника и измерений токов на электроды ИОС: I_{PG} - ток оседающий на ПЭ, I_{ex} - ток в цепи выпрямителя вытягивающего напряжения (до 12 кВ), I_{ac} - ток в цепи выпрямителя ускоряющего напряжения (до 110 кВ), I_{AG} - ток в цепи УЭ, I_{EG} - ток в цепи ВЭ

Ток в цепи выпрямителя вытягивающего напряжения I_{ex} обусловлен током вытягиваемых ОИ и током сопутствующих электронов, а также током встречных положительных ионов, ускоряемых в вытягивающем зазоре. Ток в цепи выпрямителя ускоряющего напряжения I_{ac} складывается из тока ускоряемых ОИ и электронов, а также из тока положительных ионов, ускоряемых навстречу пучку ОИ. В состав тока ускоряемых электронов входят первичные электроны, проникающие в ускоряющий промежуток из вытягивающего зазора, а также вторичные электроны, образующиеся на вытягивающем электроде за счет бомбардировки электронами и положительными ионами, а в ускорительном промежутке – из-за обдирки ОИ и ионизации газа. Все ускоряемые электроны выводятся из пучка поперечным магнитным полем и перехватываются на ускоряющий электрод и его опору.

Анализ процессов, происходящих в зазорах ИОС при формировании пучка показал, что для использованной в источнике конфигурации магнитного поля и

геометрии электродов ИОС все ускоряемые электроны отклоняются поперечным магнитным полем на ускоряющий электрод, тогда как холодные электроны, образующиеся за счет обдирки пучка H^+ или ионизации газа выводятся вдоль силовых линий магнитного поля на его опору.

Таким образом, электронная компонента ускоряемого тока и ток ОИ, осаждаемый на ускоряющий электрод, входят в состав тока I_{AG} , ток встречных положительных ионов входящий в состав I_{ac} равен току электронов, образовавшихся при ионизации и регистрируемых в составе тока I_{AG} , регистрируемая в токе I_{ac} часть тока ОИ, не входящая в пучок из-за разрушения равна току электронов обдирки, измеряемому в токе I_{AG} . Соответственно разность измеряемых токов $I_{ac} - I_{AG} = I_b$ определяет полный ток пучка ОИ на выходе из источника I_b . Соответствие разностного тока I_b и тока ОИ, выходящего из источника было подтверждено прямыми измерениями тока ускоренного пучка (см. ниже).

Разность токов $I_{ex} - I_{ac}$ определяет суммарный ток в цепи вытягивающего электрода I_{EG} . При оптимальных напряжениях на электродах ИОС, обеспечивающих минимальное оседание ионов пучка на электроды, ток I_{EG} обусловлен осаждением вытягиваемых электронов, оттоком вторичных электронов, образующихся на вытягивающем электроде и притоком положительных ионов, образующихся в ускорительном зазоре или внутри отверстий ускоряющего электрода и его опоры.

Отметим, что вторичные электроны, уходящие с вытягивающего электрода, перехватываются на ускоряющем электроде и в сумме токов $I_{EG} + I_{AG}$ взаимно компенсируются. Аналогичным образом, в сумме $I_{EG} + I_{AG}$ взаимно компенсируются токи положительных ионов, приходящих на вытягивающий электрод и ток электронов, образующихся при ионизации в области ускорения и собирающихся на ускоряющий электрод и его опору. В результате при оптимальных напряжениях ИОС сумма токов $I_{EG} + I_{AG}$ состоит в основном из вытягиваемых электронов и электронов обдирки, осаждаемых на ускоряющий электрод, что позволяет дать верхнюю оценку для тока вытягиваемых электронов

$I_e < I_{EG} + I_{AG}$. Оптимальные напряжения ИОС, обеспечивающие максимальное прохождение пучка определялись экспериментально.

3.1.2 Основные зависимости и оптимизация режима работы источника

После проведения численного моделирования движения заряженных частиц в ИОС был произведен экспериментальный подбор оптимальных параметров с целью получения стабильной работы источника отрицательных ионов с максимальным током и минимальным током сопутствующих электронов [52, 53]. На рисунках 3.6 - 3.9 показаны характерные зависимости эмиссионных токов источника от мощности, вкладываемой в плазму, от давления водорода в источнике, от положительного напряжения смещения на плазменном электроде и от напряжения на ускоряющем электроде.

Зависимость от мощности разряда. Зависимости тока пучка I_b на выходе из источника, тока пучка прошедшего на ЦФ с входным отверстием $\varnothing 100$ мм I_{fc} и тока сопутствующих электронов I_e от мощности ВЧ разряда показаны на рисунке 3.6.

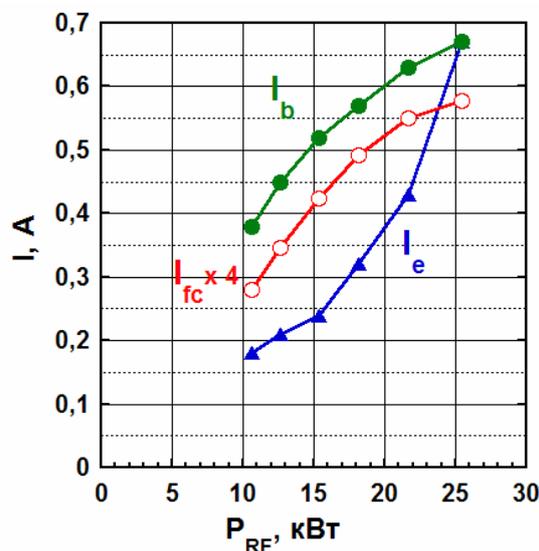


Рисунок 3.6. Зависимости тока пучка на ЦФ I_{fc} , тока пучка на выходе из ИОС I_b и тока электронов вытягивающего промежутка I_e , от мощности, подаваемой в плазму P_{RF} , параметры работы источника: $U_{PG} = 19$ В, с ЭФ, $P_{H_2} \sim 0,4$ Па, $U_{ex} = 7,3$ кВ, $U_{ac} = 75$ кВ

Ток пучка и электронный ток линейно возрастают с увеличением мощности разряда. Отношение тока пучка ОИ к электронному току увеличивается при

увеличении мощности разряда (0,5 при 10 кВт; 0,67 при 22 кВт). Сильное увеличение измеряемого I_e и насыщение тока пучка при переходе с 22 кВт на 25,5 кВт вызвано перехватом пучка ОИ на электродах ИОС при недостаточном вытягивающем напряжении U_{ex} .

Зависимость от подачи водорода. Зависимости тока пучка на выходе из источника I_b , тока на цилиндр фарадея I_{fc} , электронного тока I_e и мощности разряда P_{RF} от давления водорода в драйвере P_{H_2} показаны на рисунке 3.7. Мощность ВЧ разряда при фиксированной амплитуде напряжения на ВЧ антенне $U_{ant} = 8,5$ кВ линейно увеличивается при увеличении давления водорода в источнике с 20 кВт при давлении 0,26 Па и до 32 кВт при давлении 0,54 Па, ток пучка на ЦФ при этом уменьшается с 140 мА до 120 мА, а пучок на выходе из ИОС уменьшается с 0,6 А до 0,48 А. Это показывает, что увеличение генерации ОИ за счет мощности ВЧ разряда не компенсирует их увеличенную обдирку при формировании и транспортировке пучка.

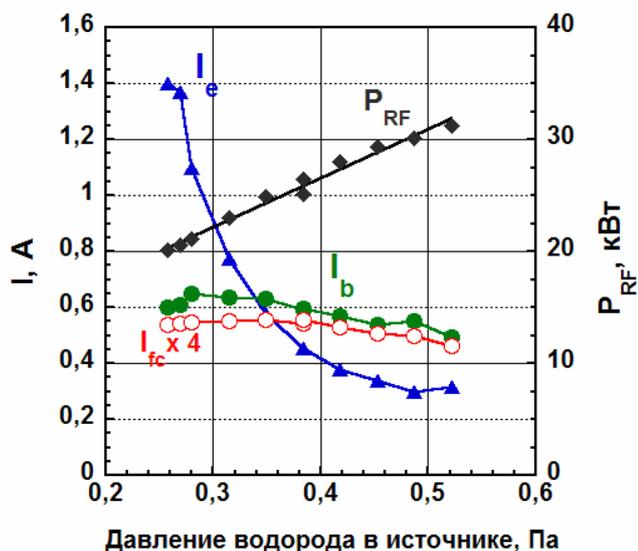


Рисунок 3.7. Зависимости тока пучка ОИ на ЦФ I_{fc} , тока электронов вытягивающего промежутка I_e , и мощности ВЧ разряда P_{RF} от давления водорода в драйвере, параметры работы источника: $U_{PG} = 20$ В, с ЭФ, $U_{ex} = 7,5$ кВ, $U_{ac} = 67$ кВ

Схожесть зависимостей тока ОИ на выходе из источника I_b и тока пучка, попавшего на коллектор I_{fc} , показывает, что основная обдирка ОИ происходит в зоне ускоряющего электрода на струе вытекающего газа. Ток электронов уменьшается при увеличении давления, что связано с уменьшением электронной

температуры плазмы вблизи плазменного электрода из-за улучшения работы магнитного фильтра.

Из рисунков 3.6 и 3.7 видно, что для увеличения тока пучка следует увеличить мощность, вкладываемую в плазму при низком давлении $P_{H_2} \sim 0,3$ Па водорода в источнике. Это можно сделать за счет увеличения напряжения на ВЧ антенне U_{ant} .

Зависимость от напряжения на плазменном электроде. Было обнаружено, что эмиссионные токи источника зависят от разности потенциалов между плазменным электродом и прилегающей к нему плазмой (в соответствии с [54]). В частности, потенциал плазмы и необходимый для снижения потока сопутствующих электронов потенциал смещения на плазменном электроде увеличиваются при уменьшении давления водорода в ВЧ драйвере P_{H_2} или при установке фарадеевского экрана (ФЭ) в ВЧ драйвер, как это показано в разделе 3.4.

Зависимости тока пучка на ЦФ i_{FC} , суммарного тока $I_{AG} + I_{EG}$ и тока на ускоряющий электрод I_{AG} от напряжения смещения на плазменном электроде U_{PG} приведены на рисунке 3.8. При низком напряжении смещения U_{PG} , близком к наведенному потенциалу приэлектродной плазмы [55], все представленные на рисунке 3.8 токи максимальны. Увеличение U_{PG} приводит к ~ 5 -кратному уменьшению тока вытягиваемых электронов и более слабому спаду тока пучка ОИ I_b . Так, при $U_{PG} \sim 12$ В ток сформированного пучка с энергией 93 кэВ в плоскости ЦФ имел величину более 1.1 А (кривая $i_{FC} \times 2,4$, где 2,4 – экспериментально измеренный коэффициент пересчета тока ЦФ на полный ток пучка в плоскости ЦФ). Ток сопутствующих электронов при этом был менее 0,4 А. При больших $U_{PG} > 15-20$ В, когда напряжение на плазменном электроде становится заметно выше наведенного потенциала приэлектродной плазмы, ток вытягиваемых электронов существенно снижается. При этом ток на ускоряющий электрод I_{AG} и суммарный ток $I_{AG} + I_{EG}$ выходят на стационарные уровни $\sim 0,3$ А и 0,2 А соответственно. В этом случае ток в цепи вытягивающего электрода I_{EG} меняет знак, т.е. осаждение первичных 13 кВ электронов на вытягивающий

электрод становится меньше токов вторичной эмиссии и встречных положительных ионов. Большую часть суммарного тока $I_{AG} + I_{EG}$ в этом случае могут составлять вторичные электроны и электроны, рожденные при обдирке ОИ, которые оседают на ускоряющем электроде.

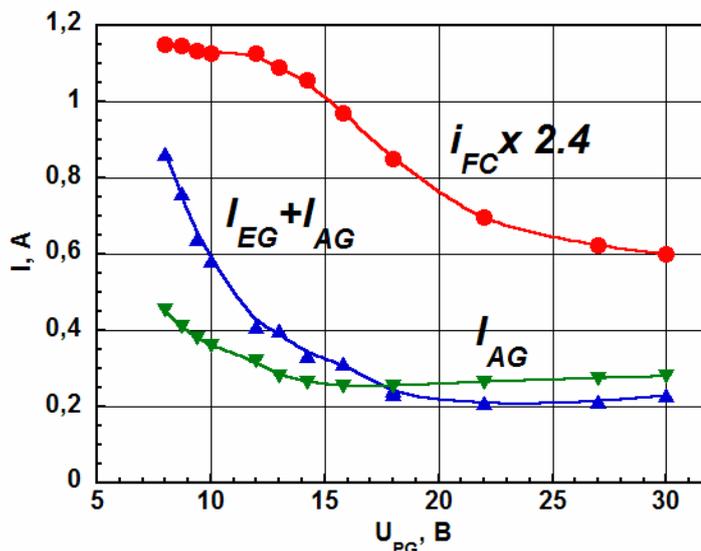


Рисунок 3.8. Зависимости эмиссионных токов от напряжения смещения на плазменном электроде U_{PG} . i_{FC} – максимальный ток пучка ОИ на ЦФ диаметром 170 мм, $I_{EG} + I_{AG}$ – ток на вытягивающий и ускоряющий электроды, I_{AG} – ток в цепи ускоряющего электрода, параметры работы источника: без ЭФ, $P_{RF} \sim 35$ кВт, $U_{ex} = 12 \div 13$ кВ (больше при увеличенных U_{PG}), $U_{ac} = 81$ кВ, $P_{H2} = 0,4$ Па.

Как видно из рисунка 3.8, при увеличении U_{PG} в диапазоне 15-30 В ток на ускоряющий электрод $I_{AG} \sim 0,3$ А не изменяется, тогда как ток пучка ОИ и ток вторичных электронов, образующихся при обдирке или ионизации, уменьшается на 40%. Поддержание I_{AG} на постоянном уровне $\sim 0,3$ А может быть обусловлено ростом осаждения ОИ на ускоряющий электрод, вызванное снижением плотности приэлектродной плазмы при увеличении U_{PG} [36] и перефокусировкой пучка при вытягивании.

Зависимость от напряжения на ускоряющем электроде. Ток пучка на выходе из источника и ток пучка, измеренный ЦФ на расстоянии 1,6 м от источника, в зависимости от напряжения на ускоряющем электроде показаны на рисунке 3.9. Зависимости были сняты при подъеме ускоряющего напряжения в начале импульса при уже приложенных напряжении смещения плазменного электрода $U_{PG} = 9,5$ В и вытягивающем напряжении $U_{ex} = 12$ кВ. Мощность,

вкладываемая в плазму, составила $P_{RF} \approx 36$ кВт. Полный ток пучка в плоскости ЦФ оценивается как значение тока на ЦФ, помещенный в максимум плотности тока, умноженное на 2,4 в соответствии с профилем, приведённым в главе 4.

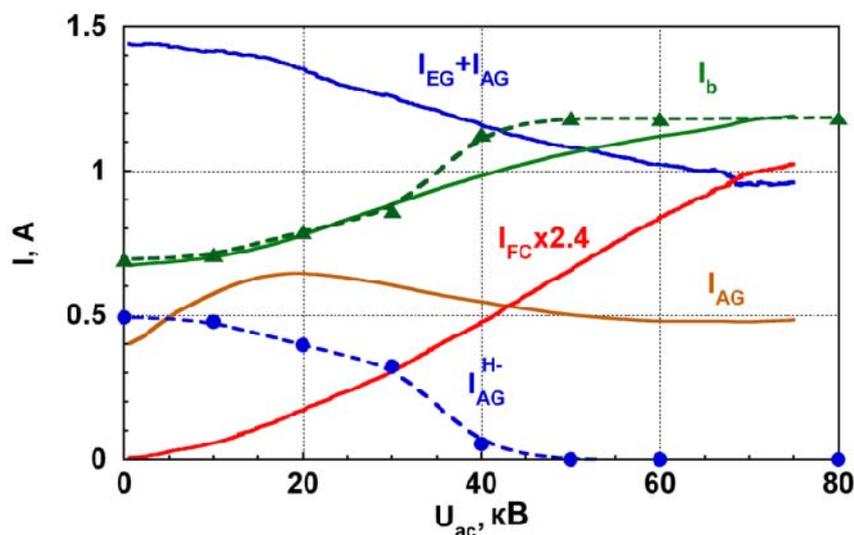


Рисунок 3.9. Зависимости эмиссионных токов источника от ускоряющего напряжения U_{ac} . Пунктирные линии – зависимости, полученные при использовании кода PBGUNS, параметры работы источника: без ЭФ; $P_{RF} \sim 36$ кВт; $P_{H2} = 0,4$ Па, $U_{ex} = 12$ кВ, $U_{PG} = 9,7$ В.

При $U_{ac} = 0$, все электроны, прошедшие через вытягивающий электрод, отклоняются магнитным полем и возвращаются на вытягивающий электрод (см. раздел 3.1). В соответствии с расчетом, приложенного вытягивающего напряжения $U_{ex} = 12$ кВ достаточно для прохождения пучка через отверстия в вытягивающем электроде. Поэтому ток на вытягивающий электрод $I_{EG} = 1,05$ А обусловлен в основном сопутствующими электронами. Далее часть пучка ОИ проходит через щели в ускоряющем зазоре и образует пучок ОИ с током $I_b = 0,7$ А, а часть попадает на ускоряющий электрод и обуславливает измеряемый ток перехвата $I_{AG} = 0,4$ А. Образующиеся при обдирке ОИ в области вблизи ускоряющего электрода электроны также входят в ток перехвата I_{AG} . Полный ток пучка, прошедший через вытягивающий электрод, в этом случае может быть оценен как сумма $I_{AG} + I_b = 1,1$ А. Из-за большого углового расхождения полученного пучка ток на ЦФ пренебрежимо мал.

С увеличением U_{ac} , ток в цепи ускоряющего электрода возрастает из-за улучшения прохождения вторичных электронов через ускоряющий зазор и из-за

ускорения положительных ионов, образующихся в ИОС источника и в зоне транспортировки пучка. Он достигает максимума $I_{AG} \sim 0,65$ А при ускоряющем напряжении $U_{ac} \sim 20$ кВ. Дальнейшее увеличение ускоряющего напряжения улучшает фокусировку пучка ОИ и уменьшает его оседание на ускоряющем электроде. Таким образом, I_{AG} уменьшается и выходит на постоянный уровень при $U_{ac} > 50$ кВ. Оставшийся ток перехвата $I_{AG} \sim 0,45$ А обусловлен электронами обдирки и вторичными электронами ускоряющего зазора. При $U_{ac} = 75$ кВ ток полученного пучка составил $I_b = 1,2$ А. Расходимость пучка уменьшилась и ток пучка на ЦФ составил 1 А (см. главу 4). Измеренное увеличение тока пучка, проходящего через вытягивающий электрод, на 0,1 А может быть обусловлено уменьшением обдирки пучка ОИ при приложении ускоряющего напряжения.

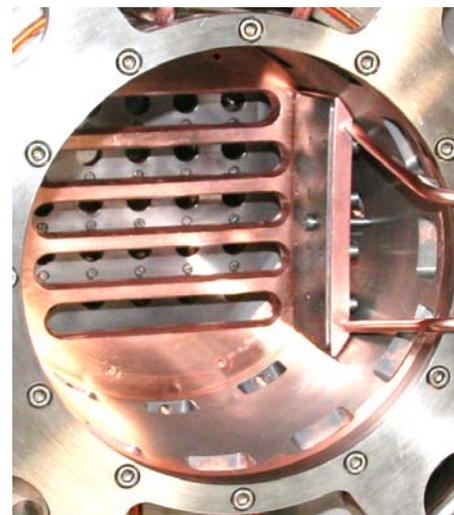
Полученные зависимости эмиссионных токов качественно соответствуют результатам численного моделирования с помощью кода PBGUNS для одной апертуры и проведенным расчетам траекторий электронов. Результаты моделирования показаны пунктирной линией. При моделировании не учитывалась обдирка пучка в ИОС. Более гладкая зависимость тока пучка от ускоряющего напряжения, полученная в эксперименте, может быть вызвана неоднородностью эмиссии ОИ в разных эмиссионных отверстиях.

Ток электронов, ускоренных до энергии ~ 100 кэВ, составляет 0,5 А. Поэтому необходимо принимать электроны, попадающие на ускоряющий электрод, на охлаждаемый коллектор. На рисунке 3.10а показано фото ускоряющего электрода, сделанное со стороны, противоположной направлению распространения пучка, после рабочего цикла без подачи цезия при работе с током перехвата $I_{AG} \sim 0,8$ А, ускоряющем напряжении $U_{ac} \sim 100$ кВ и длительностью импульсов ~ 10 с. Подплавление и распыление нержавеющей элемента конструкции привело к созданию нержавеющей поверхности на поверхности ускоряющего электрода, сделанного из бронзы. Справа от щели видно изображение отверстия вытягивающего электрода. Это подтверждает, что ускоряемые в ускоряющем зазоре электроны отражаются магнитным полем и отделяются от пучка, обеспечивая корректное измерение тока пучка на выходе из

источника по разности тока ускоряющего выпрямителя и тока перехвата на ускоряющий электрод.



а)



б)

Рисунок 3.10. Сбор электронов на ускоряющем электроде: а) фото ускоряющего электрода, сделанное после захода с длинными выстрелами пучка без подачи цезия в источник; б) фото коллектора высокоэнергетичных электронов.

Для измерения тока высокоэнергетичных (~ 100 кэВ) электронов можно использовать изолированный коллектор, установленный в направлении $E \times B$ внутри стакана ускоряющего электрода, как это показано на рисунке 3.10б. Поперечное магнитное поле ИОС в этом случае будет подавлять вторичную электронную эмиссию с его поверхности, а низкоэнергетичные электроны, образующиеся в области стакана, замагничены магнитным полем и вклада в измеряемый ток не дадут.

3.1.3 Получение пучка ОИ с необходимыми характеристиками

Характеристики источника в режимах с повышенной мощностью ВЧ разряда исследовались в коротких импульсах длительностью до 7 с. Для увеличения ВЧ мощности, вкладываемой в разряд, использовался драйвер без защитного фарадеевского экрана (см. раздел 2.2).

