

*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**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**НОВОСИБИРСК – 2018**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Санин Андрей Леонидович – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Юшков Георгий Юрьевич – доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, ведущий научный сотрудник лаборатории плазменных источников.

Крылов Александр Иванович – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”», г. Москва, ведущий научный сотрудник лаборатории инжекционного нагрева отдела Т-15 института ядерного синтеза.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН», г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится « 19 » \_\_\_\_\_ сентября \_\_\_\_\_ 2018 г. в « 17:00 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан « 14 » \_\_\_\_\_ июня \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время одним из основных методов нагрева плазмы в экспериментальных термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы является инжекция высокоэнергетических 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 процентов 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 высокоэнергетических 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/см<sup>2</sup> — для источников с малой эмиссионной поверхностью, и до 45 мА/см<sup>2</sup> — 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 высокоэнергетических 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 поставлены и 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.

**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.

**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 Н<sup>+</sup> 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 мА/см<sup>2</sup>.

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 °С 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.

**Достоверность 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 объемом проанализированных данных, полученных автором в процессе подготовки работы и анализом работ, проведенных на других источниках ОИ инжекторов высокоэнергетических 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.

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.

**Структура работы.** Основное содержание работы изложено на 134 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 85 источников, списка сокращений и условных обозначений. Работа содержит 7 таблиц, 44 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, определены цель и задачи, показаны теоретическая, методологическая и информационная базы исследования; обоснованы основные элементы научной новизны; теоретическая и практическая значимость результатов исследования.

**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. 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 порядка 10 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 пучок должен иметь энергию 400 кэВ и выше. Так, для международного экспериментального токамака ИТЭР с малым радиусом 2 м будет необходима инжекция пучков высокоэнергетичных нейтралов с энергией порядка 1 МэВ.

При высоких энергиях частиц получение атомов за счет перезарядки положительных ионов становится малоэффективным. Так, при энергиях ионов  $H^+$  более 100 кэВ и ионов  $D^+$  с энергией более 200 кэВ выход нейтралов составляет всего 20% и с ростом энергии существенно уменьшается. 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 газовых мишенях при высоких энергиях отношение сечений процессов нейтрализации отрицательных ионов и ионизации высокоэнергетических атомов есть величина постоянная. Правильно подобранная толщина обдирочной газовой мишени позволяет получать равновесный выход атомов 55 – 60 процентов в широком диапазоне энергии исходного пучка ионов Н.

Ранее в ИЯФ для программы УТС разрабатывались различные варианты сильноточных импульсных ППИ, использующими газовый 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 были получены импульсные пучки ионов Н<sup>-</sup> с током до 4 А с плотностью тока 8 А/см<sup>2</sup>. В сотовом источнике с большой площадью катода (600 ячеек, площадь катода 60 см<sup>2</sup>), использующего сферическую двумерную геометрическую фокусировку потока ОИ на эмиссионные отверстия многоапертурной системы формирования был получен пучок ионов Н<sup>-</sup> током 11 А, энергией 20 кэВ в импульсах длительностью 1 мс. 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<sup>2</sup> был получен пучок ионов Н<sup>-</sup> током 1 А, эмиссионной плотностью тока 2 А/см<sup>2</sup> 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.

Для нагрева плазмы и поддержания тороидального тока в токамаке JT-60U (Япония) был разработан инжектор нейтралов, использующий разряд с накаливаемыми вольфрамовыми катодами и удержанием плазмы периферийным мультипольным магнитным полем. Источник такого инжектора обеспечивал получение пучков ионов Н<sup>-</sup> с током 18 А, энергией до 360 кэВ и длительностью импульсов 2 с (в проекте до 30 с). Недостатком источников с накаливаемыми катодами является необходимость регулярной замены катодов и необходимость непрерывной подачи цезия для компенсации запыления цезиевого покрытия на эмиттере вольфрамом, испаряемым с катодов. Кроме

того, наличие большого количества накаливаемых катодов усложняет обслуживание таких источников.

Для создания инжекторов установки ИТЭР было решено использовать источники ионов Н<sup>+</sup> с ВЧ генерацией плазмы. Характеристики источника ОИ, разрабатываемого для применения в ИТЭР приведены в левом столбце таблицы 1. Инжекция нейтралов в ИТЭР будет состоять из двух идентичных систем, каждая из которых оборудована ВЧ источником ОИ с областью вытягивания размерами 1,9 м·0,9 м, предназначенной для вытягивания пучка ионов D<sup>+</sup> с током 40 А пучка ОИ и мощностью каждого инжектора 16,5 МВт. Было разработано несколько прототипов источника ИТЭР, характеристики самого большого из них ELISE показаны в правом столбце таблицы 1 (в скобках указаны проектные параметры прототипа). В настоящее время работы по достижению проектных параметров прототипа продолжаются, причем основными проблемами используемых прототипов являются ВВ прочность источника и увеличение длительности импульсов.

Таблица 1. Параметры источника ИТЭР и его прототипа ELISE

Параметр	ИТЭР	ELISE
Частицы	H, D	H, D
Энергия пучка, кэВ	1000	36 (60)
Размеры, м <sup>2</sup>	1,95 x 0,9	1 x 0,9
Ток пучка H <sup>+</sup> , А	48	18,3
Плотность тока, мА/см <sup>2</sup>	34,5	18 (28)
Длительность импульса, с	3600	10 (3600)
Мощность разряда, кВт	800	360

В 2009 году в Институте ядерной физики был предложен план к строительству 1 МВ 5 МВт инжектора для использования в установках по магнитному удержанию плазмы. Инжектор включает в себя ионный источник, линию транспортировки, ускоритель и нейтрализатор. В 2014 году был создан отдельный экспериментальный стенд для получения пучка с током до 1,5 А и энергией до 120 кВ с длительностью импульса до 100 с и исследования транспортировки пучка через разделительную линию транспортировки на вход ускорителя. Полномасштабный источник с током до 9 А и энергией 120 кВ будет создан с учетом опыта полученного на экспериментальном стенде прототипа источника и после успешных испытаний на стенде и внесения необходимых изменений в конструкцию будет установлен в 5 МВт инжектор высокоэнергетичных атомов.

**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.

Источники отрицательных ионов можно разделить на 4 основные группы: плазменные, перезарядные, поверхностные и поверхностно-плазменные.

Поверхностно-плазменные источники основаны на использовании быстрых частиц плазмы, создаваемой вблизи электрода. Быстрые частицы плазмы (положительные ионы и нейтралы) бомбардируют электрод и создают поток распыленных и отраженных частиц. Отрицательные ионы образуются из этих быстрых частиц за счет процесса кинетической эмиссии.

Для создания плазмы применяют разряды в магнитном поле: пеннинговский, магнетронный, ВЧ и дуговой разряды. Поверхностные процессы являются ключевыми для плазмы в источниках с пеннинговской и магнетронной геометриями разряда. Интенсивная бомбардировка катода быстрыми ионами и активная вторичная ионно-электронная эмиссия необходима для стабильной работы разряда. Это обстоятельство усложняет поддержание стабильного цезиевого покрытия на катоде в длинных импульсах из-за его распыления высокоэнергетичными ионами плазмы с энергиями порядка 100 эВ. В случае магнетронной геометрии это может приводить к снижению эффективности генерации ОИ. 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 (как правило, молибдена) на анод источника и запылению цезиевого покрытия на аноде, что усложняет поддержание однородного цезиевого покрытия на аноде.

Для ослабления роли электродных процессов в генерации ОИ применяют удержание плазмы в периферийном мультипольном магнитном поле. Источником плазмы в этом случае могут выступать разряд с накаливаемым катодом или индукционный ВЧ-разряд. Накаливаемые вольфрамовые нити используются в качестве катодов с током порядка 1 кА при температуре нитей порядка 2300÷2600 °С. Источники с накаливаемыми катодами используются в инжекторах нейтралов с момента разработки первых систем нейтральной инжекции. Недостатком источников с вольфрамовыми катодами являются малый срок службы и запыление цезиевого покрытия на плазменном электроде испаряемым вольфрамом, что приводит к необходимости непрерывной подачи цезия в подобные источники. Использование ВЧ разряда для создания плазмы позволяет избавиться от этих недостатков.

Индукционный ВЧ-разряд возбуждается током, текущим по антенне, расположенной на боковой или торцевой поверхности источника плазмы. Разряд возбуждается и поддерживается вихревым электрическим полем, которое создается переменным магнитным полем. Таким образом, при использовании ВЧ разряда нет электродов, необходимых для поддержания работы дугового разряда. Для удержания плазмы используется периферийное мультипольное магнитное поле. Дрейф электронов на стенки газоразрядной камеры приводит к тому, что плазма индукционного ВЧ разряда заряжается положительно относительно стенок. Положительные ионы плазмы ускоряются этим потенциалом к электроду, контактирующему с плазмой. ОИ образуются на поверхности электрода за счет конверсии быстрых атомов и положительных ионов плазмы.