Типичные осциллограммы эмиссионных токов источника и тока ионов H^+ на цилиндр фарадея (ЦФ), характеризующие стабильность генерации тока пучка в импульсах длительностью 1,7 с приведены на рисунке 3.11. В течение

основной части импульса ток пучка на выходе из источника не меняется и составляет $I_b=1,2$ А. Токи, оседающие на вытягивающем I_{EG} и ускоряющем I_{AG} электродах, также постоянны в течение импульса и составляют $I_{EG}\sim I_{AG}\sim 0,5$ А каждый. Таким образом, суммарный ток сопутствующих электронов меньше тока пучка в течение всего импульса. Ток пучка на ЦФ i_{FC} , который составлял $\sim 1/3$ часть пучка на выходе из источника I_b и $\sim 1/2,4$ часть от полного тока пучка в плоскости ЦФ, определяемого сканированием ЦФ поперек пучка.

Для иллюстрации влияния напряжений ИОС на величину эмиссионных токов в импульсе, приведенном на рисунке 3.11, ускоряющее напряжение было включено на 0,1 с позднее вытягивающего напряжения. На начальном участке осциллограмм, в интервале $0-0,1$ с, к источнику было приложено только вытягивающее напряжение, а в интервале $0,2-1,7$ с - как вытягивающее, так и ускоряющее напряжения.

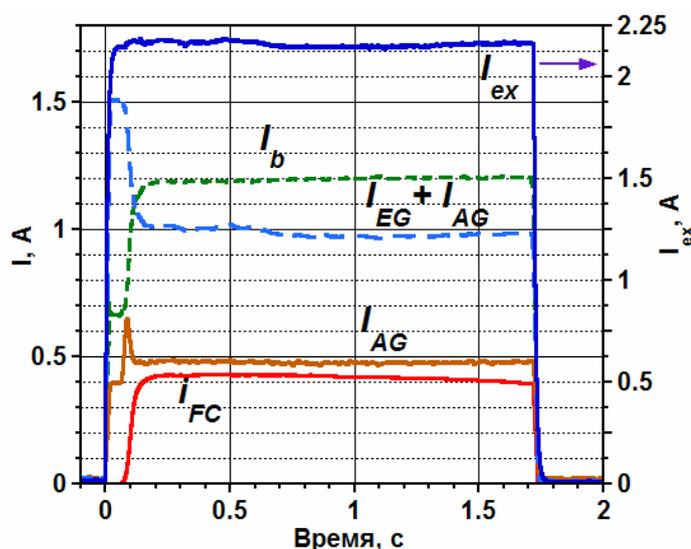


Рисунок 3.11. Осциллограммы эмиссионных токов источника в импульсах длительностью 1,5 с. I_{ex} — ток в цепи выпрямителя вытягивающего напряжения, I_{AG} — ток в цепи ускоряющего электрода, i_{FC} — ток ЦФ. Пунктиром показаны разностные токи: I_b — ток пучка, $I_{EG} + I_{AG}$ — токи на вытягивающий и ускоряющий электроды. Параметры работы источника: без ЭФ, $P_{RF} = 36$ кВт, $U_{ex} = 12$ кВ, $U_{ac} = 73$ кВ, $P_{H2} = 0,4$ Па. $U_{PG} = 9,5$ В. Диаметр входного окна ЦФ 170 мм.

Скачкообразное изменение тока I_{AG} , регистрируемое при подъеме ускоряющего напряжения, обусловлено изменением состава тока, перехватываемого на ускоряющий электрод и его опору (в соответствии с

рисунком 3.9). При включении ускоряющего напряжения быстрые электроны начинают перехватываться на ускоряющий электрод и его опору, а ионизация газа в ИОС усиливается [56]. Образующиеся положительные ионы ускоряются к вытягивающему электроду и вызывают дополнительную вторичную эмиссию электронов [57]. За счет роста потока электронов ток I_{AG} сначала возрастает, достигая локального максимума $\sim 0,65$ А при $U_{ac} \sim 20$ кВ (на 0,1 с рисунке 3.11). При дальнейшем подъеме ускоряющего напряжения и улучшении прохождения ОИ ток на ускоряющий электрод I_{AG} падает и выходит на стационарный уровень $I_{AG} \sim 0,5$ А, обусловленный в основном сбором электронов.

Получение пучка в режиме длинных импульсов. При исследовании динамики эмиссионных токов в импульсах длительностью более 7 с внутрь ВЧ драйвера для защиты его керамики вставлялся металлический фарадеевский экран (ЭФ), который приводил к снижению интенсивности ВЧ поля, проникающего в плазму через щели экрана и понижал мощность ВЧ разряда. Максимальная мощность ВЧ разряда в этом случае была ограничена интенсивностью ВЧ питания, и при увеличении давления в драйвере до 0,5 Па достигала 23 кВт.

Сравнительные характеристики работы источника с защитным фарадеевским экраном и без него приведены в таблице 3.1. В обоих случаях применялась максимальная амплитуда ВЧ поля (с соответствующей мощностью ВЧ разряда P_{RF}), а давление водорода P_{H_2} , вытягивающее напряжение U_{ex} и напряжение смещения плазменного электрода U_{PG} были оптимизированы для получения максимального тока пучка.

Таблица 3.1 – Характеристики источника, полученные для работы с ЭФ и без ЭФ в ВЧ драйвере.

ВЧ драйвер	P_{RF}	P_{H_2}	I_b	I_{ex}	U_{ex}	U_{total}	U_{PG}
Без ЭФ	36 кВт	0,4 Па	1,2 А	2,2 А	12,3 кВ	85 кВ	9,6 В
С ЭФ	23 кВт	0,5 Па	0,8 А	1,8 А	9,5 кВ	85 кВ	21 В

В первой колонке показана конфигурация ВЧ драйвера источника. Во второй колонке показана ВЧ мощность, вкладываемая в плазму P_{RF} . В третьей колонке

показано оптимальное давление водорода в ВЧ драйвере источника P_{H2} . Достигнутые токи пучка I_b и полный ток вытягивающего выпрямителя I_{ex} показаны в четвертой и пятой колонках. В шестой, седьмой и восьмой колонках показаны оптимальные напряжения на электродах ИОС U_{ex} , $U_{total} = U_{ex} + U_{ac}$, U_{PG} .

При работе без ЭФ при мощности ВЧ разряда 36 кВт и давлении водорода 0,4 Па был получен ток пучка величиной до $I_b = 1,2$ А и энергией 85 кэВ, тогда как в случае с установленным ЭФ при мощности ВЧ разряда 23 кВт был получен пучок ионов с током 0,8 А. Сравнение результатов показывает, что установка экрана внутрь экрана драйвера не приводит к существенному изменению характеристик плазмы, а уменьшение тока пучка пропорционально уменьшению мощности, вкладываемой в плазму при установке ЭФ. Тем не менее установка экрана в драйвер приводит к увеличению положительного потенциала плазмы (см. раздел 3.4), поэтому в случае с экраном для подавления тока сопутствующих электронов на плазменный электрод требуется прикладывать на 10 В большее напряжение смещения U_{PG} относительно стенок драйвера.

Типичные осциллограммы эмиссионных токов, иллюстрирующие работу источника с установленным ЭФ в импульсах длительностью 25 с, показаны на рисунке 3.12. Как видно из осциллограмм ток формируемого пучка ОИ I_b стабилен в течение всей продолжительности импульса. Полный ток в цепи вытягивания I_{ex} , характеризующий сумму тока пучка ионов и сопутствующих электронов, был в 2 раза выше тока пучка ОИ. Осциллограмма разностного тока $I_c = I_{ex} - I_b$ показывает, что ток сопутствующих электронов постоянен в течение основной части импульса и возрастает на ~20% к его концу. Регистрируемый в цепи ускоряющего электрода ток I_{AG} , характеризующий поток электронов, формирующихся в вытягивающем зазоре ИОС и перехватываемых на ускоряющий электрод, был постоянен в течение 25 с импульса.

Стабильность тока сформированного пучка ОИ показывает, что параметры прилегающей к плазменному электроду плазмы и его цезиевое покрытие остаются постоянными в течение импульса. Увеличение тока сопутствующих электронов в конце импульса может быть вызвано изменением потенциала плазмы из-за

обеднения цезиевого покрытия в расширительной камере вдали от эмиссионных отверстий.

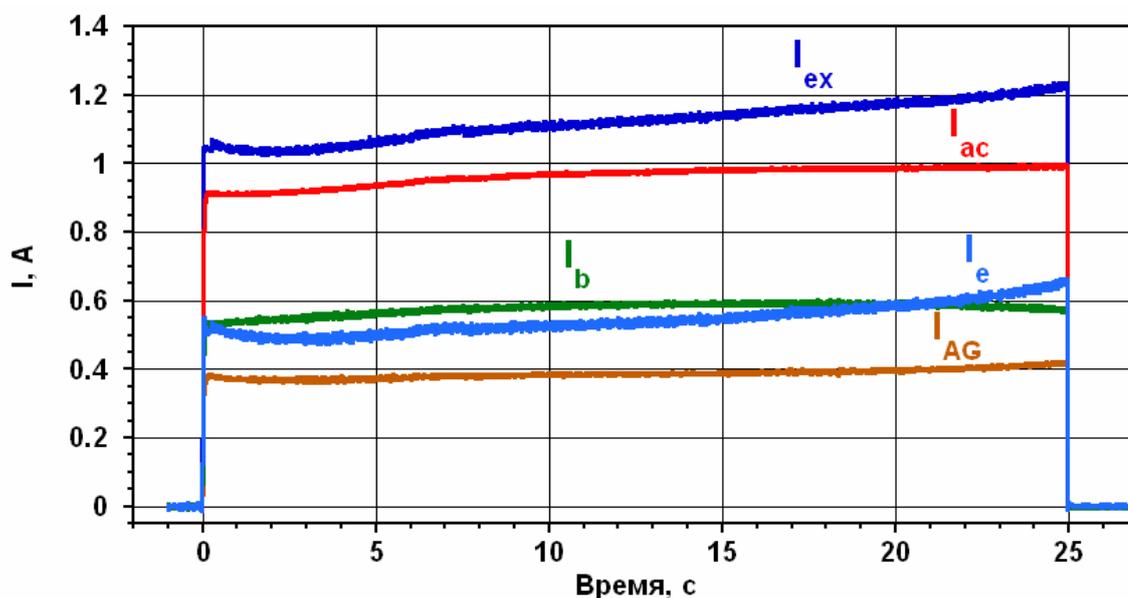


Рисунок 3.12. Осциллограммы токов в цепи выпрямителя вытягивающего напряжения I_{ex} , в цепи ускоряющего напряжения I_{ac} , в цепи ускоряющего электрода I_{AG} , и определяемых из них токов сопутствующих электронов I_e и тока пучка ОИ на выходе из ИОС I_b . Параметры работы источника: с ЭФ, $P_{RF} \sim 17$ кВт, напряжение на зазорах ИОС $U_{ex}=7$ кВ, $U_{ac}=75$ кВ, $P_{H_2}=0,35$ Па, $U_{PG}=17$ В.

Стабильность работы источника. Была исследована стабильность работы источника при контролируемом изменении параметров его работы. На рисунке 3.13 показаны ток пучка на выходе из источника I_b и полное напряжение на электродах ИОС $U=U_{total}=U_{ex}+U_{ac}$ в течение дневного экспериментального цикла, проведенного на следующий день после подачи цезия. Кругами на рисунке показан ток пучка на выходе из ИОС в выстрелах длительностью 2 секунды с паузами 120 секунд. Ток пучка изменялся в соответствии с изменением внутренних параметров источника: потенциала смещения на плазменном электроде U_{PG} , ВЧ мощности, подаваемой в плазму P_{RF} , давления водорода в ВЧ драйвере источника P_{H_2} , напряжения на вытягивающем электроде U_{ex} . Токи пучка, полученные при стандартных параметрах работы источника, показаны на рисунке 3.13 пустыми кругами, а токи пучка, полученные при экспериментальном контролируемом отклонении от стандартных параметров, показаны маленькими закрашенными кругами.

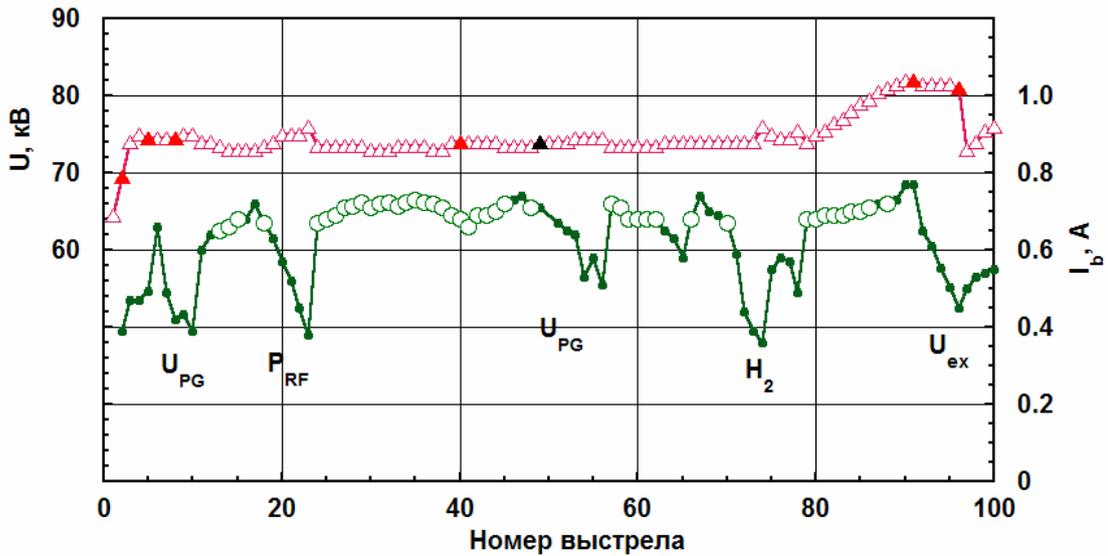


Рисунок 3.13. Стабильность работы источника в течение дневного экспериментального цикла: треугольники - полное напряжение на электроде ИОС: пустые треугольники – выстрелы без пробоя, закрашенные треугольники – выстрелы с пробоями; круги – ток пучка на выходе из ИОС, большие пустые круги- выстрелы при стандартных параметрах работы источника ($U_{PG}=9$ В, $P_{RF}=27$ кВт, $H_2=0,35$ Па, $U_{ex}=7,5$ кВ), закрашенные маленькие круги – выстрелы при отклонении параметров источника от стандартных (варьируемые параметры указаны черными подписями U_{PG} , P_{RF} , H_2 , U_{ex}).

В этом экспериментальном цикле при работе с стандартными параметрами работы источника был получен пучок с максимальным током 0,7 А и энергией 80 кэВ. Около 50 выстрелов, показанных на рисунке 3,13, были проведены при стандартных параметрах работы источника, из них только в одном импульсе был пробой. Остальные 50 выстрелов были проведены при экспериментальном изменении параметров источника, приводящих к изменению положения плазменной границы в эмиссионных отверстиях. Это приводило к увеличению частоты пробоев (6 пробоев в течение 50 выстрелов).

3.2 Изучение влияния цезия на характеристики источника

Было проведено исследование влияния подачи цезия на характеристики источника ОИ [58]. Подача цезия в разряд усиливает поверхностно-плазменную генерацию ОИ. В существующих источниках ОИ с драйверами на основе дугового [59] или ВЧ разряда [60] для эффективной генерации пучков ОИ

необходима непрерывная подача цезия. Непрерывная подача цезия также применяется в компактных источниках с пенинговской и магнетронной геометриями разряда, которые используются для применения в ускорителях [61]. Для длительной работы на компактном импульсном источнике с ВЧ драйвером, напротив, достаточно однократной подачи цезия [62, 63].

Было установлено, что распределённая подача цезия через отверстия РТ на предварительно нагретый плазменный электрод позволяет обеспечить высокий уровень эмиссии ОИ, который удается поддерживать в течение продолжительной работы без последующего дополнительного введения цезия в РТ. Долговременное поддержание необходимого для генерации цезиевого покрытия на плазменном электроде обеспечивается его выделением из распределительной трубки, нагреваемой разрядом, а также восстановлением цезия из образовавшихся соединений при плазмо-химических реакциях. Далее описывается процедура подачи цезия в источник (раздел 3.2.1), типичный эффект однократной подачи цезия на работу источника с получением большого пучка (раздел 3.2.2), обусловленного усиленной поверхностно-плазменной генерацией, в течение длительных заходов. Также приведены результаты исследований восстановления генерации ОИ после отравления поданного цезия.

3.2.1 Процедура выделения и подачи цезия

Конструкция цезиевой системы подробно описана в главе 2. Выделение цезия из таблеток (состоящих из смеси титана и хромата цезия) начинается с нагрева таблеток до температуры ~ 500 °С. Нагрев таблеток контролируется мощностью нагрева контейнера, а охлаждение - изменением температуры "холодной точки" (ХТ). Выделение цезия из таблеток экспоненциально увеличивается с ростом температуры таблеток и уменьшается при уменьшении количества цезия в таблетках. Реакцию выделения цезия из таблеток останавливали путем охлаждения ХТ и остановки нагрева цезиевого контейнера. Стандартное количество цезия, выделяемое при ступенчатом нагревании в течение 2 ч, составляло около 0,5 г. Типичной загрузки цезий-содержащих

таблеток (~2 г цезия) было достаточно для проведения нескольких подач цезия. Нагрев таблеток и выделение цезия контролировали по сопутствующему выделению водорода из таблеток. Подача цезия с ХТ в источник начинается при температуре ХТ ~170 °С, изменение температуры ХТ в диапазоне 180-200 °С использовалось для управления скоростью подачи цезия. Накапливающегося за одно выделение в контейнере цезия достаточно для многократных подач цезия в источник.

Процедура выделения цезия на нагретую ХТ, проведенная при дневном экспериментальном цикле с получением пучка в режиме 2 с выстрелов с паузами между выстрелами 2 минуты, показана на рисунке 3.14. На рисунке проиллюстрировано выделение водорода H_2 из цезий-содержащих таблеток, а также показано изменение тока пучка ОИ I_{FC} при подаче цезия в разряд. Круги I_{FC} на рисунке 3.14 показывают значения тока пучка ОИ измеренные ЦФ (диаметр 100 мм) на расстоянии 1.6 м от источника. Кривая H_2 показывает остаточное давление водорода в баке, измеряемое между выстрелами с помощью масс-спектрометра (выбросы водорода, во время выстрелов были «отрезаны»). Температура ХТ показана на графике линией $T_{ХТ}$, мощность нагрева цезиевого контейнера показана линией P_{Cs} .

Выделение водорода из таблеток начиналось после 20 мин нагрева и экспоненциально увеличивалось с ростом температуры таблеток. Давление водорода устанавливалось на стационарном уровне на 70 минуте, соответствующее уравниванию скоростей выделения водорода из таблеток и скорости откачки водорода из бака. Увеличение мощности нагрева контейнера до 130 Вт (95 минута) привело к заполнению контейнера парами металлического цезия, в результате усилился теплообмен между таблетками и начался бурный процесс выделения цезия.

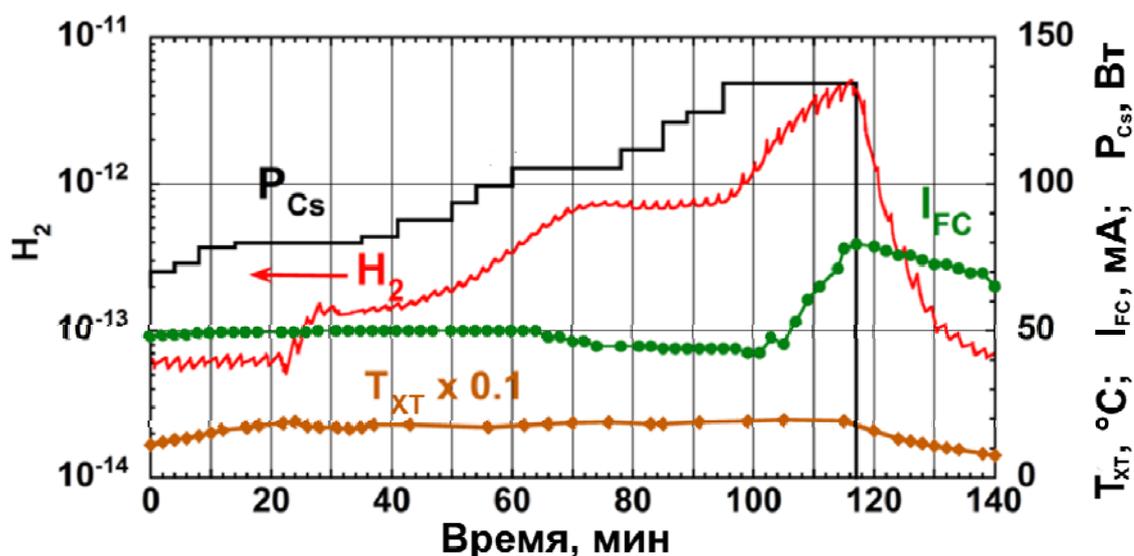


Рисунок 3.14. Эволюция тока пучка отрицательных ионов I_{FC} (круги) в течение выделения цезия на ХТ и подачи на ПЭ. P_{Cs} – мощность нагрева цезиевого контейнера, H_2 – характеризует давление водорода в баке, T_{CP} – температура ХТ контейнера (ромбы).

Как видно из рисунка 3.14 усиление генерации ОИ началось на 105 минуте. На 115 минуте произошло скачкообразное падение давления водорода в источнике ($\sim 4 \cdot 10^{-12} \rightarrow 3 \cdot 10^{-12}$), связанное с его откачкой цезиевой пленкой и уменьшением количества водорода в таблетках. Затем был выключен нагреватель контейнера, а охлаждение холодной точки было максимально усилено, чтобы остановить химическую реакцию в таблетках. Это привело к быстрому уменьшению давления водорода в источнике. Небольшое постепенное уменьшение тока пучка на ЦФ вызвано попаданием цезия в драйвер ВЧ разряда и уменьшением мощности, вкладываемой в плазму. Для уменьшения этого эффекта внутренние поверхности ВЧ драйвера (в том числе ЭФ), по видимому, следует поддерживать горячими при подаче цезия.