Далее во второй главе сформулированы основные требования к источникам ОИ для инжекторов УТС. Для получения большого тока пучка необходимо использовать поверхностно-плазменный механизм, обеспечивающий получение пучков ОИ с высокой плотностью эмиссии ОИ с большой эмиссионной поверхности. При этом необходимо обеспечить условия для поддержания высоковольтной прочности источника при работе с добавлением цезия. 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 ИОС.
4. Использовать геометрию отклоняющего магнитного поля, препятствующую удержанию, размножению и накоплению электронов в зазорах ИОС.
5. Уменьшить разрушение и оседание пучка
6. Уменьшить ток сопутствующих электронов, вытягиваемых из плазмы.

Перечисленные требования были реализованы в конструкции ВЧ источника отрицательных ионов водорода, разработанного в ИЯФ.

Принципиальная схема источника, показана на рисунке 1. Основными элементами источника являются ВЧ драйвер, расширительная камера и ионно-оптическая система (ИОС), магнитная система, цезиевая система и система термостабилизации электродов.

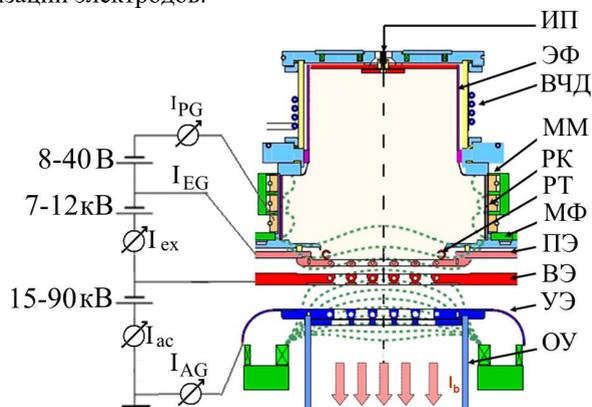


Рисунок 1. Принципиальная схема источника ИЯФ и схема электрических измерений. ИП – искровой поджиг, ВЧД – ВЧ драйвер, ЭФ – фарадеевский экран, ММ – постоянные магниты расширительной камеры, РК – расширительная камера, РТ – распределительная трубка подачи цезия, МФ – дипольный магнитный фильтр, ПЭ – плазменный электрод, ВЭ – вытягивающий электрод, УЭ – ускоряющий электрод, ОУ – опора ускоряющего электрода. Линии магнитного поля показаны пунктиром.

Плазма создается в цилиндрической камере драйвера с помощью индукционного ВЧ разряда в водороде (частота 4 МГц, мощность до 40 кВт).

Для защиты керамики драйвера от эрозии плазмой внутри драйвера устанавливался щелевой молибденовый экран фарадея. Плазма из драйвера распространяется в расширительную камеру с периферийным мультипольным магнитным полем, создаваемым постоянными магнитами. С нижней части расширительная камера ограничена плазменным электродом, на котором ОИ образуются за счет конверсии частиц плазмы. Для усиления поверхностной генерации ОИ в источник добавляется цезий, который вводится через распределительно-накопительную трубку при нагреве контейнера с цезий-содержащими таблетками. Для уменьшения разрушения ОИ вблизи плазменного электрода создается дипольное магнитное поле.

ОИ вытягиваются из плазмы через 21 коническое эмиссионное отверстие в плазменном электроде (с проходным диаметром 16 мм каждое) и формируются в пучок. В вытягивающем электроде сделаны конические отверстия диаметром 14 мм для прохождения пучка, в ускоряющем электроде используются щелевые отверстия шириной 16 мм, длиной 108 мм. Положительное напряжение смещения на плазменном электроде  $U_{PG} = 8 \div 40$  В относительно расширительной камеры служит для снижения потока сопутствующих электронов, вытягиваемых вместе с ОИ. Напряжение между плазменным и вытягивающим электродами  $U_{ex} = 7 \div 12$  кВ, необходимо для формирования пучка. Напряжение, приложенное между вытягивающим и ускоряющим электродами использовалось для ускорения пучка ОИ до полной энергии.

В конструкцию ВЧ источника ИЯФ были включены следующие принципиально новые элементы: термостабилизация электродов ИОС за счет их нагрева и охлаждения прокачкой горячего (с температурой до 220°C) теплоносителя; введение корректирующих магнитов для создания специальной конфигурации поперечного магнитного поля, предотвращающей осцилляции электронов и их накопление в ИОС; применение системы распределенной подачи цезия, формирующей направленный поток цезия непосредственно на поверхность эмиттера. Примененное в схеме инжектора ИЯФ разделение зоны источника ионов и зоны ускорителя позволило увеличить скорость откачки газа из источника, что уменьшило образование вторичных частиц и их осаждение на электроды ИОС источника, и способствовало повышению высоковольтной прочности источника.

**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.

Для оперативного контроля работы 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 1. Эти измерения позволяли

контролировать изменение характеристик ускоряемого пучка в течение импульса, а также определить состав эмиссионных токов источника.

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 Н<sup>+</sup> 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<sub>AG</sub>, а разность измеряемых токов I<sub>ac</sub> – I<sub>AG</sub> = I<sub>b</sub> определяет полный ток пучка ОИ на выходе из источника I<sub>b</sub>. Соответствие разностного тока I<sub>b</sub> и тока ОИ, выходящего из источника было подтверждено прямыми измерениями тока ускоренного пучка.

Разность токов I<sub>ex</sub> – I<sub>ac</sub> определяет суммарный ток на вытягивающий электрод I<sub>EG</sub>, который при оптимальных напряжениях ИОС обусловлен осаждением вытягиваемых электронов, эмиссией вторичных электронов с вытягивающего электрода и осаждением встречных положительных ионов. При вычислении суммарного тока I<sub>EG</sub> + I<sub>AG</sub> токи вторичных электронов и ток встречных положительных ионов компенсируются, так что величина суммарного тока позволяет дать верхнюю оценку для тока сопутствующих электронов, вытягиваемых из плазмы I<sub>e</sub> < I<sub>ex</sub> – I<sub>ac</sub> + I<sub>AG</sub>.

Сводка результатов, полученных в чисто-водородном и водородно-цезиевом режимах источника при вытягивании пучка ОИ с помощью многоапертурной и одноапертурной ИОС приведена в таблице 2. При многоапертурном вытягивании в чисто-водородном режиме был получен пучок ионов Н<sup>+</sup> 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. Это соответствует 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 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 <sup>2</sup>	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

Типичные осциллограммы эмиссионных токов источника и тока ионов Н<sup>+</sup> на цилиндр фардея (ЦФ), характеризующие стабильность генерации тока пучка в импульсах длительностью 1,7 с приведены на рисунке 2. При мощности ВЧ разряда 36 кВт ток пучка на выходе из источника  $I_b$  достигал величины 1,2 А, при этом полный ток пучка в плоскости ЦФ, определяемый сканированием ЦФ поперек пучка, имел величину 1 А и был в 2,4 раза выше тока, непосредственно измеряемого цилиндром фардея  $i_{FC}$ . Суммарный ток  $I_{EG} + I_{AG}$ , обусловленный в основном потоком сопутствующих электронов (см. выше) имел стабильную величину 1 А и был меньше тока пучка ионов  $I_b$ .

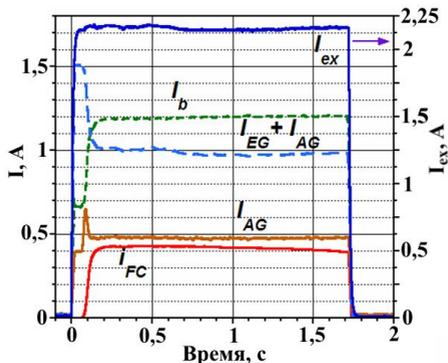


Рисунок 2. Осциллограммы эмиссионных токов источника в длинных импульсах при ВЧ мощности 36 кВт.  $I_{ex}$  — ток в цепи выпрямителя вытягивающего напряжения,  $I_{AG}$  — ток на ускоряющий электрод,  $i_{FC}$  — ток на ЦФ. Пунктиром показаны разностные токи:  $I_b$  — ток пучка,  $I_{EG} + I_{AG}$  — ток на вытягивающий и ускоряющий электроды. Драйвер без экрана,  $U_{ex} = 12$  кВ,  $U_{ac} = 73$  кВ,  $P_{H2} = 0,4$  Па,  $U_{PG} = 9,5$  В. Диаметр входного окна ЦФ 170 мм.

Аналогичные осциллограммы, подтверждающие высокую эффективность и стабильность генерации ионов Н<sup>+</sup> были получены в импульсах длительностью до 25 с. При работе источника 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. В обоих случаях применялась максимальная амплитуда ВЧ поля (с соответствующей мощностью ВЧ разряда  $P_{RF}$ ), а давление водорода  $P_{H2}$ , вытягивающее напряжение  $U_{ex}$  и напряжение смещения плазменного электрода  $U_{PG}$  были оптимизированы для получения максимального тока пучка.