3.2.2 Исследование эффекта подачи цезия в источник

Основной характеристикой наличия цезия в источнике являлись эмиссионные токи источника. Исследовалось изменение эмиссионных токов источника после процедуры подачи цезия в источник, длительность полученного цезиевого эффекта на эмиссионные токи, и восстановление цезиевого эффекта на эмиссионные токи, и восстановление цезиевого эффекта на эмиссионные токи, и восстановление цезиевого эффекта на эмиссионные токи.

эмиссионные токи источника после его ухудшения из-за длинных пауз в работе, напуска атмосферы в источник, например, для установки ЭФ.

Изменение эмиссионных токов после подачи цезия. Характеристики источника исследовались для одноапертурного [44, 64] и многоапертурного режимов [53]. Сводка результатов, полученных в чисто-водородном и водородно-цезиевом режимах источника при вытягивании пучка ОИ с помощью многоапертурной и одноапертурной ИОС приведена в таблице 3.2. При многоапертурном вытягивании в чисто-водородном режиме был получен пучок ионов Н- током 0,35 А, в водородно-цезиевом режиме ток пучка возрастал до величины 1,2 А. Аналогичное, 3,5-кратное увеличение тока пучка ОИ наблюдалось при подаче цезия и при одноапертурном вытягивании. Эмиссионная плотность тока пучка, полученного при многоапертурном вытягивании была в 1,5-1.6 раза выше, чем при одноапертурном вытягивании. Увеличение эффективности генерации ОИ соответствовало 1,5-кратной большей мощности ВЧ разряда, применявшейся в первом случае, и свидетельствовало о пропорциональном росте тока пучка при переходе от одноапертурного к многоапертурному вытягиванию, т.е. об однородности генерации ОИ на большей части поверхности плазменного электрода как в чисто-водородном, так и в водородно-цезиевом режимах.

Таблица. 3.2 – Характеристики источника в чисто-водородном и водородно-цезиевом режимах с вытягиванием через одну и 21 эмиссионные апертуры

Параметр	1 апертура		21 апертура	
	без Cs	с Cs	без Cs	с Cs
Ток пучка, мА	10	35	350	1200
Эмиссионная плотность тока, мА/см ²	5	17	7,5	28,5
Ток сопутствующих электронов, А	0,2	0,035	1,6	1
Диаметр пучка, см	23	25		30 x 35
Угловая расходимость пучка, мрад		±60		±60

Рисунок 3.14 показывает, что распределённая подача цезия и нагрев плазменного электрода позволяют получить максимальный ток пучка сразу же после подачи цезия. Эмиссия ОИ в следующих выстрелах поддерживается перераспределением и восстановлением ранее созданного цезиевого покрытия,

которые ускоряются во время ВЧ разряда. Поддержание цезиевого покрытия плазменного электрода обеспечивается конструкцией ВЧ источника ИЯФ. Этому способствует то, что потенциал плазмы ВЧ разряда на 20-50 В выше потенциала стенок ВЧ драйвера и РК [55]. Интенсивная бомбардировка стенок драйвера и расширительной камеры быстрыми положительными атомами и ионами, ускоренными в пристеночном падении потенциала, позволяет распылять цезий из соединений и перераспределять его в результате ударной десорбции.

Исследование длительного эффекта улучшения работы источника после однократной подачи цезия. Однократная подача 0,5 г цезия обеспечивает долговременную работу источника. Работа источника при однократном выделении цезия из таблеток проиллюстрирована на рисунке 3.15. На нем показаны эволюции тока пучка ОИ I_b и тока сопутствующих электронов $I_e = I_{EG} + I_{AG}$, полученные в ежедневных заходах двухмесячного цикла работ. Выделенные области на графике показывают дни, в которые проводились заходы по получению пучка, пустые области соответствуют паузам в работе. Во время ночных пауз между ежедневными экспериментальными циклами источник оставался под откачкой (давление в источнике менее $1 \cdot 10^{-7}$ Па). В течение длинных пауз, таких как выходные и праздники, откачка источника останавливалась, а в источник напускался водород, который защищает цезиевое покрытие. Круги на рисунке 3.15 показывают максимальный ток пучка I_b , полученный в течение дневных заходов. Данные, полученные при номинальных параметрах работы, показаны на рисунке 3.15 закрашенными маркерами. Некоторые дневные заходы проводились с параметрами работы, отклоняющимися от номинальных. Данные в такие дни показаны пустыми маркерами.

Перед экспериментальным циклом, показанным на рисунке 3.15, источник был открыт на атмосферу, следы цезия на стенках ВЧ драйвера, и стенках расширительной камеры, оставшиеся после предыдущих подач, были отмыты водой. Первый экспериментальный заход был проведен до подачи цезия в источник, при этом максимальный полученный ток пучка составил 0,35 А (первая закрашенная область на рисунке 3.15). В начале второй недели было выделено

~0,5 г цезия (вертикальный прямоугольник Cs на рисунке 3.15), при выделении цезия температура ХТ была ~170 °С, поэтому часть цезия была сразу подана на плазменный электрод источника. Как видно из рисунка 3.15, первая подача цезия увеличила ток пучка ОИ на выходе из источника до 0,7 А, а ток сопутствующих электронов при этом уменьшился до 1,3 А. Увеличенная генерация ОИ наблюдалась в течение следующих двух недель (6 дневных заходов) без дополнительных подач цезия.

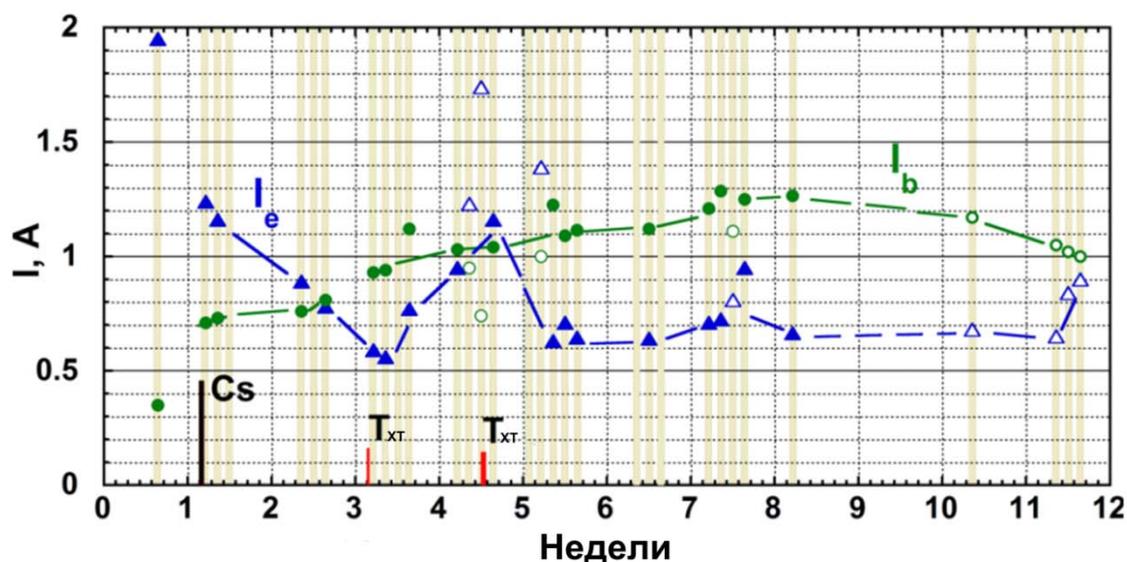


Рисунок 3.15. Эволюция тока пучка I_b (круги) и тока сопутствующих электронов I_e (треугольники) после однократного выделения цезия (прямоугольник “Cs”) и после двух дополнительных подач с холодной точки (прямоугольники “T_{ХТ}”)

На 4-й и 5-й неделе рабочего цикла были проведены дополнительные подачи цезия путем нагревания ХТ до температуры ~170°С на 20-30 минут (при этом не происходило дополнительного выделения цезия из таблеток). Они обозначены на рисунке 2 вертикальными полосками «T_{ХТ}». Добавление цезия на 4-й неделе привело к увеличению тока пучка до уровня 0,9 А и постепенному росту пучка до 1 А. Третье добавление цезия не отразилось на токе пучка к концу дневного захода, однако, в течение следующих 3-х недель ток пучка постепенно вырос до уровня 1,1-1,2 А. После третьей подачи цезия в источник генерация ОИ с током пучка 1 А поддерживалась в течение 7 недельного периода (18 дневных заходов).

В таблице 3.3 показаны три долговременных цикла работы на источнике с однократным выделением цезия (~0,5 г) в каждой. В первой колонке показан

номер цикла, во второй и третьей приведены значения тока пучка ОИ до и после ввода цезия, в четвертой и пятой ток сопутствующих электронов $I_e = I_{EG} + I_{AG}$ до подачи цезия и после подачи цезия. Шестая и седьмая колонки показывают число заходов и полное число импульсов, проведенных за полный рабочий цикл. В циклах #1 и #2 цезий подавался в источник 1 раз, а в цикле #3 цезий был 1 раз подан при его выделении, а затем были осуществлены две дополнительные подачи с помощью нагрева ХТ, как показано на рисунке 3.15.

Длительные заходы #1 и #2 демонстрируют возможность долговременной работы источника на однократной подаче цезия при использовании ВЧ драйвера с ЭФ, а заход #3 – при использовании ВЧ драйвера без ЭФ.

Таблица 3.3 – Токи пучка ОИ и сопутствующих электронов, полученные в длительных циклах с однократным выделением цезия.

Номер цикла	Ток пучка, А		Ток электронов, А		Продолжительность цикла	
	До	После	До	После	заходы	импульсы
#1	0,4	0,8	0,7	0,4	10	1070
#2	0,7	0,7	1,4	0,5	17	1127
#3	0,35	1,0	1,2	0,9	32	2516

Усиление генерации ОИ при нагреве плазменного электрода. На рисунке 3.16 показана типичная эволюция тока пучка на ЦФ при нагреве и охлаждении плазменного электрода. Было обнаружено, что нагрев плазменного электрода увеличивает ток ОИ, вытягиваемых из источника.

В случае многоапертурного вытягивания максимальный ток пучка наблюдался сразу после подачи цезия. В случае, показанном на рисунке 3.16, цезий был подан на горячий плазменный электрод (точка В). Ток пучка $I_{FC} \sim 76$ мА поддерживался постоянным в течение 19 последовательных выстрелов. Затем плазменный электрод был охлажден до температуры 50 °С, при этом ток пучка снизился на 14 % до 66 мА (точка С). После ночной паузы ток пучка снизился до 60 мА в первых выстрелах (точка А). Нагрев электродов до

температуры 186°C привел к постепенному росту тока пучка на 20 % до 76 мА, соответствующих максимальному току пучка (точка В).

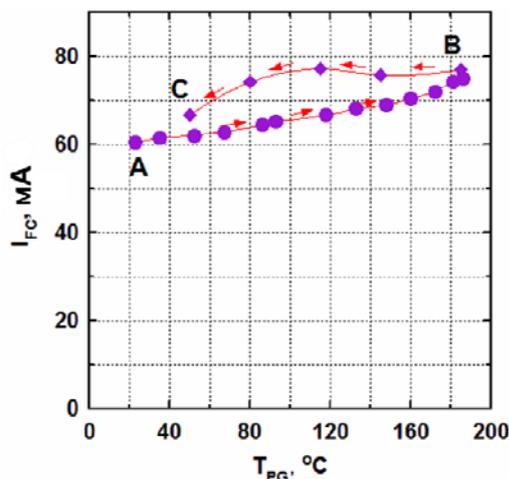


Рисунок 3.16. Эволюция тока пучка при нагреве и охлаждении электродов. Длительность импульсов 4-5 с, пауза между выстрелами 120 с. $P_{H2}=0,4$ Па, $P_{RF}=17$ кВт, $U_{PG}=15$ В.

Как видно из рисунка 3.16 более высокая скорость перераспределения и обновления цезиевого покрытия в случае горячего плазменного электрода приводит к увеличению генерации ОИ ~ 20 %.

Восстановление генерации ОИ после пассивации цезия. Пассивация цезиевого покрытия из-за напуска воздуха в источник или после смывания цезия водой были изучены для исследования деградации цезиевого эффекта. После напуска в источник воздуха (для ремонта, например, для замены ЭФ драйвера) в первых выстрелах вытягиваемый ток пучка ОИ был понижен, а ток сопутствующих электронов повышен. Было обнаружено, что последующие выстрелы с плазмой приводили к постепенному росту тока пучка до значений, полученных до отравления цезиевого покрытия.

Восстановление выхода ОИ из источника I_b и уменьшение тока сопутствующих электронов I_e с пассивированным цезием при выстрелах ВЧ плазмой показаны на рисунок 3.17. Данные, полученные при номинальных параметрах работы источника, показаны сплошными маркерами, а при отклонении от номинальных пустыми маркерами. В этом случае поданный цезий был пассивирован напуском воздуха в источник на ночь. В результате генерация ОИ была снижена до $I_b = 0,4$ А, а электронный ток I_e возрос до 1,1 А (как это

видно в первых выстрелах на рисунке 3.17). Последующие выстрелы на источнике с мощностью, вкладываемой в ВЧ разряд, $P_{RF} \sim 30\text{кВт}$ привели к постепенному увеличению тока пучка ОИ и уменьшению тока сопутствующих электронов. В результате 70 выстрелов ток пучка был увеличен до 0,6 А, а ток сопутствующих электронов снижен до 0,3 А.

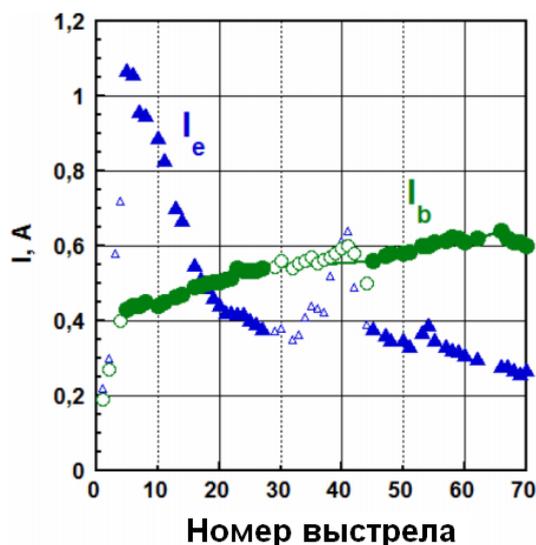


Рисунок 3.17. Эволюция тока пучка I_b (круги) и тока сопутствующих электронов I_e (треугольники) в течение первых импульсов с пучком после пассивации цезия напуском воздуха в источник на ночь. Сплошные маркеры — значения при номинальных параметрах, пустые маркеры — значения полученные при отклонении от номинальных параметров работы источника.

Эффективность восстановления цезиевого покрытия при выстрелах пучком показана в таблице 3.4. В таблице приведены 4 случая восстановления генерации ОИ при различных отравлениях цезиевого покрытия в источнике ОИ.

Способ отравления цезиевого покрытия показан в первых трех столбцах таблицы. В четвертом и пятом столбцах показан ток пучка до отравления цезиевого покрытия и максимальный ток пучка, полученный после отравления. В 6-м и 7-м столбцах показан ток сопутствующих электронов до напуска воздуха в источник и после восстановления цезиевого покрытия пучком. Количество выстрелов, сделанных для восстановления тока пучка ОИ, показано в последнем столбце таблицы. Важно отметить, что ток ОИ уменьшался в $1-5 \div 2$ раза при первых выстрелах после отравления воздухом (эти данные не включены в таблицу).

Для восстановления пучка ОИ в случае кратковременного наполнения воздухом до давления ~ 10 Па требовалось всего 7-13 выстрелов (смотри строки 1 и 2 в таблице 3.4), а для уменьшения тока сопутствующих электронов требовалось больше выстрелов.

Таблица 3.4 – Токи пучка ОИ и сопутствующих электронов, полученные до напуска воздуха в источник и после тренировки источника выстрелами с пучком.

	Напуск воздух		Ток пучка I_b , А		Ток электронов I_e , А		выстрелы
			До	После	До	После	
1	7 Па	10 с	0,6	0,5	0,4	1,2	7
2	15 Па	5 мин	0,5	0,5	0,2	1	13
3	0.5 Па	ночь	0,6	0,6	0,3	0,3	70
4	1 Атм.	ночь	0,7	0,8	0,4	0,4	85

В случае напуска воздуха на ночь (строки 3 и 4 в таблице 3.4), токи пучка и сопутствующих электронов были восстановлены за 70-85 выстрелов. Было также проверено восстановление генерации ОИ после очистки источника от цезия. Цезий и его соединения были смыты влажной тряпочкой с внутренней поверхности ВЧ драйвера, расширительной камеры и поверхности плазменного электрода. Выход ОИ в первые выстрелы после этой очистки имел в ~ 2 раза меньшее значение, а после ~ 330 выстрелов ток пучка был полностью восстановлен. Важно отметить, что в этом случае остатки пассивированного цезия могли сохраниться в слепых уголках ВЧ драйвера и расширительной камеры и в ионно-оптической системе источника.

3.2.3 Исследование механизмов восстановления цезиевого покрытия

Наблюдаемое длительное увеличение генерации ОИ после подачи цезия и восстановление генерации ОИ после пассивации цезия указывают на восстановление цезиевого покрытия на поверхности плазменного электрода во время выстрелов ВЧ разрядом. Восстановление может быть получено путем распыления и термической десорбции из толстых слоев цезия, накопленных в расширительной камере в ВЧ драйвере и распределительно-накопительной трубке.

Десорбция цезия с поверхности. Рассмотрим подробнее процессы, ответственные за поддержание оптимальных покрытий электродов ППИ цезием. Поверхностная концентрация цезия на электродах определяется скоростью адсорбции цезия из потока поступающего на поверхность и десорбцией с поверхности. Основные процессы удаления цезия с поверхности это термодесорбция, десорбция быстрыми частицами [65] и химическая десорбция. Отметим, что мобильность атомов цезия второго слоя значительно выше, чем в первом слое из-за того, что энергия связи атомов во втором слое заметно меньше [66]. Это позволяет поддерживать оптимальное субмонослойное цезиевое покрытие.

Термодесорбция. Плотность потока термодесорбции описывается формулой Френкеля

$$\frac{dN}{dt} = -Nw \exp(-H / T) \quad (3.10)$$

где N –поверхностная концентрация, w - эффективная частота колебаний адсорбированной частицы на поверхности (для цезия на чистой поверхности тугоплавких металлов $w \sim 10^{12} \text{ с}^{-1}$), T - температура поверхности, H – теплота десорбции цезия. (3 эВ для чистой поверхности, $\sim 1,5$ эВ при оптимальном покрытии, 0,75 эВ при покрытии более монослоя [35]). Скорость термодесорбции цезия при увеличении температуры с 27° до 120° увеличивается в 1000 раз для покрытий порядка монослоя [66]. Поток цезия из субмонослойных покрытий на несколько порядков ниже, чем из многослойных покрытий. Таким образом, толстые цезиевые покрытия, образовавшиеся в паузе на холодных местах РК, могут быть источником цезия при нагреве этих мест разрядом.

Десорбция быстрыми частицами плазмы. Во время разрядного импульса десорбция цезия с поверхности может произойти также при бомбардировке быстрыми частицами из разряда H^+ , H_2^+ , H_3^+ , Cs^+ и быстрыми нейтралами. Максимальная энергия W , которая может быть передана адсорбированному атому цезия налетающей быстрой частицей с энергией E , имеет величину:

$$W = E \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma) \quad (3.11)$$

$$\gamma = \frac{4 \cdot m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \quad (3.12)$$

Где m_1 – масса падающей частицы, а m_2 – масса покоящейся частицы. Таким образом, пороговая энергия ударной десорбции задаётся формулой

$$E_{\text{порог}} = \frac{E_{\text{связи}}}{\gamma(1-\gamma)} \quad (3.13)$$

Энергия связи может быть обусловлена теплотой десорбции металлического цезия, теплотой десорбции химических соединений цезия или энергией связи химических соединений. Энергия связи $E_{\text{связи}} \sim 1$ эВ, масса протона 1 а.е.м. масса цезия 133 а.е.м., таким образом, для физического распыления цезия необходимы протоны с энергиями >26 эВ. Такими энергиями могут обладать ионы, ускоренные пристеночным падением потенциала в ВЧ драйвере, а также в РК вблизи ВЧ драйвера. Гораздо большей энергией обладают вторичные ионы, ускоренные в вытягивающем и ускоряющем зазорах. Они образуются за счет ионизации молекул остаточного газа ионами пучка, а их энергия определяется местом в ИОС, где они образовались. Типичная энергия этих ионов порядка нескольких кэВ.