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 внутри 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. ниже), 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.

Таблица 3. Характеристики источника с ЭФ в ВЧ драйвере и без него.

ВЧ драйвер	$P_{RF}$	$P_{H2}$	$I_b$	$U_{PG}$
Без ЭФ	36 кВт	0,4 Па	1,2 А	9,6 В
С ЭФ	23 кВт	0,5 Па	0,8 А	21 В

Была разработана и исследована направленная подача цезия на эмиттер, использующая ввод цезия непосредственно на периферию плазменного электрода через распределительную трубку. Расположение распределительных трубок относительно плазменного электрода показано на рисунке 3.

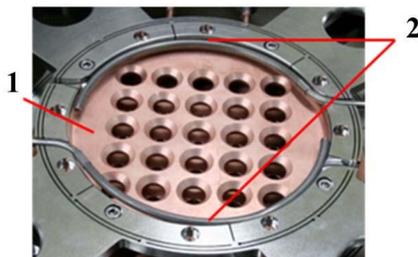


Рисунок 3. Фото плазменного электрода 1 и расположенных по его периметру распределительных трубок системы подачи цезия 2

Цезий подавался на поверхность плазменного электрода через отверстия диаметром 0,3 мм, просверленными с шагом 10 мм по периметру распределительных трубок. Нагрев трубок до температуры порядка 250 °С обеспечивался внутренним термокабелем. Перед подачей цезия плазменный электрод нагревался теплоносителем до температуры 100 – 120 °С, а источник запускался в чисто-водородном режиме генерации ОИ пучка. Ввод цезия производился за счет нагрева контейнера с таблетками, содержащими смесь хромата цезия с титаном, и регулировался температурой холодной точки цезиевой системы, которая охлаждалась сжатым воздухом. При поступлении цезия в источник и его перераспределении по поверхности плазменного электрода ток пучка ОИ плавно возрастал, а сопутствующий поток электронов уменьшался. Перераспределение цезия по поверхности плазменного электрода и активация цезиевого покрытия (удаление отравляющих примесей, оптимизация толщины покрытия) обеспечивалось бомбардировкой электродов быстрыми частицами ВЧ разряда.

Примененная система обеспечивала плавный ввод цезия в ВЧ разряд и продолжительную работу источника после однократного выделения цезия из таблеток. В частности, однократное выделение 0,5 г цезия из таблеток и его подача в распределительную трубку с тренировкой  $10 \div 20$  импульсами ВЧ разряда длительностью 5 секунд каждый обеспечивало 3,5-кратное увеличение тока пучка ОИ и последующую продолжительную работу источника в режиме с увеличенной генерацией ионного пучка.

Рассмотрим типичный цикл работы на однократной подаче цезия. Перед экспериментальным циклом 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. Начальный нагрев холодной точки и подача цезия в распределительную трубку привели к увеличению тока пучка ОИ до 0,8 А. После двух кратковременных дополнительных нагревов холодной точки ток пучка ОИ увеличился сначала до 1 А, а затем до 1,2 А. Высокий уровень генерации ОИ (с током пучка более 1 А) поддерживался в цикле продолжительностью более 2 месяцев. Длительные остановки и паузы в работе приводили к ухудшению генерации ОИ, что свидетельствовало о загрязнении цезиевого покрытия примесями. Последующая тренировка ВЧ разрядом приводила к восстановлению генерации ОИ. Для уменьшения травления цезия в течение длинных пауз в работе камера источника наполнялась водородом. В ходе описанного экспериментального цикла было проведено 2516  $1-2$  секундных импульсов получения пучка ОИ.

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.

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. Влияние нагрева электродов на высоковольтную прочность ускоряющего зазора ИОС проиллюстрировано на рисунке 4, на котором показано изменение ускоряющего напряжения в процессе тренировки источника, проведенной после четырех дней остановки в длительном цикле с получением пучка 1 А, 86 кВ (сплошными символами показаны импульсы с пробоями ускоряющего напряжения, незаполненными символами — импульсы без пробоев).

Продолжительной тренировкой ускоряющего зазора ИОС, проведенной без нагрева электродов (импульсы #  $1 \div 190$  на рисунке 4) было достигнуто

поддержание напряжения на ускоряющем зазоре величиной  $U_{ac}=72$  кВ. Нагрев плазменного и вытягивающего электродов до температуры  $110$  °С (график  $T$  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.