Поддержание цезиевого покрытия. В условиях сильноточного разряда величина покрытия катода цезием θ определяется соотношением между скоростью захвата и распыления цезия. Изменение концентрации цезия на поверхности при цезиевом покрытии менее монослоя описывается формулой 3.14. Увеличение концентрации цезия на поверхность обусловлено захватом цезия из потоков ионов и атомов, а уменьшение распылением цезия находящегося на поверхности быстрыми атомами и ионами цезия и водорода.

$$N_{\text{Cs}} \frac{d\theta}{dt} = (1-\theta)(\alpha_+ q_{\text{Cs}^+} + \alpha_0 q_{\text{Cs}_0}) - \theta(\gamma_{\text{Cs-Cs}} q_{\text{Cs}^+} + \sum_i \gamma_{\text{Cs-H}_i} q_{\text{H}_i}) \quad (3.14)$$

где N_{Cs} – концентрация атомов цезия на поверхности, соответствующая монослою, t - время q_{Cs^+} - поток ионов цезия, q_{Cs_0} - поток атомов цезия и q_{H_i} - поток ионов водорода (атомарных и молекулярных), $\gamma_{\text{Cs-Cs}}$, $\gamma_{\text{Cs-H}_i}$ - коэффициенты распыления адсорбированного на поверхности цезия падающими ионами и

атомами цезия и водорода, α_+ , α_0 коэффициенты характеризующие захват цезия в пересчете на падающий ион и атом цезия соответственно. В течение импульса разряда $q_{Cs^+} \gg q_{Cs^0}$, и решение уравнения 3.14 принимает вид:

$$\theta = \theta_{eq} - (\theta_{eq} - \theta_0) \exp(-t / \tau_{eq}) \quad (3.15)$$

где величины θ_{eq} и τ_{eq} характеризуют величину и время установления равновесное покрытие катода цезием:

$$\theta_{eq} = \left[1 + \frac{\gamma_{Cs-Cs}}{\alpha_+} + \frac{\sum \gamma_{Cs-H_i}}{\alpha_+ q_{Cs^+}} \right]^{-1} \quad (3.16)$$

$$\tau_{eq} = \frac{N_{Cs}}{(\alpha_+ + \gamma_{Cs-Cs}) q_{Cs^+} + \sum_i \gamma_{Cs-H_i} q_{H_i}} \quad (3.17)$$

Как было написано выше, массы и энергии ионов водорода не достаточно для распыления покрытий цезия меньше монослоя, поэтому основное распыление цезия обусловлено распылением быстрыми ионами и атомами цезия из разряда. В случае, когда атомные массы материала и распыляемого вещества сравнимы (при распылении цезия цезием), коэффициент распыления может быть оценен по формуле 3.18 [85]. Подставив энергию ионов цезия $E_i \sim 2В$, $E_{порог} = E_{связи} \sim 1 \text{ эВ}$, $M_1 = M_2 = 133$, получим $\gamma_{Cs-Cs} = 0,3$.

$$\gamma_{sput} = \frac{0,06}{E_{связи}} \sqrt{M'} (\sqrt{E_i} - \sqrt{E_{порог}}) \quad (3.18)$$

$$M' = \frac{2M_2}{(M_1 / M_2)^{2/3} + (M_1 / M_2)^{2/3}} \quad (3.19)$$

В случае толстых слоев цезия энергия связи и порог энергии, необходимой для распыления цезия, имеют значения ниже, чем для тонких слоев. Положительные ионы, ускоряемые пристеночной разницей потенциалов на стенке ВЧ драйвера и расширительной камеры, легко распыляют цезий из толстых слоёв [68], а цезий из тонких слоёв, образующихся на плазменном электроде, они распыляют хуже. Подстановка коэффициентов $\alpha_+ \sim 0.4$ [65] и $\gamma_{Cs-Cs} \sim 0,3$, $\gamma_{Cs-H_i} = 0$ (так как энергии водорода вблизи ПЭ не достаточно для распыления цезия) измеренных значений потока цезия на ПЭ $q_{Cs^+} = 3 \cdot 10^{13} \text{ 1/см}^2 \cdot \text{с}$ и $N_{Cs} \sim 4.5 \cdot 10^{14}$ в формулу 3.18 показывает, что в равновесное покрытие ПЭ цезием

имеет величину $\theta_p \sim 0,6$ от монослойного и достигается за время $\tau_p = 4$ с. Такая толщина покрытия является оптимальной для генерации ОИ на поверхности [35].

Уменьшение количества активного цезия в рабочей зоне разряда приводит к уменьшению потока цезия на ПЭ, что в соответствии с формулой 3.17 увеличивает время образования цезиевого покрытия. Таким образом для получения пучка ОИ необходимо обеспечивать необходимое количество цезия в РК. Уход цезия обусловлен перераспределением цезия из эмиссионной зоны РК в ВЧД, на периферию РК и через эмиссионные отверстия в ИОС.

В момент выключения разряда происходит активное перераспределение цезия накопленного в РК за-счет термодесорбции. Цезий оседает на внутренних поверхностях ВЧД, РК и ИОС. Выход цезия из ВЧД обратно в РК обусловлен его распылением во время разряда, так как высокий положительный потенциал ВЧ плазмы по отношению к стенкам драйвера [67] обуславливает необходимый поток высокоэнергетичных частиц. Цезий может оказаться на поверхности, которая находится вдали от плазмы, где его перераспределение за-счет распыления будет затруднено. В этом случае, основным механизмом возврата цезия в область эмиссии ОИ будет термодесорбция, поэтому необходимо обеспечивать высокую температуру внутренних поверхностей РК.

Цезиевое покрытие плазменного электрода также ухудшается при отравлении остаточным газом в паузе между импульсами источника и поглощением водорода во время фазы разряда. Распыление отравленного цезия и разрушение цезий-содержащих соединений, возможно, происходит быстрыми положительными ионами, образованными при транспортировке пучка в ИОС и ускоренными в источник, которые попадают в плазменную камеру во время выстрела пучка. Восстановленный путем распыления быстрыми положительными ионами цезий, осаждается внутри источника, а затем может распыляться быстрыми ионами из плазмы.

Распределительно-накопительная трубка прикрывает накопленный в ней цезий от распыления частицами плазмы. Поэтому внутри распределительной трубки цезий может накапливаться в виде многослойного покрытия с малой

энергией десорбции. Выход цезия из трубки определяется его давлением внутри неё. Нагрев распределительной трубки ВЧ разрядом приводит к увеличению её температуры, и усиливает термодесорбцию цезия, увеличивает давление цезия внутри трубки и обеспечивает дополнительный приток цезия в РК и на плазменный электрод.

Поддержание интенсивной генерации ОИ в течение продолжительных циклов после однократной 0,5 г подачи цезия свидетельствует о пониженном расходе цезия в ВЧ разрядах с распределенной подачей через малые отверстия, что может быть вызвано низкой скоростью загрязнения цезия в распределительных трубках и его плавным выводом через малые отверстия распределительных трубок.

3.3 Увеличение высоковольтной прочности ИОС источника

Как было показано в разделе 3.1, для уменьшения осаждения пучка ОИ на электродах ИОС и получения пучка с низкой угловой расходимостью требуется прикладывать высокое напряжение ~ 10 кВ на вытягивающий и ~ 100 кВ на ускоряющий электроды ИОС. Для поддержания необходимой высоковольтной прочности предприняты как стандартные, так и отличительные меры (см. раздел 2.2). Как было показано в разделе 3.2, для усиления генерации ОИ в источник подаётся цезий. Разработана методика повышения высоковольтной прочности источника [47].

3.3.1 Особенности поддержания высоковольтной прочности при работе с цезием

В источнике используется цезий, который усиливает поверхностную генерацию ОИ и уменьшает температуру электронов в разряде, уменьшая ток сопутствующих электронов. Вынос цезия из РК, который в основном происходит во время пауз между импульсами, приводит к его накоплению на холодных электродах ИОС [69]. Осаждение цезия на электродах усиливает процессы

вторично-электронной эмиссии, адсорбции водорода, испарения и распыления цезия. Это приводит к ухудшению высоковольтной прочности ИОС источника и примыкающего ускорителя. Это обуславливает необходимость проведения длительной (несколько дней) тренировки ИОС больших источников ОИ до требуемых напряжений [70]. Ранее было обнаружено, что нагрев электродов ИОС улучшает высоковольтную прочность в компактных источниках ОИ с подачей цезия [63].

Для увеличения высоковольтной прочности и поддержания высокого напряжения ($U_{ac}+U_{ex}=110+10$ кВ) на зазорах ИОС при работе с цезием были применены следующие меры. Во-первых, в вытягивающем (между плазменным и вытягивающим электродом) и ускоряющем (между вытягивающим и ускоряющим электродом) зазорах создано вогнутое магнитное поле, которое препятствует возникновению пеннинговских ловушек в зазорах ИОС. Предотвращается захват электронов и их колебания вдоль магнитных силовых линий, что препятствует развитию электронных лавин в зазорах. Во-вторых, на вытягивающем электроде сделан внутренний карман, перехватывающий отклоненные магнитным полем сопутствующие пучку электроны до их ускорения на полную энергию. В-третьих, был применен активный контроль температуры плазменного и вытягивающего электродов ионно-оптической системы прокачкой теплоносителя через каналы, просверленные в электродах.

Все системы питания были оборудованы защитой для выключения напряжения в случае перегрузки по току или неуправляемого снижения напряжения. Чтобы ограничить энергию, выделяемую на электродах во время пробоев, на токоведущие цепи установлены снабберы. Далее под термином «пробой» понимается внезапная перегрузка тока или падение напряжения на вытягивающем или ускоряющем электроде.

3.3.2 Влияние нагрева ИОС на высоковольтную прочность вытягивающего и ускоряющего зазоров

Накопление цезия на электродах ИОС может приводить к снижению электрической прочности высоковольтных зазоров ИОС и затруднять получение интенсивных пучков ОИ высокой энергии в источниках с большой поверхностью эмиссии. Одной из мер, предпринятых для предотвращения накопления цезия в ИОС и повышения высоковольтной прочности ВЧ источника ИЯФ, было введение нагрева его плазменного и вытягивающего электродов.

Процедура тренировки электродов ИОС с постепенным увеличением вытягивающего и ускоряющего напряжения необходима в начале работы после напуска в источник атмосферы или после длинных пауз. В начале проводилась тренировка без пучка, путем приложения высокого напряжения на электроды постоянного высокого напряжения или 2-3 с импульсами с паузой 18 с между импульсами. Затем осуществлялся постепенный подъем полного напряжения при вытягивании пучка. Нагрев электродов ИОС горячим теплоносителем значительно облегчил процедуру тренировки электродов ИОС и увеличил электрическую прочность зазоров ИОС.

Улучшение высоковольтной прочности ИОС в вакууме при нагреве. Тренировка вытягивающего зазора ИОС после длинных пауз без напуска воздуха в источник не требовала нагрева электродов. Таким образом, для получения напряжения в вытягивающем зазоре 12 кВ требовалось всего несколько импульсов, при этом пробоев не наблюдалось.

Скорость подъема напряжения на 49 мм ускоряющем зазоре (обусловленная скоростью тренировки ускоряющего и вытягивающего электродов) зависела от вида паузы: после ночной остановки - несколько выстрелов, после напуска воздуха в источник или длинной остановки ~100 импульсов. Как правило, скорость тренировки электродов была выше при нагретых электродах.

На рисунке 3.18 показан пример тренировки ускоряющего зазора ИОС в вакууме, проведенной в длительном цикле после однократной подачи цезия с получением пучка 1 А, 86 кэВ. Тренировка проводилась после четырехдневной

паузы в работе. Импульсы ускоряющего напряжения показаны на рисунке 3.18 треугольниками, значения прикладываемого напряжения показаны на левой оси. Пустыми треугольниками обозначены импульсы без пробоя, черными кругами импульсы с пробоем, красными закрашенными треугольниками - с пробоем и восстановлением к концу импульса, фиолетовой линией показана температура нагревающей жидкости. Вытягивающее напряжение в этом случае было 9,5 кВ.

Как видно из рисунка 3.18, напряжение на ускоряющем электроде ИОС $U_{ac} = 52$ кВ и $U_{ac} = 65$ кВ было получено за первые два импульса ускоряющего напряжения. Продолжительной тренировкой ускоряющего зазора ИОС, проведенной без нагрева электродов (импульсы # 1 ÷ 190 рисунке 4) было достигнуто поддержание напряжения на ускоряющем зазоре величиной $U_{ac} = 72$ кВ. Нагрев плазменного и вытягивающего электродов до температуры 110 °С (график Т на рисунке 4) вызвал стабильное улучшение высоковольтной прочности: в течение 50 тренирующих импульсов ускоряющее напряжение было увеличено до 82 кВ, причем в этой серии импульсов лишь в восьми наблюдались пробои.

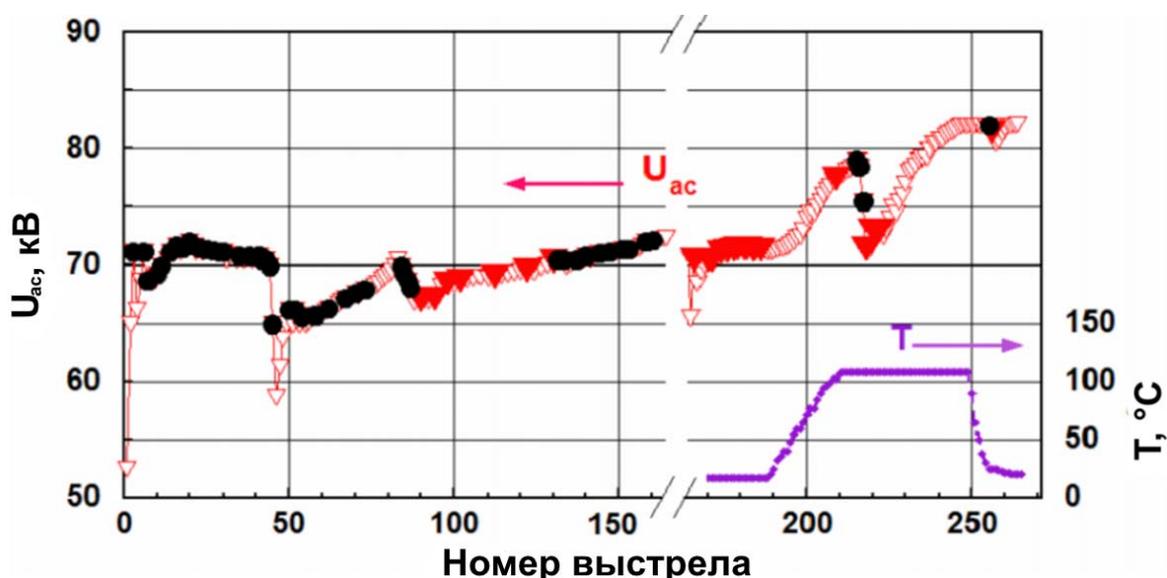


Рисунок 3.18. Тренировка ускоряющего зазора импульсами ВН в вакууме после 4х дневной паузы между регулярными заходами: U_{ac} - ускоряющее напряжение (пустые треугольники – импульсы без пробоев, черные треугольники – импульсы с пробоем, сплошные треугольники – импульсы с пробоем и восстановлением к концу импульса), Т- температура вытягивающего и плазменного электрода.

Гораздо меньшее время для тренировки электродов потребовалось после следующей короткой ночной остановки. После нагрева электродов до температуры 110°C ускоряющее напряжение было поднято до 82 кВ за 25 импульсов (2 с пробоями).

Пример тренировки ускоряющего зазора (вытягивающего и ускоряющего электродов) без плазмы проведенной после 2 дневной паузы в атмосфере водорода после захода с пучком 1,3 А и энергией 86 кэВ показан на рисунке 3.19. В этом случае источник также работал с цезием, напущенным месяц назад. Верхняя кривая $U = U_{\text{ex}} + U_{\text{ac}}$ показывает прикладываемое полное напряжение. Нижняя кривая T показывает температуру теплоносителя, греющего электроды.

Как видно из рисунка 3.19 напряжение до 110 кВ было поднято за 55 импульсов без нагрева ИОС. После пробоя ВВ прочность уменьшилась и тренировка «застряла» на уровне 95 кВ. В течение 46 последовательных выстрелов не удавалось поднять выше 95 кВ. После нагрева электродов ИОС до температуры 120°C напряжение ускорения было поднято до 110 кВ за 30 импульсов. После последующих детренирующих пробоев #126, #130 высоковольтная прочность восстанавливалась за 5-15 импульсов.

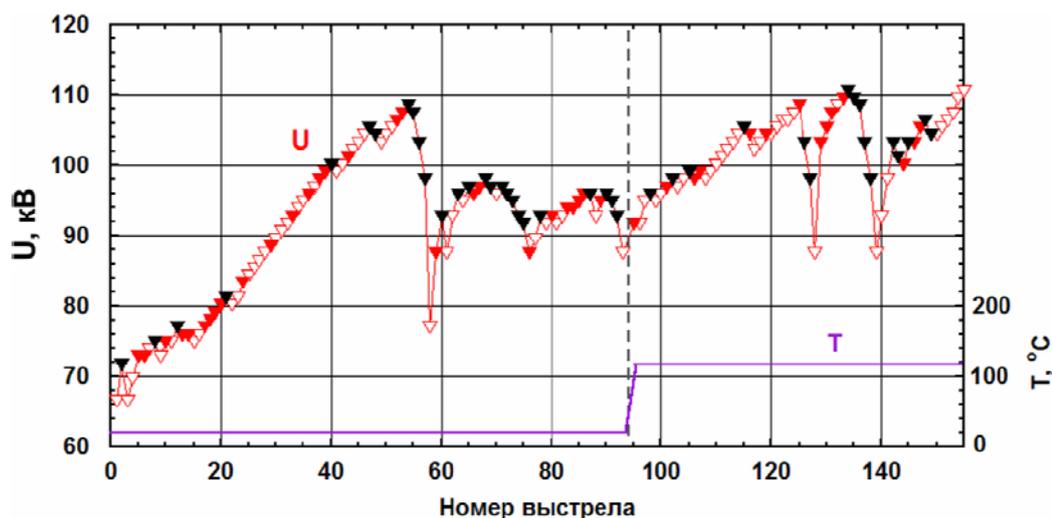


Рисунок 3.19. Тренировка ускоряющего зазора импульсами ВН в вакууме после 2х дневной паузы между регулярными заходами: U_{ac} - ускоряющее напряжение (пустые треугольники – импульсы без пробоев, черные треугольники – импульсы с пробоем, сплошные треугольники – импульсы с пробоем и восстановлением к концу импульса), T - температура вытягивающего и плазменного электрода.

На следующий день при подъеме напряжения на горячих электродах ($T = 120^{\circ}\text{C}$) полное напряжение 110 кВ было поднято за 25 выстрелов (7 с пробоями и восстановлением ускоряющего напряжения к концу импульса).

Улучшение высоковольтной прочности ИОС при нагреве при работе с пучком. Дальнейший подъем вытягивающего и ускоряющего напряжения на зазорах ИОС до требуемых величин проводился выстрелами с вытягиванием пучка ОИ. Пробои в присутствии пучка происходили при напряжениях меньше достигнутого при тренировке в вакууме. Тренировка с пучком для уменьшения количества детренирующих пробоев проводилась также с постепенным увеличением вытягивающего и ускоряющего напряжений. Длительность тренировочных выстрелов составляла 2-3 с, а пауза между выстрелами была 2-3 минуты. Высоковольтная прочность в присутствии пучка была ниже, чем при тренировке в вакууме. Для ускорения тренировки с пучком обычно применялся предварительный нагрев плазменного и вытягивающего электродов.

Вытягивающий зазор. Нагрев электродов ИОС горячим теплоносителем значительно облегчает процедуру тренировки электродов ИОС и увеличивает электрическую прочность вытягивающего зазора ИОС с пучком.

На рисунке 3.20 приведен пример процедуры тренировки вытягивающего зазора источника при работе с вытягиванием ионного пучка. Предварительно тренировкой электродов в вакууме было достигнуто поддержание высокого напряжения величиной 12 кВ. При работе с вытягиванием пучка, несмотря на значительное последовательное понижение приложенного напряжения, в 11 выстрелах из 12, наблюдались пробои (#1-7, 9-12 на рисунке 3.20). Нагрев плазменного и вытягивающего электродов ускорил тренировку вытягивающего зазора и позволил получить номинальное вытягивающее напряжение 10 кВ в течение 10 последующих 2 секундных тренирующих импульсов.

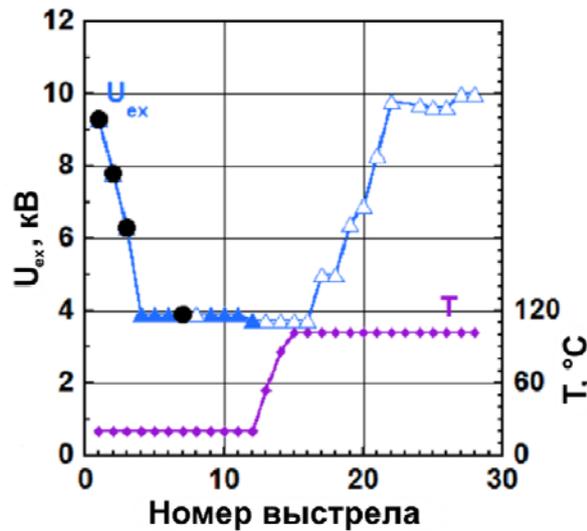


Рисунок 3.20. Ускорение тренировки вытягивающего зазора при нагреве плазменного и вытягивающего электродов. $U_{\text{экз}}$ - напряжение на вытягивающем зазоре. Пустые маркеры - импульсы без пробоев, сплошные треугольники - с пробоями и восстановлением напряжения, кружки - с пробоями без восстановления напряжения. T - температура электродов. Тренировка проводилась после 5 дневной паузы с напуском водорода в источник.

Ускоряющий зазор. Эксперименты показывают, что нагрев электродов также облегчает тренировку ускоряющего зазора (вытягивающего и ускоряющего электродов) с пучком. Длительность тренировки ускоряющего зазора с пучком зависит от продолжительности паузы перед тренировкой, от температуры электродов в течение предыдущего захода на источнике. На рисунке 3.21 показаны примеры тренировки ускоряющего зазора с пучком, проведенные после разных пауз. В обоих случаях была проведена предварительная тренировка ускоряющего зазора в вакууме до напряжения 74 кВ при напряжении вытягивания 7,2 кВ. В первом случае тренировка проводилась после 5 дневной паузы (выстрелы #1-26 на рисунке 3.21), температура плазменного и вытягивающего электродов в этом случае была ~ 110 °C. Ускоряющее напряжение 71 кВ было поднято за 19 тренировочных выстрелов с пучком, в одном из них произошел пробой. Во втором случае, показанном на рисунке 3.21, тренировка проводилась при температуре плазменного и вытягивающего электродов ~ 20 °C (выстрелы #130-170). В этом случае то же напряжение в ускоряющем зазоре было получено за 31 тренировочный выстрел, причем в 8 из них произошел пробой. Тренировочные выстрелы #131-165, проведенные после ночной остановки, и

выстрелы #110-130, проведенные в конце предыдущего дня (не показаны на рисунке 3.21), были проведены при холодных электродах ИОС.

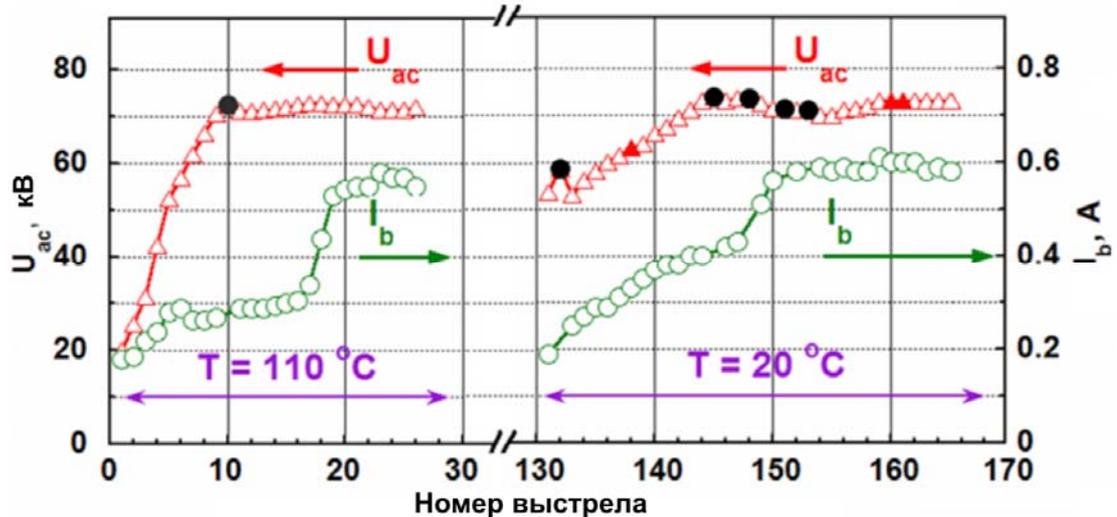


Рисунок 3.21. Ускорение тренировки ускоряющего зазора с пучком, проводимой с горячими и холодными электродами: U_{ac} — напряжение на ускоряющем зазоре (пустые треугольники — выстрелы без пробоев, закрашенные кружки — выстрелы с пробоями, закрашенные треугольники — выстрелы с пробоями и восстановлением ускоряющего напряжения до конца выстрела), I_b — ток пучка, T — температура плазменного и вытягивающего электродов. Выстрелы #1-26 проведены после 5 дней паузы в работе, #131-165 — после ночной паузы. Работа на накопленном цезии.

Отметим, что если в конце предыдущего дня последние импульсы проводились с горячими плазменным и вытягивающим электродами ИОС, то тренировка ИОС в начале следующего захода проходила быстрее. Таким образом, если в конце предыдущего дня температура плазменного и вытягивающего электродов была >100 °C, после ночной паузы подъем напряжения в ускоряющем зазоре до напряжения ускорения $U_{ac} \sim 70$ кВ требовал всего 1-5 выстрелов (даже без нагрева электродов). В течение ежедневных заходов на источнике при работе на запасенном цезии тренировки ускоряющего зазора в вакууме после ночной остановки было достаточно для получения пучка на источнике без нагрева ИОС и без тренировки ускоряющего и вытягивающего зазора в присутствии пучка (при выстрелах пучка на уровне тока $I_b \sim 0,7$ А, с энергией $U_b = 80$ кэВ, и длительностью импульса 2 с).

Достаточная высоковольтная прочность поддерживалась в течение регулярных заходов на накопленном цезии, при этом 98% выстрелов при

оптимальных параметрах работы проходит без пробоев. При экспериментальном последовательном изменении параметров работы источника количество выстрелов с пробоями увеличивается до $\sim 10\%$.

Тренировка с пучком без предварительной тренировки в вакууме. Процедура подъема напряжения на электродах ИОС до 117 кВ с пучком после предварительной тренировки в вакууме, при которой напряжение на ускоряющем зазоре было поднято до 111 кВ, проиллюстрирована на рисунке 3.22. Полное напряжение на электродах ИОС $U = U_{ac} + U_{ex} = 98 + 12$ кВ было поднято за 24 выстрела, в 8 из них были пробой. При $U > 110$ кВ тренировка замедлилась, на уровне 117 кВ удавалось работать импульсами 0,4 – 0,7 с. Видно, что при отсутствии первичной тренировки ускоряющего зазора в вакууме тренировка с пучком требует больше времени.

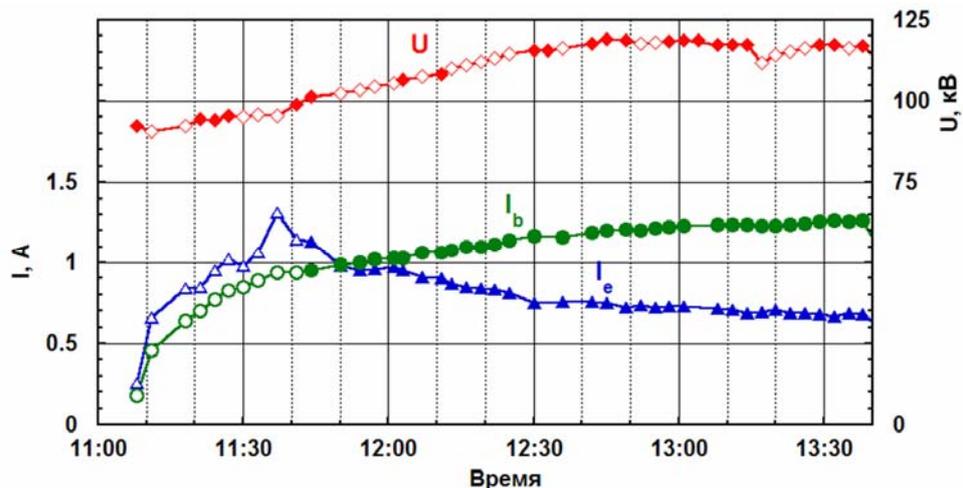


Рисунок 3.22. Подъем ускоряющего напряжения после тренировки в вакууме. U – полное напряжение ИОС ($U_{ex} + U_{ac}$): незалитые ромбики – выстрелы без пробоя, сплошные ромбики – выстрелы с пробоями. I_b – ток пучка ОИ, I_e – ток электронов в вытягивающем зазоре в течение импульса, пустые маркеры соответствуют токам при стандартных параметрах ($U_{PG} = 10,5$ В, без экрана $P_{RF} = 35$ кВт, $N_2 = 0,4$ Па, $U_{ex} = 12,5$ кВ), пустые маркеры показывают постепенный выход на стандартные параметры работы источника. Температура плазменного и вытягивающего электрода 120°C

3.3.3 Механизм восстановления высоковольтной прочности при нагреве

В результате накопления цезия на электродах ИОС ухудшается ВВ прочность зазоров источника, что увеличивает длительность тренировки источника с цезием. Это связано с образованием цезиевых слоев на

металлических электродах. Цезиевые слои уменьшают работу выхода электронов, увеличивают вторичную электронную эмиссию и экспоненциально увеличивают автоэлектронную эмиссию. Повышенный ток полевой эмиссии может являться причиной пробоя в вакууме, а увеличенная вторичная эмиссия усиливает образование электронных лавин [71].

Количество цезия, адсорбированного на электродах ИОС, зависит от соотношения входящего потока цезия из РК источника и выходящего потока цезия на периферию электродов ИОС. Накопление цезия на электродах ИОС происходит главным образом во время пауз между импульсами и зависит от количества и распределения цезия в плазменной камере, продолжительности паузы, температуры электродов и давления защитного газа в источнике. Нагрев электрода облегчает поверхностную диффузию и термическую десорбцию. Это может приводить к обеднению покрытия цезия на электродах ИОС, если поток цезия из плазменной камеры мал. Именно этот случай реализуется в исследуемом источнике. Увеличение скорости тренировки электродов в вакууме, наблюдаемое при нагреве ИОС (рисунок 3.18 и 3.20), может быть вызвано истощением покрытия цезия на плазменном и вытягивающем электродах. ВВ прочность зазоров ИОС ниже в случае формирования и ускорения пучка (рисунок 3.21) из-за вытягивания вторичных частиц и их размножения, которое усиливается на поверхностях при покрытии цезием. Тренировка зазоров ИОС пучком уменьшает покрытие цезия на электродах ИОС, оно также уменьшается при нагреве электродов (рисунок 3.21). Перераспределение цезия разрядом обеспечивает возобновление покрытия цезия на поверхности плазменного электрода (см. раздел 3.2). Это необходимо для получения пучка ОИ, но также увеличивает поток цезия на вытягивающий и ускоряющий электроды ИОС. Нет необходимости в нагреве электродов ИОС во время регулярной работы источника на запасенном цезии в режиме 2-10 с выстрелах при паузе между выстрелами 3-5 минут. ВВ прочность сохраняется в этом случае, несмотря на повышенный поток цезия из расширительной камеры в результате удаления цезия потоками вторичных положительных ионов из ИОС. Как показано на рисунке 3.21, нагрев электрода

облегчает удаление цезия и ускоряет тренировку электродов пучком. Нагрев электродов, выполненный во время захода перед ночной остановкой, обеспечивает облегчение высоковольтной тренировки на следующий день. Это также подтверждает усиленное удаление цезия из зоны пучка ИОС в случае горячих электродов.

3.4 Исследование влияния потенциала плазмы в ВЧ драйвере на характеристики источника

Небольшое положительное напряжение смещения, поданное на плазменный электрод U_{PG} по отношению к аноду газоразрядной камеры, уменьшает поток сопутствующих электронов в источниках с магнитным фильтром [72, 73]. Был изучен эффект положительного напряжения смещения плазменного электрода относительно стенок РК U_{PG} путем сравнения эмиссионных токов источника: при различных конфигурациях ВЧ драйвера, при различных давлениях водорода в источнике, и при работе без цезия и после его подачи [74].

3.4.1 Влияние потенциала плазмы на зависимость тока пучка от напряжения на плазменном электроде

Зависимости эмиссионных токов от потенциала на плазменном электроде U_{PG} имеют сходные тенденции во всех тестируемых вариантах, как показано на рисунках 3.23-3.25. Ток в цепи выпрямителя плазменного электрода I_{PG} (далее плазменный ток), обусловлен токами ионов и электронов, текущими из плазмы на плазменный электрод, увеличивается с ростом потенциала, прикладываемого на плазменный электрод U_{PG} . Ток в цепи выпрямителя вытягивающего напряжения I_{ex} , ток сопутствующих электронов I_e и ток пучка I_b уменьшались с ростом напряжения на плазменном электроде U_{PG} .

Влияние увеличенной подачи водорода в источник на зависимость эмиссионных токов источника от напряжения на плазменном электроде. Влияние давления водорода на зависимости эмиссионных токов от напряжения смещения на плазменном электроде проиллюстрировано на рисунке 3.23. На нем

приведены данные при давлении водорода в источнике 0,3 Па (незакрашенные маркеры) и 0,4 Па (закрашенные маркеры) для источника с цезием (в обоих случаях использовался драйвер без ЭФ).

В обоих случаях давления водорода в источнике были получены аналогичные максимальные значения тока пучка $I_b \sim 1$ А, тока сопутствующих электронов $I_e \sim 1,5$ А и плазменного тока $I_{PG} \sim 30$ А. В случае более низкого давления водорода для получения максимального плазменного тока и тока пучка было необходимо прикладывать напряжение на плазменном электроде U_{PG} на ~ 4 В больше. Кроме того, видно, что все зависимости, полученные для давления 0,3 Па, были одинаково сдвинуты на 4 В вдоль оси потенциала плазменного электрода по сравнению с зависимостями, полученными для давления 0,4 Па.

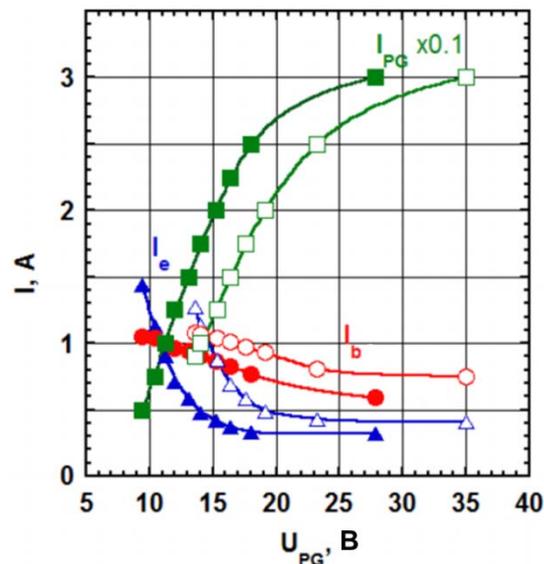


Рисунок 3.23. Ток пучка ОИ I_b (круги), ток сопутствующих электронов I_e (треугольники), и плазменный ток I_{PG} (квадраты) в зависимости от потенциала на плазменном электроде U_{PG} . Закрашенные маркеры – давление водорода 0,4 Па, $P_{RF} = 34$ кВт, незакрашенные маркеры - давление 0,3 Па, $P_{RF} = 32$ кВт. ВЧ драйвер без ЭФ, цезий подан.

Аналогичные тенденции зависимостей эмиссионных токов от напряжения смещения на плазменном электроде были получены в источнике для значений давления водорода 0,3 и 0,4 Па в режиме работы источника с отмытыми от цезия внутренними поверхностями ВЧ драйвера и расширительной камеры. Был зарегистрирован тот же сдвиг зависимостей эмиссионных токов на 4 В вдоль оси

потенциала U_{PG} . В этом случае был получен максимальный ток пучка $I_b \sim 0,4$ А и плазменный ток $I_{PG} \sim 25$ А для обоих давлений водорода в источнике P_{H_2} .

Влияние подачи цезия на зависимость эмиссионных токов источника от напряжения на плазменном электроде. Влияние цезия на зависимости эмиссионных токов от напряжения смещения U_{PG} показано на рисунке 3.24. На нем показаны данные полученные при активном и при смыве (с плазменного электрода и расширительной камеры) цезии (драйвер без ЭФ, давление водорода в источнике 0,4 Па). Как видно из рисунка 3.24, значение максимального тока пучка для источника с активным цезием примерно в 2.5 раза выше, а максимальный плазменный ток I_{PG} в этом случае в 1.2 раза больше. В случае смыва цезия ток сопутствующих электронов I_e был в 1,5 раза больше.

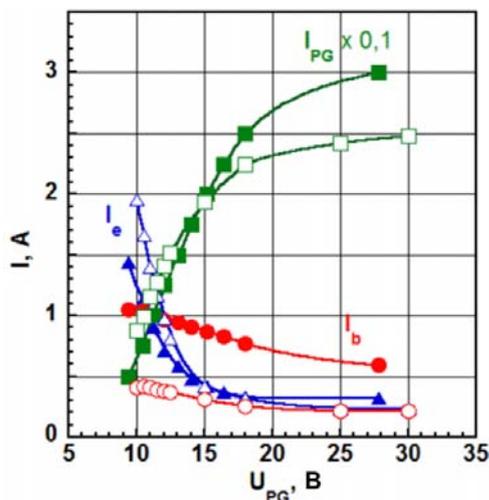


Рисунок 3.24. Зависимость тока пучка ОИ I_b (кружки), тока сопутствующих электронов I_e (треугольники), и плазменного тока I_{PG} (квадраты) от напряжения смещения на плазменном электроде U_{PG} . Закрашенные маркеры – активный цезий, незакрашенные маркеры – смывтый цезий. ВЧ драйвер с ЭФ. Давление водорода в источнике 0,4 Па, мощность ВЧ разряда 32 кВт.

Влияние фарадеевского экрана драйвера на зависимость эмиссионных токов источника от напряжения на плазменном электроде. Влияние установки ЭФ в ВЧ драйвер на зависимости эмиссионных токов от напряжения смещения на плазменном электроде U_{PG} показано на рисунке 3.25. На нем показаны данные для источника с и без ЭФ (активный цезий, давление P_{H_2} 0,4 Па). При обеих конфигурациях ВЧ драйвера получены аналогичные зависимости эмиссионных токов от потенциала на плазменном электроде U_{PG} и одинаковые максимальные

значения тока пучка I_b и плазменного тока I_{PG} . Для получения максимального тока пучка и плазменного тока в случае драйвера с экраном прикладывалось примерно на 7 В более высокое напряжение на плазменный электрод, чем в случае работы с драйвером без экрана.

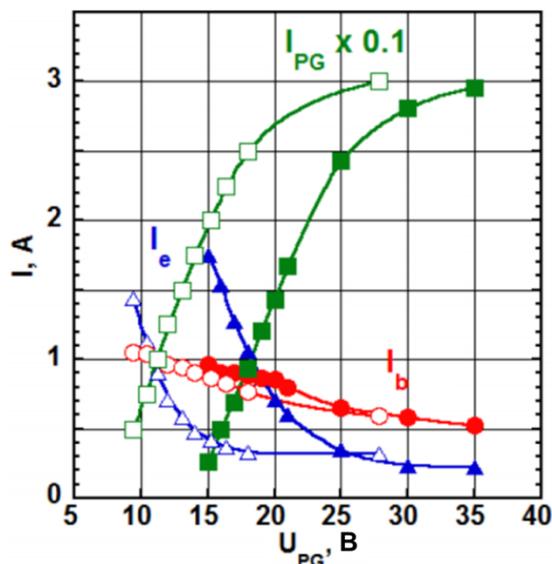


Рисунок 3.25. Зависимости тока пучка ОИ I_b (круги), тока сопутствующих электронов I_e (треугольники), и плазменного тока I_{PG} (квадраты) от напряжения смещения на плазменном электроде U_{PG} . Закрашенные маркеры – драйвер с ЭФ, незакрашенные маркеры – драйвер без ЭФ, $P_{H_2} = 0,4$ Па. Данные для конфигурации с ЭФ сняты при $P_{RF} = 25$ кВт и были линейно аппроксимированы на $P_{RF} 31$ кВт. Данные для драйвера без ЭФ были сняты при $P_{RF} 31$ кВт.

Аналогичные эмиссионные зависимости от потенциала смещения плазменного электрода U_{PG} были получены в источнике с отмытым цезием для драйвера с ЭФ и без него. Для получения максимального тока пучка I_b и максимального плазменного тока I_{PG} в случае драйвера с ЭФ необходимо было использовать напряжение на плазменном электроде U_{PG} на 10 В выше, чем для драйвера без ЭФ. Максимальный ток пучка I_b в источнике был в 2,5 раза ниже, чем при активном цезии в обоих случаях как при использовании ВЧ драйвера с ЭФ, так и без него, а максимальный плазменный ток был в 1,2 раза меньше чем в случае с активным цезием и составлял 25 А (такой же, как на рисунке 3.24).

3.4.2 Влияние разности потенциалов плазмы и плазменного электрода на характеристики источника

Характеристики плазмы и разность потенциалов между плазмой U_{pl} и плазменным электродом U_{PG} определяют процессы генерации и вытягивания ОИ, сопутствующих электронов и сбора частиц из плазмы на плазменном электроде. Прикладываемый потенциал смещения на плазменный электрод U_{PG} модифицирует плазменный потенциал U_{pl} в области, прилегающей к эмиссионной, и меняет значения эмиссионных токов источника.

При высоких значениях U_{PG} модифицированный потенциал плазмы U_{pl} ниже, чем прикладываемое напряжение смещения U_{PG} . Электроны в области не удерживаются вблизи ПЭ и уходят из плазмы вдоль магнитных силовых линий (как видно из рисунка 3.1 на распределительные трубки цезиевой системы и на стенки эмиссионных апертур) и поперек магнитного поля на плазменный электрод. Это уменьшает плотность электронов в области вблизи плазменного электрода и, как следствие, уменьшает ток сопутствующих электронов (рисунки 3.23-3.25). Электрическое поле в этом случае направлено от плазменного электрода в плазму. Поле уменьшает поток рожденных на поверхности плазменного электрода ОИ в плазму. Это приводит к уменьшению тока пучка ОИ, вытягиваемого из источника. Высокий «остаточный» уровень тока пучка ОИ, полученный при больших значениях напряжения смещения, обусловлен прохождением ОИ через слой с запирающим потенциалом [75] и сбором ОИ из области вдали от плазмы - с внешних частей конусов эмиссионных апертур.

При низких значениях U_{PG} модифицированный потенциал плазмы U_{pl} является более положительным, чем U_{PG} [76]. Холодные плазменные электроны в области вблизи плазменного электрода заперты и осциллируют в поле магнитного фильтра и медленно уходят на плазменный электрод в результате процессов диффузии поперек линий магнитного поля. Это увеличивает плотность плазмы и, как результат, ток сопутствующих электронов. С другой стороны, положительная разность потенциала плазмы и плазменного электрода способствует прохождению поверхностных отрицательных ионов с плазменного электрода в плазму. Эти

попавшие в плазму ОИ могут попасть в эмиссионную зону разряда как непосредственно так и в результате кулоновских рассеиваний [77] и резонансных перезарядок.

Полученные зависимости подтверждают, что значения эмиссионных токов зависят только от разности потенциалов между плазмой и плазменным электродом [78, 79]. Сдвиг зависимостей на 4-10 В вдоль оси потенциала плазменного электрода показывает соответствующее увеличение потенциала плазмы вблизи плазменного электрода U_{pl} в случаях низкого давления водорода (рисунок 3.23) и при установке ЭФ драйвера (рисунок 3.25). Увеличение потенциала плазмы в источнике с ЭФ было непосредственно зарегистрировано зондами на установке BATMAN [80].

Увеличение потенциала плазмы при установке ЭФ в ВЧ драйвер может быть обусловлено легким уходом электронов из плазмы ВЧ драйвера вдоль магнитных силовых линий на экран. Экран находится на потенциале РК и задней крышки драйвера. Уход электронов на заднюю крышку ВЧ драйвера и на стенки РК затруднен мультипольной магнитной стенкой. Уход электронов на фарадеевский экран можно снизить в будущих экспериментах за счет приложения на него отрицательного (~ 30 В) или плавающего потенциала. Это должно привести к увеличению плотности плазмы в ВЧ драйвере и, как следствие, тока пучка I_b при работе с экраном.