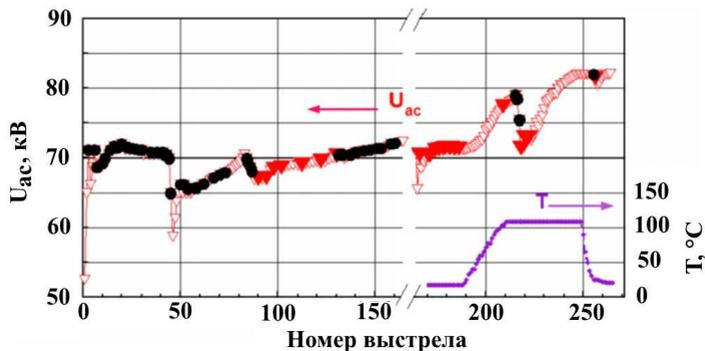


Рисунок 4. Тренировка ускоряющего зазора импульсами ВН в вакууме после четырехдневной паузы.  $U_{ac}$ - ускоряющее напряжение (пустые треугольники – импульсы без пробоев, круги – импульсы с пробоем, сплошные треугольники – импульсы с пробоем и восстановлением к концу импульса),  $T$  - температура вытягивающего и плазменного электродов.

Для снижения потока сопутствующих электронов, вытягиваемых совместно с ОИ из плазмы через эмиссионные отверстия плазменного электрода, на последний подается положительное смещение, приводящее к изменению состава приэлектродной плазмы, при котором часть электронов заменяется отрицательными ионами, а ток сопутствующих электронов значительно уменьшается. Типичные зависимости эмиссионных токов источника от величины положительного смещения на плазменном электроде  $U_{PG}$  приведены на рисунке 5. Сплошными маркерами показаны зависимости для драйвера с ЭФ (с отсчетом  $U_{PG}$  по верхней оси графика), незаполненными маркерами – для источника с драйвером без ЭФ (с отсчетом  $U_{PG}$  по нижней оси). При низком напряжении смещения, близком к потенциалу приэлектродной плазмы, ток вытягиваемых ОИ  $I_b$  и ток сопутствующих электронов  $I_c < I_{EG} + I_{AG}$  достигают максимума и уменьшаются при увеличении  $U_{PG}$ . Так, при увеличении положительного смещения до значения  $U_{PG} \sim 12$  В (в случае без ЭФ) и  $U_{PG} \sim 19$  В (в случае с ЭФ) ток сформированного пучка имеет величину  $I_b \sim 1$  А, тогда как ток сопутствующих электронов снижается более чем в 2 раза и становится меньше тока ОИ. При увеличении смещения до уровня  $U_{PG} > 18 - 28$  В (без ЭФ) и  $U_{PG} > 25 - 35$  В (с ЭФ) суммарный ток  $I_{AG} + I_{EG}$  выходит на стационарное значение 0,3 А, почти в два раза меньшее тока пучка ОИ. Большую часть тока  $I_{AG} + I_{EG}$  в этом случае могут составлять вторичные электроны и электроны, рожденные при обдирке ОИ, которые оседают на ускоряющем электроде.

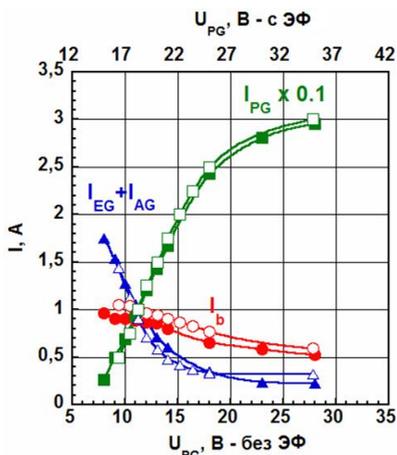


Рисунок 5. Зависимости тока пучка ОИ  $I_b$  (круги), тока сопутствующих электронов  $I_c$  (треугольники) и плазменного тока  $I_{PG}$  (квадраты) от напряжения смещения на плазменном электроде. Закрашенные маркеры – драйвер с ЭФ, незакрашенные маркеры – драйвер без ЭФ. Давление водорода в источнике 0,4 Па. Данные для конфигурации с ЭФ сняты при мощности ВЧ разряда 25 кВт и были линейно аппроксимированы на мощность 31 кВт. Данные для драйвера без ЭФ были сняты при мощности складываемой в плазму 31 кВт.