Идентичность максимальных токов I_{PG} и I_b , полученных при давлениях 0,3 и 0,4 Па (рисунок 3.23), для драйвера с ЭФ и без ЭФ (рисунок 3.25) показывает сходство состава плазмы и потенциала плазмы вблизи плазменного электрода при использовании соответствующего напряжения смещения плазменного электрода.

Увеличение максимального плазменного тока I_{PG} в 1,2 раза в случае работы с отмытым цезием (рисунок 3.24) может быть вызвано увеличением вторичной электронной эмиссии со стенок ВЧ драйвера и РК, покрытой цезием. Эти вторичные электроны, притягиваемые положительным потенциалом плазмы ВЧ разряда и плазмы в РК, увеличивают плотность плазмы и плазменный ток I_{PG} в случае активного цезия. Таким образом, значение максимального тока в цепи ПЭ,

полученного при высоком напряжении смещения на ПЭ, может быть использовано для оценки активности цезия в источнике без прикладывания напряжений на электроды ионно-оптической системы.

Положительные ионы, бомбардирующие плазменный электрод, могут иметь высокую энергию, полученную в результате ускорения от драйвера до плазменного электрода (15-25 эВ на нуклон). Поверхностный выход ОИ слабо зависит от энергии первичных положительных ионов водорода в диапазоне энергий 15-25 эВ на нуклон [81]. Наблюдаемая независимость выхода ОИ от абсолютного значения потенциала плазмы может быть вызвана высокой энергией положительных ионов или сильным замедлением положительных ионов при их движении через плазму от ВЧ драйвера к плазменному электроду [79].

Глава 4. Транспортировка интенсивного пучка отрицательных ионов через линию транспортировки

Для изучения транспортировки пучка с энергией 100 кэВ в линии транспортировки (ЛТ) был создан экспериментальный стенд. Проведенные эксперименты по транспортировке пучка ОИ с токами 0,7 - 1,2 А и энергией до 100 кВ [82] важны для дальнейших экспериментов с ускорением пучка ОИ до энергии более 0,5 МэВ в одноапертурном ускорителе. Схема транспортировки пучка показана на рисунке 4.1. Стенд состоит из вакуумного бака длиной 3,1 м и диаметром 2,1 м с системой откачки, двух поворотных магнитов, использующихся для параллельного сдвига пучка на 44 см с оси источника, передвижного цилиндра Фарадея и calorиметра пучка (КП), установленного на месте входа ускорителя, который будет ускорять пучок до энергии 0,5-1 МэВ.

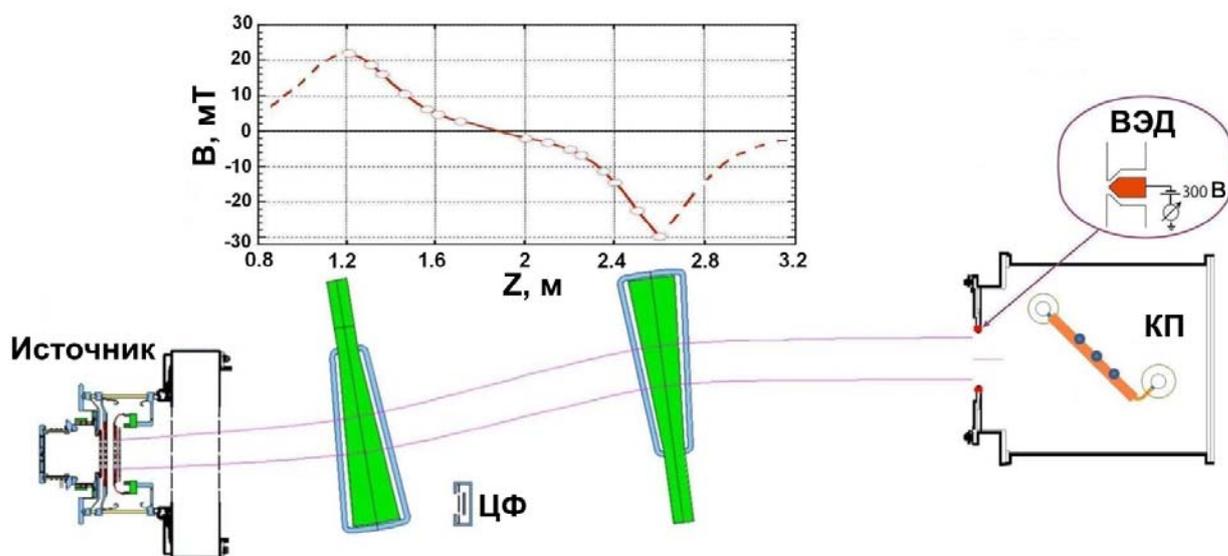


Рисунок 4.1. Схема транспортировки пучка на экспериментальном стенде: сверху показано распределение поперечного магнитного поля вдоль оси бака.

Смещение оси ускорителя относительно оси источника ионов защищает ионный источник от потока обратных положительных ионов из ускорителя, а ускоритель - от потоков цезия и электронов из источника и пучков нейтральных атомов обдирки, образующихся в ЛТ. Интенсивная откачка двумя крионасосами уменьшает остаточное давление водорода в ЛТ, что должно приводить к уменьшению размножения вторичных частиц в ускорителе.

Распределение поперечного магнитного поля вдоль оси бака показано на рис. 4.1. Отклоняющие магниты состоят из С-образного ярма, полюсов и двух катушек для коррекции магнитного поля. Размер апертуры магнита составляет $72 \times 50 \text{ см}^2$. Основное магнитное поле создается постоянными магнитами, расположенными между полюсом и ярмом. Поле уменьшается в 2 раза на $\Delta z \sim 0,25 \text{ м}$, интеграл магнитного поля $\int B_y \cdot dz$ вдоль траектории ионов для первого магнита составляет около $1 \text{ Т} \cdot \text{см}$, для второго магнита – $1,8 \text{ Т} \cdot \text{см}$. При таких полях магнитов пучок с энергией 120 кэВ отклоняется на 14° первым магнитом, а затем отклоняется в противоположную сторону и фокусируется на входное окно калориметра вторым магнитом. Магнитные катушки используются для коррекции траектории пучка для выстрелов с более низкой энергией ускорения. Применяемые катушки позволяют изменять B_1 в диапазоне $14\text{-}28 \text{ мТ}$ и B_2 в диапазоне $21\text{-}35 \text{ мТ}$, что соответствует горизонтальному смещению пучка с полной энергией 100 кэВ в плоскости калориметра на $\pm 24 \text{ см}$ и $\pm 12 \text{ см}$, соответственно.

Для измерения тока пучка ОИ водорода применялось 4 диагностики:

- 1) измерения токов в цепях выпрямителей питания зазоров ИОС источника
- 2) измерения передвижным цилиндром Фарадея (ЦФ)
- 3) измерения калориметром пучка (КП)
- 4) измерения детекторами вторичной электронной эмиссии (ВЭД).

На выходе ЛТ пучок обрезался входным окном калориметра с размерами $24 \times 24 \text{ см}^2$. Затем пучок измерялся с помощью калориметра пучка на расстоянии $3,5 \text{ м}$ от источника. На краях окна КП было установлено 4 ВЭД (в центре левой, верхней, правой и нижней сторон окна). ВЭД обеспечивают информацию о плотности тока пучка на периферии окна. Диаметр апертуры ВЭД составляет 16 мм . Информация об относительном распределении тока пучка на ВЭД, используется для фокусировки пучка ОИ в центр окна КП.

КП состоит из 15 горизонтальных медных блоков, охлаждаемых водой. Повышение температуры медных блоков измеряется с помощью термопар, установленных с обратной стороны калориметра. Тепловые измерения

предоставляют информацию о мощности прошедшего пучка и его профиле. Ток пучка рассчитывается с учётом энергии ОИ и длительности импульса. Измеряемый профиль пучка на КП включает в себя не только отрицательные ионы, а также высокоэнергетические нейтралы, полученные путем обдирки при транспортировке пучка в ЛТ. Таким образом, он может быть использован для измерения тока быстрых атомов, возникающих при обдирке ОИ в прямолинейной области транспортировки пучка между отклоняющими магнитами.

4.1 Моделирование транспортировки пучка через ЛТ

4.1.1 Угловая расходимость пучка

Приобретение ОИ пучка поперечных тепловых скоростей вызывается целым рядом причин. При рождении частиц на поверхности разряда ОИ получают некоторую остаточную энергию быстрого протона или атома плазмы ~ 1 эВ [77]. Часть ОИ образуется при резонансной перезарядке с быстрыми атомами и, соответственно, имеют значительную начальную поперечную энергию. Вытягивание ОИ из пограничной плазмы может привести к появлению поперечной энергии у ОИ. Этот эффект усиливается при колебании плазменной границы из-за динамических изменений свойств плазмы или из-за осцилляций электрических полей в вытягивающем зазоре. Учет начальной поперечной энергии у ОИ при моделировании формирования пучка с помощью PBGUNS производился выбором начальной температуры ОИ, вытягиваемых из плазмы. В расчётах использовалась температура 2 эВ.

4.1.2 Расталкивание пучка объемным зарядом

В связи с наличием собственного объемного заряда ионный пучок, распространяющийся в свободном пространстве, достаточно быстро расходится. Как было показано в разделе 2.1 угловая расходимость элементарной струйки на выходе из источника ~ 40 мРад. Расстояние между центрами струек 27 мм,

посчитанный радиус элементарной струйки 4 мм, таким образом, соседние струйки пересекутся на расстоянии ~ 230 мм. Для оценки расхождения пучка из-за расталкивания объемным зарядом можно считать пучок круглым с начальным диаметром 124 мм и плотностью тока $j=10$ мА/см².

Изменение радиуса пучка r_b найдем, вычислив траекторию движения крайней частицы. В отсутствие компенсации пространственного заряда электрическое поле E_r на периферии пучка соответствует полю заряженного цилиндра (4.1).

$$E_r(r_b) = \frac{I}{2\pi\epsilon_0 r_b v_z} \quad (4.1)$$

где I - ток пучка, ϵ_0 - электрическая постоянная, v_z - скорость частиц пучка. Таким образом, расстояние от центра пучка до крайней частицы на расстоянии z можно вычислить, решив уравнение (4.2).

$$m\ddot{r}_b = mv_z^2 \frac{d^2 r_b}{dz^2} = e \cdot E_r = \frac{e \cdot I}{2\pi\epsilon_0 r_b v_z} \quad (4.2)$$

где e - заряд электрона. Решение этого уравнения было выполнено численно, траектории крайних частиц для пучков с токами 1,5 А, 1 А, 0,5 А, 0,25 А и энергией 100 кэВ показаны на рисунке 4.2. Результаты расчетов качественно совпадают с расхождением ленточного пучка в результате расталкивания объемным зарядом (в этом случае было получено аналитическое решение [24]).

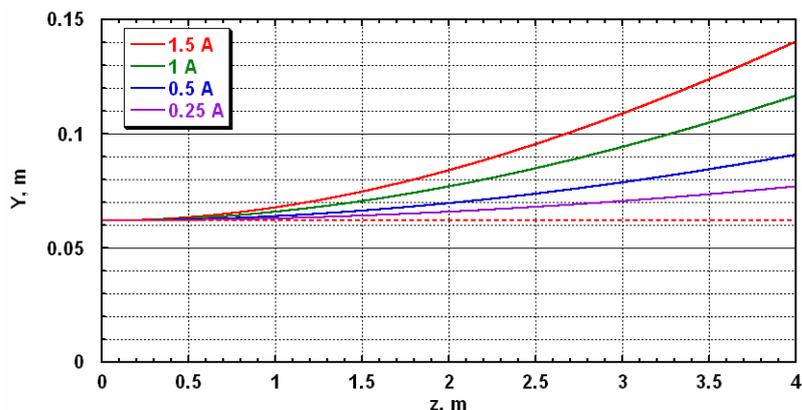


Рисунок 4.2. Моделирование транспортировки пучка ОИ с энергией 100 кВ без учета начальной угловой расходимости. Непрерывные линии показывают траекторию крайней частицы с учётом расталкивания нескомпенсированным объемным зарядом, пунктирная линия соответствует начальному размеру пучка

Учет начальной угловой расходимости, очевидно, приводит к увеличению размеров пучка. Как видно из рисунка 4.3 размер пучка на расстоянии 3,5 м от источника без расталкивания объемным зарядом составляет 0,4 м, расталкивание увеличивает его до 0,46 м. Расталкивание объемным зарядом сильнее влияет на пучок с меньшей угловой расходимостью. На рисунке 4.3 видно, что для пучка с расходимостью 10 мРад размер пучка увеличивается с 0,2 м до 0,28 м.

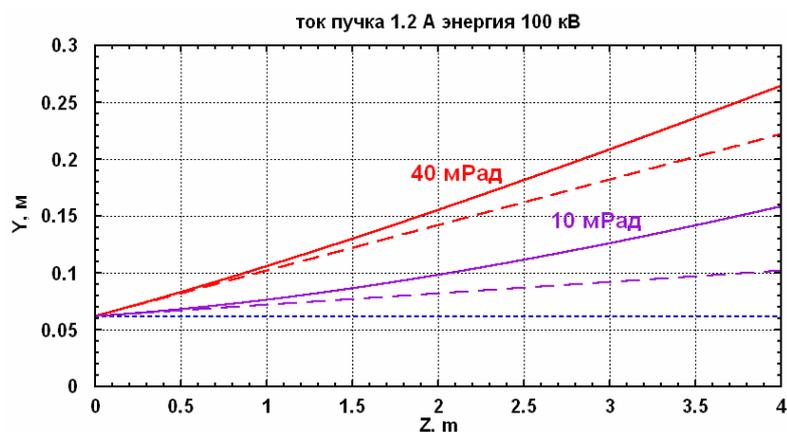
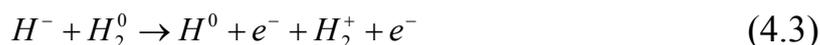


Рисунок 4.3. Моделирование транспортировки пучка ОИ с током 1.2 А и энергией 100 кВ с учетом начальной угловой расходимости. Непрерывные линии показывают траекторию крайней частицы с учётом расталкивания нескомпенсированным объемным зарядом, а пунктирные линии - только за счет начальной угловой расходимости

4.1.3 Компенсация объемного заряда пучка

Оценки, сделанные в предыдущем параграфе, свидетельствуют о том, что транспортировка интенсивного ионного пучка в свободном от внешних электрических полей пространстве возможна только при компенсации пространственного заряда пучка зарядами противоположного знака. Компенсация пространственного заряда пучка ОИ происходит, в основном, за счет ионизации молекул остаточного газа в баке ионами пучка.



При энергии 100 кВ сечение этой реакции $\sigma_i = 2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$. Для эффективной компенсации пространственного заряда число ионизаций в единицу времени должно компенсировать уход положительных ионов из области пучка.

$$n_{H^-} v_{H^-} n_{vac} \sigma_i \pi r_0^2 = n_i v_i 2 \pi r_0 \quad (4.4)$$

где n_H - плотность частиц в пучке, v_H - скорость частиц пучка, n_{vac} плотность частиц в вакуумном баке, σ_i - сечение образования положительных ионов, r_0 - начальный размер пучка, n_i - плотность рожденных положительных ионов, v_i - скорость положительных ионов в направлении поперек v_H . Таким образом, необходимое давление для компенсации пространственного заряда составляет

$$n_{vac} = \frac{2v_i}{v_H r_0 \sigma_i} = \frac{2U_i^{0.5}}{v_H r_0 \sigma_i m_i^{0.5}} \quad (4.5)$$

где U_i - энергия положительных ионов, а m_i их масса. Если энергия, передаваемая от пучка ионам $U_i \sim 1$ эВ, то давление водорода в камере для компенсации пространственного заряда составит $P \sim 7 \cdot 10^{-3}$ Па. Высокое давление в ЛТ приводит к обдирке пучка (см. ниже). Для эффективной компенсации пространственного заряда при низкой обдирке пучка требуется использовать подачу дополнительных газов, например, N_2 , Хе. Сечение ионизации молекул высокоэнергетичными ионами ($U_b \sim 100$ кэВ) слабо зависит от сорта молекул [83]. Поэтому, как видно из формулы 4.5, увеличение массы молекул приведет к снижению давления, необходимого для компенсации пространственного заряда пучка. Эффективность использования более тяжелого газа для компенсации пространственного заряда была показана в экспериментах [84]. Так для компенсации пространственного заряда молекулами азота необходимое давление составит $P \sim 2 \cdot 10^{-3}$ Па, при использовании ксенона $P \sim 1 \cdot 10^{-3}$ Па.

4.1.4 Обдирка пучка ОИ

ОИ водорода обладают низкой энергией сродства к электрону 0,75 эВ и легко разрушаются на остаточном газе. Основной процесс потери ОИ при транспортировке это обдирка на молекулах водорода в струе газа на выходе из источника и в баке.



Сечение обдирки ОИ снижается при увеличении энергии с 10 кэВ до 100 кэВ в 2 раза, до $\sigma_{str} = 4,5 \cdot 10^{-16}$ см². Для типичного давления водорода в баке $3 \cdot 10^{-3}$ Па

обдирка пучка ОИ с энергией 100 кэВ составляет $\sim 3\%/м$, для большего давления $7,3 \cdot 10^{-3}$ Па оно составляет $\sim 8\%/м$. Значительная обдирка ОИ на струе вытекающего газа из источника исследовалась экспериментально.

4.2 Эксперименты по транспортировке пучка

Типичное распределение плотности тока в поперечном сечении пучка с энергией 85 кэВ, полученное с помощью передвигаемого цилиндра Фарадея с диаметром входного окна 170 мм, показано на рисунке 4.4. При токе ускоренного пучка $I_b = 1,2$ А максимальный ток ЦФ i_{FC} имел величину 0,43 А (центральный круг на рисунке 4.4), а оцениваемый из распределения полный ток пучка ОИ в плоскости ЦФ на расстоянии 1,6 м от источника достигал ~ 1 А.

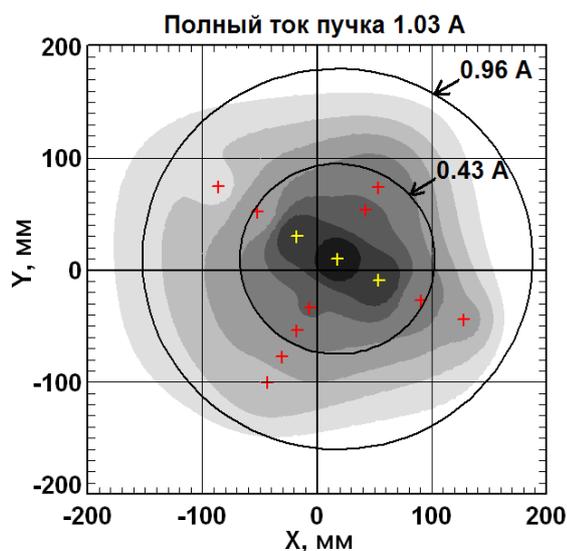


Рисунок 4.4. Распределение плотности тока в поперечном сечении пучка, измеренное ЦФ на расстоянии 1,6 м от источника. Крестиками показаны различные положения центра ЦФ при измерениях, внутренний круг диаметром 170 мм показывает центральное положение ЦФ, внешний круг диаметром 34 см содержит $> 90\%$ от полного тока пучка ОИ. Драйвер без ЭФ, $P_{RF} = 36$ кВт, $U_{ex} = 12$ кВ, $U_{ac} = 73$ кВ, $P_{H2} = 0,4$ Па.

Наблюдаемое расхождение между I_b и полным током на ЦФ обусловлено обдиркой пучка ОИ при движении к ЦФ. Основная часть пучка (внутри внешнего круга на рисунке 4.4) на расстоянии 1,6 м от ИОС имеет размеры 34×30 см², т.е.

угловая расходимость пучка составляет 63×50 мрад. Для сравнения, угловая расходимость источника VATMAN составляла 87 мрад [83].

4.2.1 Влияние энергии пучка на его транспортировку

Зависимости тока пучка на выходе из ИОС (I_b) и тока пучка на ЦФ I_{FC} от полного напряжения на электродах ИОС U для источника без ЭФ и с ЭФ показаны на рисунке 4.5. В случае работы без ЭФ в режиме коротких импульсов удавалось подавать более высокую мощность в плазму (без ЭФ - 35 кВт, с ЭФ - 25 кВт). Для вытягивания пучка из плазмы большей мощности прикладывалось более высокое вытягивающее напряжение (12 кВ при $P_{RF} = 35$ кВт, 7,5 кВ при $P_{RF} = 25$ кВт). При этом максимальный ток пучка I_b для источника без ЭФ составил 1,2 А, а для источника с ЭФ составил 0,7 А.

Для измерения тока пучка, прошедшего 1,6 м от источника, использовались цилиндры Фарадея с диаметрами входных отверстий 100 мм (I_{fc}) и 170 мм (I_{FC}). ЦФ были расположены по центру пучков исходя из измеренных профилей пучка при полных напряжениях ускорения 85 кВ для источника без ЭФ (непрерывные линии) и 75 кВ для источника с ЭФ (пунктирные линии). Токи на ЦФ домножены на коэффициенты 2,5 (в соответствии с рисунком 4.4) и 4 (в соответствии с [53]), равные отношению тока пучка на ЦФ, расположенного в центре пучка, к полному току пучка, оцененному по поперечному распределению тока пучка на расстоянии 1,6 м от источника. Отличия форм полного тока пучка на выходе из ИОС I_b и тока пучка, измеренного на ЦФ, I_{FC} обусловлены более сильным поворотом пучка в магнитном поле и его расхождением по мере транспортировки к ЦФ при низком ускоряющем напряжении U_{ac} . Отметим, что рост тока пучка на ЦФ при увеличении ускоряющего напряжения U_{ac} начинается при 15 кВ для источника без ЭФ и при 20 кВ для источника с ЭФ. Это вызвано меньшим поворотом пучка поперечным магнитным полем в зазорах ИОС из-за приложения более высокого вытягивающего напряжения в источнике без ЭФ (без ЭФ 12 кВ, с ЭФ 7,5 кВ).

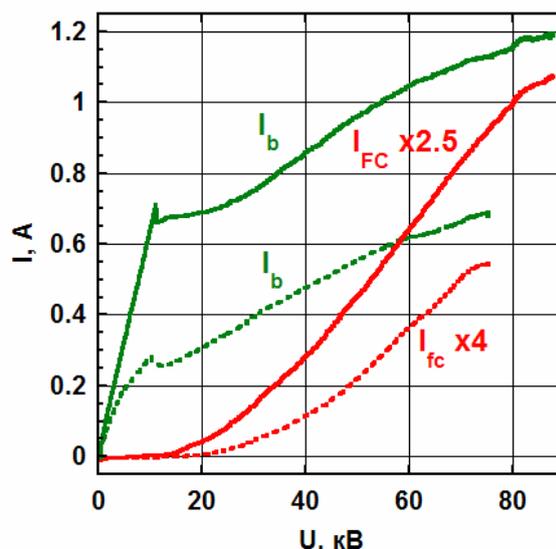


Рисунок 4.5. Зависимости тока пучка на выходе из ИОС I_b и тока пучка, регистрируемого ЦФ I_{FC} при разном ускоряющем напряжении ИОС $U=U_{ex}+U_{ac}$. Сплошные линии - источник без ЭФ, $P_{RF}=35$ кВт, $U_{ex}=12$ кВ, входная апертура ЦФ диаметром 170 мм; пунктирные линии – источник с ЭФ, $P_{RF}=25$ кВт, $U_{ex}=7,5$ кВ, входная апертура ЦФ диаметром 100 мм.

4.2.2 Типичный профиль пучка на расстоянии 3.5 м

Схема переноса пучка ОИ к калориметру с несколькими зонами возможной обдирки ОИ в вакуумном баке показана на рисунке 4.6. Как видно, только группа #2, образованная в области С, смешана с пучком ОИ и неотделима от него и попадает в окно КП при номинальном значении магнитных полей в ЛТ. Группы #1 и #3, образованные в областях А и В, не входят в окно КП. Группа #1 обусловлена обусловлена нейтрализованным пучком, образованным перезарядкой на газе, вытекающем из источника, а группа #3 обусловлена разрушением на остаточном газе в ЛТ.

Вертикальный (вдоль оси Y) профиль пучка, входящего в плоскость КП, измерялся с помощью вертикального ряда термопар, установленных на КП, а распределение плотности тока пучка вдоль оси X измерялось сканированием пучка путем изменения магнитного поля магнита #1 (см. рисунок 4.6). Данные вертикального ряда термопар КП, показаны на рисунке 4.7 при разном поле первого магнита. Ось Y указывает ординату термопар в вертикальном ряду калориметра, ось X показывает горизонтальный сдвиг пучка вдоль плоскости КП при изменении магнитного поля.

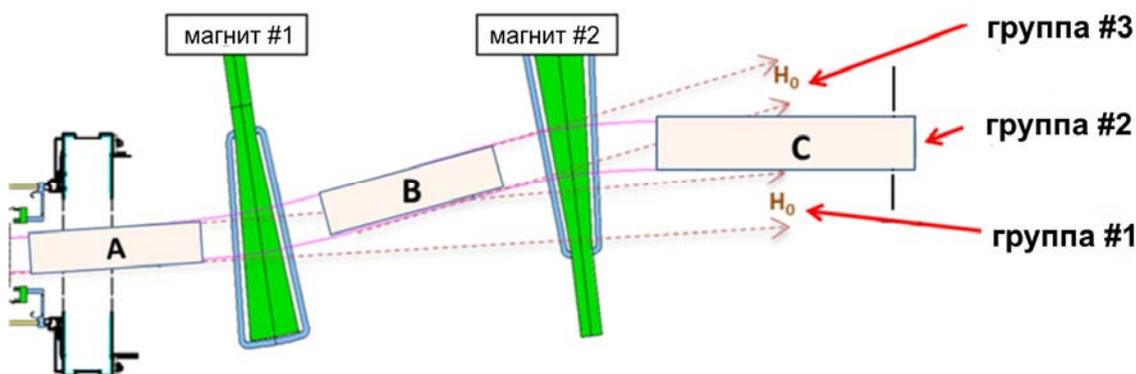


Рисунок 4.6. Схема транспортировки пучка ОИ в ЛТ: обдирка ОИ в областях А, В и С может создавать дополнительные группы быстрых нейтралов в плоскости КП при ухудшенных вакуумных условиях.

Сдвиг пучка магнитным полем калибровался с помощью горизонтального ряда термопар, расположенных на центральном блоке КП. Верхняя горизонтальная ось V_1 показывает значение магнитного поля в центре первого магнита. Точки измерения показаны пустыми квадратами. Справа - шкала температур термопар (в $^{\circ}\text{C}$). Кривая ΔT на рисунке 4.7а показывает повышение температуры центральной термопары КП (при $Y=0$), при нагреве импульсом пучка при его сдвиге по оси X. Она соответствует распределению плотности мощности пучка вдоль центральной горизонтальной линии КП. Как видно из рисунка 4.7б на профиле мощности пучка нет четко выраженной нейтральной группы #3. Небольшая асимметрия X-распределения пучка (разница между сплошными и пустым кругами в левом крыле кривой ΔT на рисунке 4.7б) может быть обусловлена вкладом нейтральной группы #3. Это подтверждает низкую обдирку ОИ в этом случае.

Кривая W на рисунке 4.7а показывает полную мощность пучка, падающую на окно калориметра при сканировании пучком вдоль оси X. Максимальная мощность пучка, измеренная калориметром, в этом случае составляла $W \sim 50$ кВт, что соответствует $\sim 60\%$ от мощности пучка, введенного в ЛТ (0,9 А, 93 кэВ). Важно отметить, что мощность, измеренная КП в этом случае, включает в себя мощность центральной группы нейтралов (#2), представляющей собой пучок ОИ и группу высокоэнергетичных атомов рожденных при обдирке пучка в области между вторым магнитом и КП, и часть мощности нейтральной группы (#1).

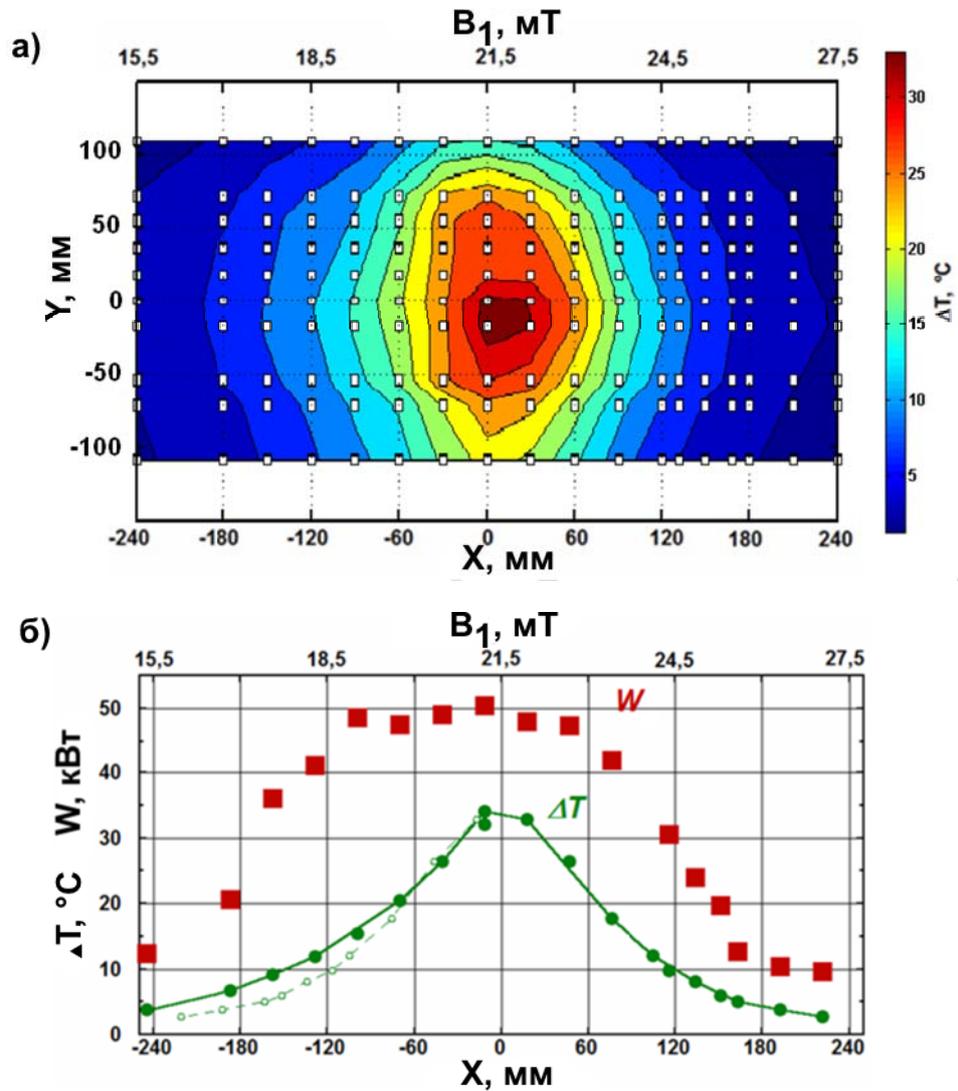


Рисунок 4.7. Профиль пучка в плоскости КП: а) Повышение температуры термопар в вертикальном ряду КП, измеренное при сканировании пучка вдоль оси X при изменении поля магнита #1. X горизонтальный сдвиг, верхняя ось B_1 - магнитное поле в центре магнита #1, Y - ордината термопар. Справа показана шкала температуры (в °C). б) Повышение температуры ΔT центральной термопары КП (сплошные круги) и мощности W пучка частиц, попавшей на КП при сканировании пучка по оси X (квадраты). Несколько кругов и пунктирная линия в левой части кривой ΔT соответствуют точкам ΔT справа на зависимости, симметрично отраженным относительно центра пучка ($X = 0$). $I_b = 0,9\text{A}$, $U_{\text{ex}} + U_{\text{ac}} = 9 + 84\text{кэВ}$. $P_{\text{RF}} = 22\text{кВт}$, драйвер с ЭФ.

Вклад нейтральной группы #1 был измерен отдельно с дополнительным смещением пучка уменьшением поля магнита #2. В этом случае мощность, падающая на КП, составила $\sim 2\text{кВт}$, она соответствует мощности нейтральной группы #1, которая проходит во входное окно КП. Часть остальной мощности пучка на выходе ЛТ $W \sim 10$ и 12кВт была измерена при направлении периферийных частей пучка на калориметр (при смещении пучка на $X = +220\text{мм}$

и $X = -240$ мм на рисунке 4.7б). Эти значения характеризуют величину гало пучка в периферийных частях $-360 \text{ мм} < X < -120 \text{ мм}$ и $100 \text{ мм} < X < 340 \text{ мм}$. Неизмеренные части пучка – это его гало, попадающее выше и ниже окна КП, а также большая часть нейтральной группы #1, которая не попадает на калориметр. Согласно распределению ΔT , показанному на рисунке 4.7б, транспортируемый пучок имеет горизонтальный размер ~ 25 см (полная ширина на уровне $1/e$) в случае падающего пучка с энергией 93 кэВ и током $I_b = 0,9$ А.

4.2.3 Сепарация пучка от атомов обдирки в ЛТ

Осциллограммы тока пучка и сигналов с ВЭД, в импульсе длительностью 10 с при мощности ВЧ 17 кВт, показаны на рисунке 4.8. В этом случае использовалось 3 ВЭД, установленные на правой, левой и нижней сторонах окна калориметра. Расстояние между ВЭД и центром калориметра составляло 140 мм для всех случаев. Во время импульса ухудшался вакуум в ЛТ, а в конце выстрела вакуум в баке составлял $8 \cdot 10^{-3}$ Па. Ток пучка ОИ имел значение $I_b = 0,55 \div 0,6$ А. Во время импульса сигнал с нижнего ВЭД, который, в этом случае характеризует группу #2 на плоскости калориметра, также увеличивается при увеличении I_b в интервале 0-6 с, а затем начинает уменьшаться. Левый ВЭД соответствует группе #3, его сигнал слегка увеличивающийся в течение первых 6 с более быстро увеличивается в конце импульса. Сигнал правого ВЭД характеризует группу #1, и практически не меняется в течение импульса.

Увеличение I_b приводит к увеличению сигнала нижнего ВЭД в начале импульса, а затем, когда I_b почти постоянный, сигнал нижнего ВЭД начинает уменьшаться из-за увеличения обдирки пучка ОИ в области В при увеличении давления остаточного газа в баке. Увеличение обдирки пучка можно увидеть в увеличении сигнала левого ВЭД. Правый ВЭД является постоянным, потому что он обусловлен обдиркой пучка на выходе ИОС в области вблизи источника, где обдирка вызвана струей вытекающего газа и слабо зависит от давления в баке.

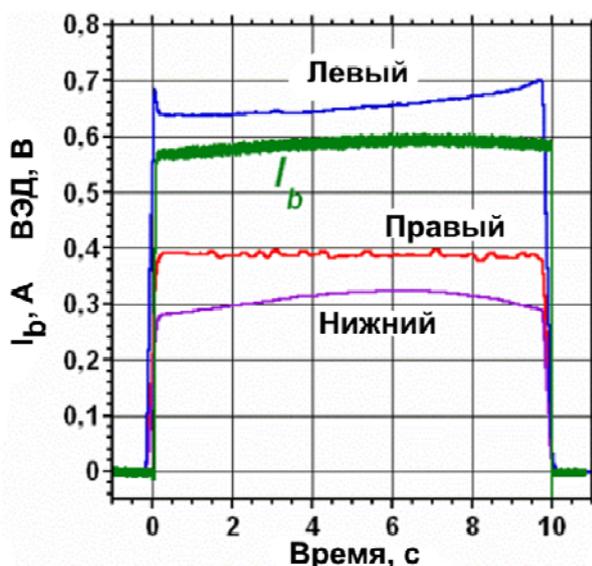


Рисунок 4.8. Осциллограммы тока пучка на выходе ИОС I_b и сигналы левого, правого и нижнего ВЭД. Параметры работы источника: драйвер с ЭФ, $P_{RF} = 17$ кВт, $P_{H2} = 0,35$ Па, $U_{ex} = 7$ кВ, $U_{ac} = 75$ кВ.

Структура высокоэнергетических групп, образующихся при транспортировке в ЛТ, была выяснена в случае ухудшенного вакуума и увеличенной обдирки (см. рисунок 4.9а). На профиле XY видно 2 пика. Высокий пик на рисунке 4.9б в основном состоит из транспортируемого пучка ОИ и частично включает в себя высокоэнергетические нейтралы, возникающие при обдирке ОИ в пространстве после отклонения пучка вторым магнитом. Левый пик обусловлен нейтралами, образуемыми при транспортировке в участке между магнитами (см. рисунок 4.6), которые не отклоняются вторым магнитом.

Ток пучка, прошедшего в окно КП, составил $I_C = 0,29$ А. Эквивалентный ток нейтралов левого пика $I_C = 0,06$ А согласуется с теоретическим предсказанием $\sim 8\%/м \cdot 1,2$ м обдирки пучка при давлении в баке $7,3 \cdot 10^{-3}$ Па.

Кривая ΔT на рисунке 4.9б показывает максимальный нагрев центральной термопары КП при разном поле первого магнита B_1 при его изменении с помощью коррекционных катушек. Нагрев термопар КП характеризует распределение мощности пучка, вдоль центра КП (по оси X). Кривые, обозначенные «LS» и «RS» на рисунке 4.9б, показывают сигналы с левого и правого ВЭД. Магнитное поле, отклоняющее пучок, показано на рисунок 4.9 на верхней оси для каждого детектора отдельно. Видно, что при максимальном

прохождении основной группы пучка ($X = 0$) группа # 3 не попадает в КП с входным окном $24 \times 24 \text{ см}^2$.

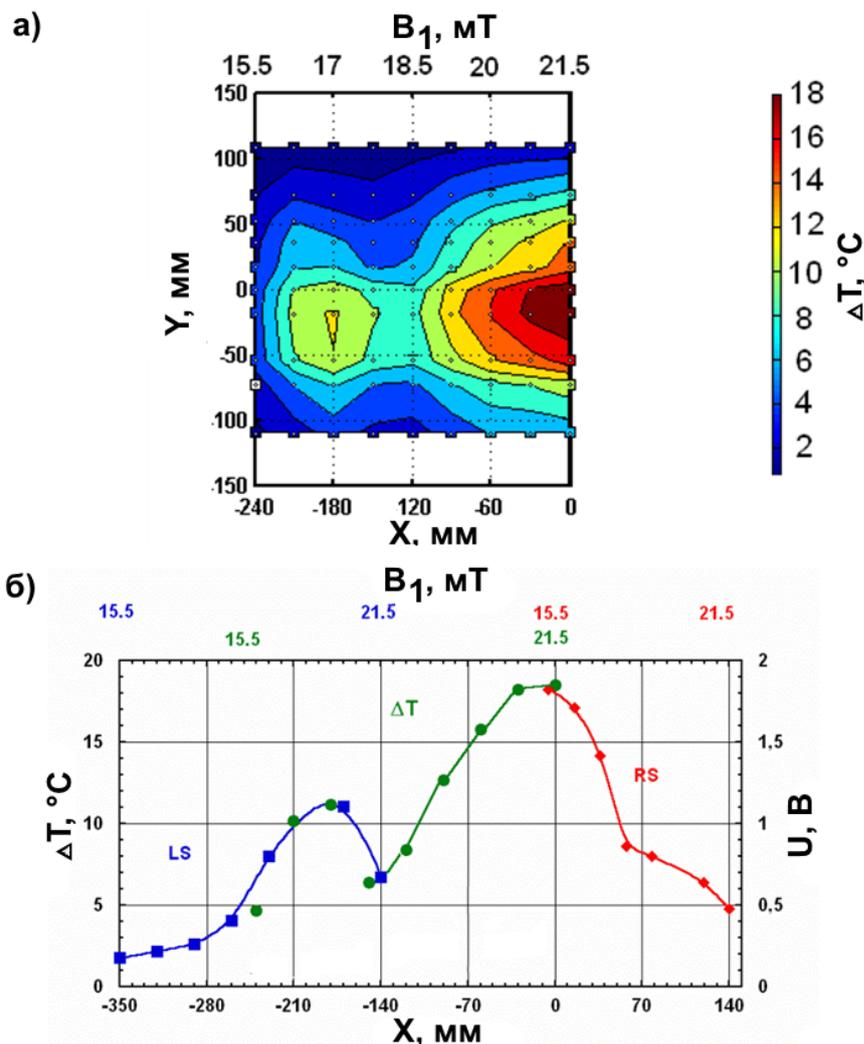


Рисунок 4.9. Профиль пучка в плоскости КП: а) Повышение температуры термопар в вертикальном ряду КП, измеренное при сканировании пучка вдоль оси X при изменении поля первого магнита. X горизонтальный сдвиг, верхняя ось B_1 - магнитное поле в центре магнита #1, Y - ординат термопар. Справа показана шкала температуры; б) Повышение температуры ΔT центральной термопары калориметра (сплошные круги) и сигналы с правого RS и левого LS вторично-эмиссионного детекторов при сканировании пучка по оси X магнитным полем первого магнита. $I_b = 0,6 \text{ А}$, $U_{ex} + U_{ac} = 7 + 75 \text{ кэВ}$, $P_{RF} = 25 \text{ кВт}$, драйвер с ЭФ.

4.3 Анализ изменения характеристик пучка при транспортировке

Параметры пучка на выходе ЛТ при двух вакуумных условиях приведены в таблице 4.1. В первом случае давление водорода в ЛТ составляло $3 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$, а во

втором – $7,3 \cdot 10^{-3}$ Па. Вторая колонка показывает ток пучка, энергию и мощность на выходе источника, измеренные по токам в цепи питания источника. Следующая колонка показывает полную мощность пучка, измеренную на расстоянии 1,6 м от источника с помощью ЦФ. Уменьшение мощности пучка при транспортировке вызвано обдиркой пучка области А, поэтому оно равно мощности группы #1 (группа 1 в плоскости ЦФ). В следующей колонке показана полная мощность частиц высокой энергии, измеренная на КП при сканировании магнитом B_1 . Следующий столбец показывает мощность, введенную в окно КП при максимальном отклонении пучка (минимальное значение B_1 и максимум B_2), эта мощность в основном вызвана группой #1, которая попадает в окно КП. В последнем столбце показана мощность основной группы пучка, которая попадает в окно калориметра размером 24×24 см².

Измерения в плоскости ЦФ показывают, что эффективность транспортировки на 1,6 м не зависит от давления в баке и составляет 85%. А транспортировка на 3,5 м ухудшается при увеличении давления в баке. В первом случае она составляет 60 %, а во втором 50 %, что подтверждает факт, что она вызвана обдиркой пучка в зонах В и С (см. рисунок 4.7). Как видно из таблицы 4.1, только 2 кВт высокоэнергетичных атомов из 12 кВт группы #1 входят в окно КП. Оставшаяся часть оседает на входном окне калориметра. В случае № 1 разница между током пучка ОИ в плоскости ЦФ и мощностью в плоскости КП, обусловлена мощностью 4 кВт, которая оседает сверху и снизу входного окна КП.

Таблица 4.1 – Транспортировка пучка через ЛТ

Точки измерений	На выходе ИОС	В плоскости ЦФ			В окно 24 x 24 см ²	
		Пучок ОИ	Группа 1	Группы 2 + 3	Группа 1	Группа 2
Группы пучка	Пучок ОИ	Пучок ОИ	Группа 1	Группы 2 + 3	Группа 1	Группа 2
случай #1	0,9Ах93кВ=84 кВт	72 кВт	12 кВт	68 кВт	2 кВт	50 кВт
случай #2	0,6Ах80кВ=48 кВт	40 кВт	8 кВт	28 кВт	-	24 кВт

Таким образом, пучок ОИ с током 0,9 А и энергией 93 кэВ транспортирован через ЛТ. Эффективность транспортировки на расстояние 1,6 м, 3,5 м составила

85 % и 60 % соответственно. Пучок ОИ эффективно очищается от высокоэнергетичных нейтралов, образующихся в области до ЦФ, и в области между поворотными магнитами. При рабочем вакууме в баке $3 \cdot 10^{-3}$ Па потери пучка в ЛТ обусловлены обдиркой вблизи ускоряющего электрода ИОС, а группа нейтралов, полученная при обдирке пучка в области между магнитами, практически неразличима на измеренном профиле пучка на калориметре.