Приведенные на рисунке 5 зависимости эмиссионных токов, полученные из источника с двумя различными конфигурациями ВЧ драйвера имеют одинаковый вид (с учетом 7 В сдвига оси  $U_{PG}$  при переходе к драйверу с ЭФ) и величину токов (в пересчете на одинаковую мощность ВЧ разряда). Подобное совпадение зависимостей и величины эмиссионных токов показывает, что значения эмиссионных токов определяются плотностью и составом приэлектродной плазмы и зависят от приложенной разности потенциалов между плазмой и плазменным электродом. Сдвиг оси  $U_{PG}$  при переходе к драйверу с ЭФ объясняется увеличением потенциала плазмы, которое происходит при установке ЭФ в ВЧ драйвер, и обусловлено усилением диффузии электронов из плазмы ВЧ драйвера на металлический экран.

**В четвертой главе** приведены результаты исследований транспортировки пучка с энергией 100 кэВ на экспериментальном стенде, схема которого показана на рисунке 6. Стенд состоит из 3,1 м вакуумного бака диаметром 2,1 м с системой откатки, двух поворотных магнитов, использующихся для параллельного сдвига пучка на 44 см с оси источника, передвижного цилиндра фарадея (ЦФ) и калориметра пучка (КП), установленного на месте входа в ускоритель до энергий 0,5 – 1 МэВ.

Экспериментально доказано, что при транспортировке пучка ОИ через линию с поворотными магнитами производится эффективная очистка пучка ОИ от сопутствующих паразитных частиц. Доказано, что при типичном для

источников давления 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.

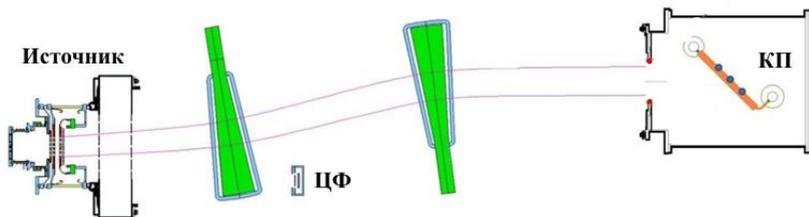


Рисунок 6. Схема транспортировки пучка на экспериментальном стенде.

Прямые электрические измерения характеристик пучка проводились с помощью ЦФ на расстоянии 1,6 м от источника. Типичное распределение плотности тока пучка в поперечном сечении, показано на рисунке 7. При токе ускоренного пучка  $I_b = 1,2$  А и энергии  $U_b = 85$  кВ максимальный ток ЦФ  $i_{FC}$  имел величину 0,43 А. Входное окно ЦФ показано кругом на рисунке 7. Оцениваемый из распределения полный ток пучка ОИ в плоскости ЦФ достигал 1 А. Уменьшение тока пучка при транспортировке до ЦФ обусловлено его 16-ти процентной обдиркой вблизи источника.

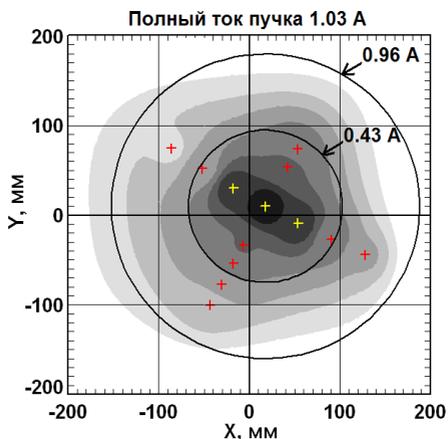


Рисунок 7. Распределение плотности тока в поперечном сечении пучка, измеренное ЦФ на расстоянии 1,6 м от источника. Крестиками показаны различные положения центра ЦФ при измерениях. Внутренний круг диаметром 170 мм показывает центральное положение ЦФ. Драйвер без экрана,  $P_{RF} = 36$  кВт,  $U_{ex} = 12$  кВ,  $U_{ac} = 73$  кВ,  $P_{H2} = 0,4$  Па.

Измерение характеристик пучка на выходе из линии транспортировки на расстоянии 3,5 м от источника проводилось с использованием КП. Y-профиль

пучка, входящего в плоскость КП, измерялся с помощью вертикального ряда термопар на КП. Распределение плотности тока пучка вдоль оси X измерялось путем сканирования пучка при изменении магнитного поля первого магнита (ближнего к источнику). Данные вертикального ряда термопар КП показаны на рисунке 8а при поле первого магнита  $B_1 = 21,5$  мТ. Ось Y указывает ординату термопар в вертикальном ряду КП. Ось X на рисунке 8б показывает горизонтальный сдвиг пучка вдоль плоскости калориметра при изменении магнитного поля.