При ухудшенном вакууме в баке $7 \cdot 10^{-3}$ Па обдирка вблизи ускоряющего электрода ИОС не отличается от обдирки при вакууме в баке $3 \cdot 10^{-3}$ Па. Измеренная обдирка в области между магнитами составляет $\sim 10\%$ тока пучка ОИ, что согласуется с теоретической оценкой.

Заключение

В работе были проведены исследования и экспериментально подтверждена эффективность заложенных в конструкцию ВЧ источника ИЯФ новых элементов. Были получены следующие результаты:

- Разработана процедура контроля подачи цезия в источник, основанная на измерении давления водорода в вакуумном баке. Использование этой процедуры позволяет предотвратить избыточную подачу цезия, которая приводит к пробоям в зазорах ИОС и уменьшает мощность ВЧ разряда.
- Доказано, что при подаче цезия в источник по разработанной процедуре образуется устойчивое цезиевое покрытие. Достигнута повышенная генерация пучка ОИ с током более 1 А, которая поддерживается в течение 7 недель.
- Экспериментально доказано, что нагрев электродов ИОС приводит к увеличению ее ВВ прочности. В случае холодных электродов цезий накапливается вблизи эмиссионных отверстий электродов, а его распыление пучком способствует развитию пробоев. В случае горячих электродов усиление процессов диффузии и десорбции цезия приводит к оттоку цезия из слоев с толщиной более монослоя на периферию, что увеличивает высоковольтную прочность ИОС.
- Предложен способ оценки тока пучка ОИ на выходе из источника по токам в цепи ускоряющего электрода ИОС и току в цепи ускоряющего выпрямителя. Корректность метода обусловлена сбором всех вторичных и сопутствующих электронов на электроды ИОС. Достоверность измеряемого тока подтверждена независимыми измерениями тока пучка на ЦФ и измерениями мощности высокоэнергетичных групп на КП. Предложенная процедура измерения тока пучка позволяет оценить разрушение ОИ по мере их транспортировки на расстояние 1,6 м, а также позволяет сделать вывод, что основное разрушение ОИ происходит в области опоры ускоряющего электрода.
- Получены и исследованы зависимости эмиссионных токов источника от основных параметров: мощности ВЧ разряда, давления водорода в источнике,

напряжения на плазменном электроде, напряжения на электродах ИОС, температуры электродов ИОС.

- Было продемонстрировано, что эмиссионные токи источника зависят только от разности потенциалов между плазмой и плазменным электродом. Увеличение потенциала на плазменном электроде приводит к существенному уменьшению тока вытягиваемых электронов при незначительном изменении тока пучка ОИ.
- Была достигнута стабильная работа источника в водородно-цезиевом режиме при низком расходе цезия и необходимой высоковольтной прочности зазоров ИОС. Были получены стабильные пучки ионов Н- с током на выходе ИОС 1,2 А и энергией 90 кэВ в импульсах длительностью 2 с при мощности ВЧ разряда 34 кВт и исходном давлении водорода 0,4 Па. Эмиссионная плотность тока пучка при вытягивании составляла 28 мА/см^2 . Ток сопутствующих электронов был не более 1 А. Размер пучка ОИ, проведенного на расстояние 1,6 м имел величину $30 \times 35 \text{ см}^2$.

Через линию транспортировки с поворотными магнитами на расстояние 3,5 м проведено 80% полученного из источника пучка ОИ (при размерах входного окна калориметра $30 \times 30 \text{ см}^2$), 15 % потерь пучка при транспортировке обусловлены его обдиркой вблизи источника и в линии транспортировки. При этом сформированный пучок ОИ хорошо отделяется от образуемых в процессе транспортировки быстрых атомов обдирки и сопутствующих потоков частиц.

Список сокращений и условных обозначений

УТС — управляемый термоядерный синтез.

ОИ — отрицательный ион.

ВВ — высоковольтный.

ВЧ — высокочастотный.

ИОС — ионно-оптическая система.

ИЦР — ионно-циклотронный резонанс

ЭЦР — электронно-циклотронного резонанс

СВЧ — сверхвысокочастотное излучение.

ППИ — поверхностно-плазменный источник.

ЭФ — фарадеевский экран.

РК — расширительная камера.

РТ — распределительная трубка подачи цезия.

ПЭ — плазменный электрод.

ВЭ — вытягивающий электрод.

УЭ — ускоряющий электрод.

ХТ — холодная точка цезиевой системы.

ЦФ — цилиндр фарадея.

КП — калориметр пучка.

ВЭД — детектор вторичной электронной эмиссии.

ЛТ — линия транспортировки.

Список литературы

1. Физика и технология источников ионов: Монография/ Я. Браун и др.; под ред. Я. Брауна: Пер. с англ.— М.: Мир, 1998.— 482 с.
2. Adams J.M., Ageladarakis P., Alper B., et al. Physics of high performance JET plasmas in DT // Nucl. Fusion.— 1999.—V. 39 (9).— P. 1227
3. Singh M. J., Boilson D., Polevoi A. R., et al. Heating neutral beams for ITER: negative ion source to tune fusion plasmas // New J. Phys.— 2017.— V. 19.— P. 055004
4. Jacquinet J., Putvinski S., Bosia G., et al. Chapter 6: Plasma auxiliary heating and current drive // Nucl. Fusion.— 1999.— V. 39.— P. 2495–2539
5. Berkner K. H., Pyle R. V., Stearns J. W. Intense, mixed-energy hydrogen beams for CTR injection // Nucl. Fusion.— 1975.— V. 15 (2).— P. 249
6. Dimov G. I., Roslyakov G. V. Conversion of a beam of negative hydrogen ions to atomic hydrogen in a plasma target at energies between 0.5 and 1 MeV // Nucl. Fusion.— 1975.— V. 15 (3).— P. 551
7. Fink J. H., Hamilton G. W. A Neutral-Beam Injector for the Tandem-Mirror Fusion Reactor Delivering 147 MW of 12-MeV D // IEEE Trans. Plasma Sci.— 1978.— V. 6 (4).— P. 417-434
8. Бельченко Ю. И. Сотовый поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов // Физика плазмы.— 1983.— Т. 9.— С. 1219
9. Franzen P., Wunderlich D., Riedl R., et al. Status of the ELISE test facility // AIP Conf. Proc.— 2015.— V. 1655.— P. 060001
10. Fantz U., Heinemann B., Wunderlich D., et al. Towards 20 A negative hydrogen ion beams for up to 1 h: Achievements of the ELISE test facility (invited) // Rev. Sci. Instrum.— 2016.— V. 87.— P. 02B307
11. Okumura Y., Hanada M., Inoue T., et al. Development of a Large D⁻ Ion Source for the JT-60U Negative-Ion-Based Neutral Beam Injector // 15th IEEE/NPSS Symposium. Fusion Engineering, Hyannis, MA.— 1993.— V. 1.— P. 466 – 469

12. Takeiri Y., Kaneko O., Tsumori K., et al. High-power and long-pulse injection with negative-ion-based neutral beam injectors in the Large Helical Device // Nucl. Fusion.— 2006.— V. 46 (6).— P. S199–S210
13. Inoue T., Kashiwagi M., Taniguchi M., et al. 1MeV, ampere class accelerator R&D for ITER // Nucl. Fusion.— 2006.— V. 46 (6).— P. S379
14. Agostinetti P., Aprile D., Antoni V., et al. Detailed design optimization of the MITICA negative ion accelerator in view of the ITER NBI // Nucl. Fusion.— 2016.— V. 56 (1).— P. 016015
15. Belchenko Yu. Surface negative ion production in ion sources // Rev. Sci. Instrum.— 1993.— V. 64.— P. 1385-1393
16. Kwan J. W., Ackerman G. D., Anderson O. A., et al. One ampere, 80keV, long pulse H⁻ source and accelerator // Rev. Sci. Instrum.— 1986.— V. 57.— P. 831
17. Ikeda Y., Umeda N., Akino N., et al. Present status of the negative ion based NBI system for long pulse operation on JT-60U // Nucl. Fusion.— 2006.— V. 46.— 6, P. S211
18. Holmes A. J. T., McAdams R., Proudfoot G., et al. Intense negative ion sources at Culham Laboratory (invited) // Rev. Sci. Instrum.— 1994.— V. 65.— P. 1153
19. Nocentini R., Fantz U., Franzen P., et al. Toward a Large RF Ion Source for the ITER Neutral Beam Injector: Overview of the ELISE Test Facility and First Results // IEEE transactions on plasma science.— 2014.— V. 42 (3).— P. 616-623
20. Fantz U., Wunderlich D., Heinemann B., et al. Operation of large RF sources for H⁻: Lessons learned at ELISE // AIP Conf. Proc.— 2017.—V. 1869 .— P. 030004
21. Fantz U., Franzen P., Kraus W., et al. Size Scaling of Negative Hydrogen Ion Sources for Fusion // AIP Conf. Proc.— 2015.— V. 1655.— P. 040001
22. Franzen P., Fantz U. On the NBI system for substantial current drive in a fusion powerplant: Status and R&D needs for ion source and laser neutralizer // Fusion Engineering and Design.— 2014.— V. 89 (11).— P. 2594–2605

23. Ivanov A. A., Abdrashitov G. F., Anashin V. V., et al. Development of a negative ion-based neutral beam injector in Novosibirsk // *Rev. sci. instrum.*— 2014.— V. 85.— P. 02B102
24. Семашко, Н.Н. Инжекторы быстрых атомов водорода / Н.Н. Семашко и др. — М.: Энергоиздат.— 1981.— 168 с
25. Pierce, J. R. Theory and Design of Electron Beams / J. R. Pierce .— D. Van Nostrand Co. Inc.—2nd edition.— 1954.— 222 p.
26. Форрестер А. Т. Интенсивные ионные пучки / Т. А. Форрестер.— Пер. с англ.— М.: Мир, 1991. —358 с.
27. Зандберг, Э. Я. Поверхностная ионизация: Монография/ Э. Я. Зандберг, Н. И. Ионон.— М.: Наука, 1969 .— 432 с.
28. Габович М. Д. Физика и техника плазменных источников ионов / М. Д. Габович.—М.: Атомиздат, 1972 .— 304 с.
29. Дьячков Б. Л., Крылов А. И., Кузнецов В. В., Семашко Н. Н. Натриевая мишень инжектора отрицательных ионов // *Атомная энергия.*— 1980.— Т. 49.— С. 246
30. Belchenko Yu., Dimov G., and Dudnikov V. A powerful injector of neutrals with a surface-plasma source of negative ions // *Nucl. Fusion.*— 1974.—V. 14 (1).— P. 113
31. Зандберг Э. Я. и Ионон Н. И. поверхностная ионизация // *Успехи физических наук.*— 1959.— Т. 67.— С. 581-623
32. Бельченко Ю. И., Димов Г. И., Дудников В. Г., Физические основы поверхностно-плазменного метода получения пучков отрицательных ионов.— Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1977.— 43 с.— Препринт 77-56.
33. Hiskes J. R., Schneider R. J. Formation of H- and D- ions by hydrogen and deuterium particle backscattering from alkali-metal surfaces // *PHYSICAL REVIEW B.*— 1981.— V. 23.— P. 949
34. Okumura Y., Fujiwara Y., Kashiwagi M., et al. Negative hydrogen ion source for TOKAMAK neutral beam injector (invited) // *Rev. Sci. Instrum.*— 2000.— V. 71 .— P. 1219

35. Бакшт, Ф. Г. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / Ф. Г. Бакшт и др.; под ред. Мойжеса Б. Я. и Пикуса Г. Е.—Москва: Наука, 1973.—480 с.
36. Vollmer O., Falter H., Frank P., Heinemann B., et al., Development of large radio frequency driven negative ion sources for fusion // Rev. Sci. Instrum.— 2000.— V. 71.— P. 939
37. Belchenko Yu., Gorbovsky A., Sanin A., and Savkin V. The 25 mA continuous-wave surface-plasma source of H⁻ ions // Rev. Sci. Instrum.— 2014.— V. 85 .— P. 02B108
38. Яфаров Р. К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий / Р. К. Яфаров .— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.— 216 с.
39. Belchenko Yu., Sanin A., and Sotnikov O. Comparative analysis of continuous-wave surface-plasma negative ion sources with various discharge geometry // Rev. Sci. Instrum.— 2014.— V. 85 (2).— P. 02B116
40. Speth E., Falter H. D., Franzen P., et al. Overview of the RF source development programme at IPP Garching // Nucl. Fusion.— 2006.— V. 46 (6).— P. S220
41. Skalyga V. A., Izotov I. V., Sidorov A. V. Study of hydrogen ECR plasma in a simple mirror magnetic trap heated by 75 GHz pulsed gyrotron radiation // Rev. sci. instrum.— 2017.— V. 88.— P. 033503
42. Franzen P., Wunderlich D., Fantz U., et al. On the electron extraction in a large RF-driven negative hydrogen ion source for the ITER NBI system // Plasma Phys. Controlled Fusion.— 2014.— V. 56 (2).— P. 025007.
43. Гинзбург В.Л. Волны в магнитоактивной плазме / Гинзбург В.Л., Рухадзе А.А.— Изд. 3-е.— Москва: ЛИБРОКОМ, 2013. - 255 с
44. Abdrashitov G., Belchenko Yu., Ivanov A., et al. Operation of RF driven negative ion source in a pure-hydrogen mode // AIP Conf. Proc.— 2015.— V. 1655.— P. 040009
45. Тиунов М. Полный расчет трехмерных квазистационарных электромагнитных полей в приближении сильного скин-эффекта методом

- граничных интегральных уравнений // Вестник НГУ.— 2014.— Т. 9 (2) .— С. 36-54
46. Liebhafsky H. and Winslow A., Cesium chromate phototube pellets // J. Appl. Phys.— 1947.— V. 18.— P. 1128
47. Belchenko Yu., Abdrashitov G., Ivanov A., et al. High voltage holding in the negative ion sources with cesium deposition // Rev. Sci. Instrum.— 2016.— V. 87.— P. 02B120
48. Müller K., Stark K., Emel'yanenko V., et al., Liquid Organic Hydrogen Carriers: Thermophysical and Thermochemical Studies of Benzyl- and Dibenzyl-toluene Derivatives // Ind. Eng. Chem. Res.— 2015.— V. 54.— P. 7967–7976
49. Абдрашитов Г. Ф., Бельченко Ю. И., Гусев И. А., и др., Характеристики мощного ВЧ-источника отрицательных ионов водорода для инжекторов нейтралов УТС // физика плазмы.— 2017.— Т. 43 (1).— С. 3–8
50. Wimmer C. and Fantz U. Dependence of the source performance on plasma parameters at the BATMAN test facility // AIP Conf. Proc.— 2015.— V. 1655.— P. 040004
51. Boers J.E. An interactive version of the PBGUNS program for the simulation of axisymmetric and 2-D, electron and ion beams and guns // Proceedings Particle Accelerator Conference, Dallas, TX.— 1995.— V. 4.— P. 2312-2313.
52. Abdrashitov G., Belchenko Yu., Ivanov A., et al. Emission properties of inductively driven negative ion source for NBI // AIP Conf. Proc.— 2016.— V. 1771 .— P. 030013
53. Belchenko Yu., Abdrashitov G., Deichuli P., et al. Inductively driven surface-plasma negative ion source for N-NBI use (invited) // Rev. of Sci. Instrum.— 2016.— V. 87.— P. 02B316
54. Котельников И. А., Астрелин В. Т. Теория плазменного эмиттера положительных ионов // Успехи физических наук.— 2015.— Т. 185.— С. 753

55. McNeely P., Dudin S. V., Christ-Koch S., et al. A Langmuir probe system for high power RF-driven negative ion sources on high potential // *Plasma Sources Sci. Technol.*— 2009.— V. 18.— P. 014011
56. Bacal M., Hatayama A., and Peters J., Volume production negative hydrogen ion sources // *IEEE Transactions on Plasma Science.*— 2005.— V. 33 (6).— P. 1845-1871
57. Solov'ev E. S., Il'in R. N., Oparin V. A., Fedorenko N. V. Ionization of gases by fast hydrogen atoms and by protons // *JETP.*— 1962.—V. 42 (3).— P. 659
58. Belchenko Yu., Ivanov A., Konstantinov S., et al., Efficient cesiation in RF driven surface plasma negative ion source // *Rev. Sci. Instrum.*— 2016.—V. 87.— P. 02B133
59. Oka Y. Studies of H⁻ source for large helical device-neutral beam injector (invited) // *Rev. Sci. Instrum.*— 2004.—V. 75.— P. 1803
60. Fantz U., Franzen P., and Wunderlich D. Development of negative hydrogen ion sources for fusion: Experiments and modeling // *Chem. Phys.*— 2012.— V. 398.— P. 7
61. Moehs D. P., Peters J., and Sherman J. Negative hydrogen ion sources for accelerators // *IEEE Trans. Plasma Sci.*— 2005.—V 33 (6).— P. 1786
62. Saadatmand K., Arbique G., Hebert J., and Valicenti R. Performance of a high current H⁻ radio frequency volume ion source // *Rev. Sci. Instrum.*— 1996.— V. 67.— P. 1318
63. Stockli M. P., Han B. X., Murray S. N., et al. Towards Understanding the Cesium Cycle of the Persistent H⁻ Beams at SNS // *AIP Conf. Proc.*— 2011.— V. 1390.— P. 123
64. Abdrashitov G., Belchenko Yu., Dranichnikov A., et al. Negative ion production in the RF multiaperture surface-plasma source // *AIP Conf. Proc.*— 2015.— V. 1655.— P. 040002
65. Tompa G. S., Carr W. E., and Seidl M. Work function reduction of a tungsten surface due to cesium ion bombardment // *Appl. Phys. Lett.*— 1986.— V. 49.— P. 1511

66. Taylor J. and Langmuir I., The Evaporation of Atoms, Ions and Electrons from Cesium Films on Tungsten // *journal of experimental and theoretical physics.*— 1933.— V. 44.— P. 423
67. McNeely P., Heineman B., Kraus W., et al. Langmuir probe studies on a RF ion source for NBI // *Fusion Eng. Des.*— 2001.— V. 56–57.— P. 493-498
68. Gago R. and Vázquez L. Production of ordered silicon nanocrystals by low-energy ion sputtering // *Appl. Phys. Lett.*— 2001.— V. 78.— P. 3316
69. Okumura Y., Fujiwara Y., Kashiwagi M., et al. Negative hydrogen ion source for TOKAMAK neutral beam injector (invited) // *Rev. Sci. Instrum.*— 2000.— V. 71.— P 1219
70. Grisham L. R. Magnetic insulation to improve voltage holding in electrostatic accelerators // *Physics of Plasmas.*— 2009.— V. 16.— P. 043111
71. Trump J. and Van De Graaff R. The Insulation of High Voltages in Vacuum // *J. Appl. Phys.*— 1947.— V. 18.— P. 327
72. Okumura Y., Hanada M., Inoue T., et al. Cesium mixing in the multi-ampere volume H⁻ ion source // *AIP Conf. Proc.*— 1990.— V. 210.— P. 169
73. Franzen P., Falter H.D., Fantz U., et al. Progress of the development of the IPP RF negative ion source for the ITER neutral beam system // *Nucl. Fusion.*— 2007.— V. 47 (4).— P. 264
74. Belchenko Yu., Ivanov A., Sanin A., et al. Effect of plasma grid bias on extracted currents in the RF driven surface-plasma negative ion source // *Rev. Sci. Instrum.*— 2016.— V. 87.— P. 02B119
75. Bacal M., Sasao M., Wada M., and McAdams R. Roles of a plasma grid in a negative hydrogen ion source // *AIP Conf. Proc.*— 2015.— V. 1655.— P. 020001
76. Wimmer C. and Fantz U. Size scaling of negative hydrogen ion sources for fusion // *AIP Conf. Proc.*— 2015.— V. 1655.— P. 040004
77. Goto I., Miyamoto K., Nishioka S., et al. Effect of Coulomb collision on the negative ion extraction mechanism in negative ion sources // *Rev. Sci. Instrum.*— 2016.— V. 87.— P. 02B918

78. Wimmer C. and Fantz U. Dependence of the source performance on plasma parameters at the BATMAN test facility // AIP Conf. Proc.— 2015.— V. 1655.— P. 040004
79. Wunderlich D., Mochalsky S., Fantz U., et al. Modelling the ion source for ITER NBI: from the generation of negative hydrogen ions to their extraction// Plasma Sources Sci. Technol.— 2014.— V. 23 (1).— P. 015008
80. McNeely P., Heineman B., Kraus W., et al. Langmuir probe studies on a RF ion source for NBI // Fusion Eng. Des.— 2001.— V. 56–57.— P. 493-498
81. Seidl M., Cui H. L., Isenberg J. D., et al. Negative surface ionization of hydrogen atoms and molecules // J. Appl. Phys.— 1996.— V. 79.— P. 2896
82. Ivanov A., Belchenko Yu., Deichuli P., et al. Negative ion based neutral injector: Beam formation and transport // AIP Conf. Proc.— 2016.— V. 1771.— P. 030012
83. Maurizio R., Fantz U., Bonomo F. and Serianni G. Characterisation of the properties of a negative hydrogen ion beam by several beam diagnostic techniques // Nucl. Fusion.— 2016.— V. 56.— P. 066012
84. Cristhian A. Valerio-Lizarraga, Ildefonso Leon-Monzon, and Richard Scrivens Negative ion beam space charge compensation by residual gas // Phys. rev. ST Accel. beams.— 2015.— V. 18.— P. 080101
85. Lieberman M. A. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing/ Lieberman M. A. Lichtenberg A. J.— John Wiley & Sons, 2005.— 794 p.