Верхняя горизонтальная ось  $B_1$  показывает значение магнитного поля в центре первого магнита. Кривая  $\Delta T$  на рисунке 8б показывает повышение температуры центральной термопары калориметра (при  $Y = 0$ ) при нагреве импульсом пучка при его сдвиге по оси X. Она соответствует распределению плотности мощности пучка вдоль центральной горизонтальной линии калориметра. Небольшая асимметрия распределения пучка вдоль оси X (разница между сплошными и пустым кругами в левом крыле кривой  $\Delta T$  на рисунке 8б) может быть связана со вкладом нейтральной группы, которая образуется при обдирке пучка ОИ в области между магнитами. Отсутствие явно выраженного второго пика на рисунке 8б подтверждает низкую обдирку ОИ при давлении в баке  $3 \cdot 10^{-3}$  Па.

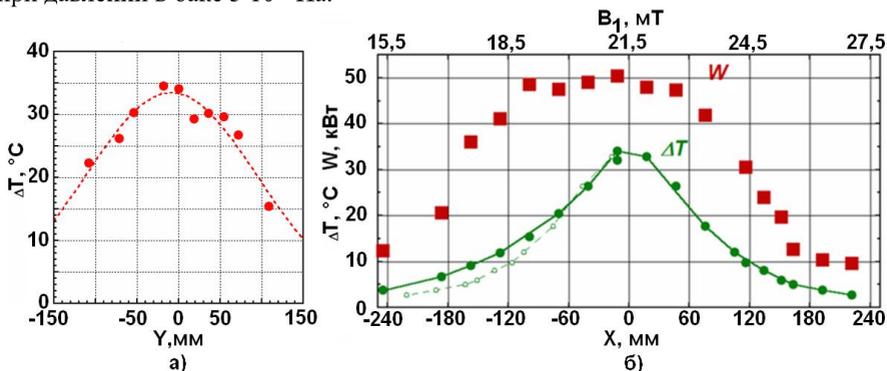


Рисунок 8. Профиль пучка на калориметре: а) повышение температуры в вертикальном ряду термопар на КП, Y - ординаты термопар; б) повышение температуры  $\Delta T$  центральной термопары КП (сплошные круги) и мощности W, попавшей на КП при сканировании пучка по оси X (квадраты). Пустые круги и пунктирная линия в левой части кривой  $\Delta T$  соответствуют точкам справа, симметрично отраженным относительно центра.  $I_b = 0,9$  А,  $U_{ex} + U_{ac} = 9 + 84$  кВ.  $P_{RF} = 22$  кВт, давление в баке  $3 \cdot 10^{-3}$  Па.

Квадраты W на рисунке 8б (нет кривой на рисунке) 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 60% от мощности пучка, введенного в ЛТ (0,9 А, 93 кВ). Важно отметить, что мощность, измеренная на калориметре, в этом случае включает в себя мощность группы нейтралов,

образующихся в зоне за вторым магнитом (дальним от источника) и часть мощности нейтральной группы, образующейся в зоне между источником и первым (ближним к источнику) магнитом. Вклад последней был измерен отдельно и составил 2 кВт. Недостающая часть остальной мощности пучка на выходе ЛТ  $W \sim 10$  и 12 кВт была измерена при направлении периферийных частей пучка на калориметр при смещении пучка на  $X = +220$  мм и  $X = -240$  мм на рисунке 8б. 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 соответствуют его гало, которое попадает выше и ниже окна калориметра. Также калориметром не может быть измерена большая часть нейтральной группы, образованная до отклонения пучка первым магнитом, так как она не попадает на калориметр. Согласно распределению  $\Delta T$ , показанному на рисунке 8, 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.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы. В работе были проведены исследования и экспериментально подтверждена эффективность заложенных в конструкцию ВЧ источника ИЯФ новых элементов. Были получены следующие результаты.

- Была достигнута стабильная работа источника в водородно-цезиевом режиме при низком расходе цезия и необходимой высоковольтной прочности зазоров ИОС. Были получены стабильные пучки ионов  $H^+$  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  $28 \text{ мА/см}^2$ . Ток сопутствующих электронов был не более 1 А. Размер пучка ОИ, проведенного на расстояние 1,6 м имел величину  $30 \times 35 \text{ см}^2$ .
- 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 высоковольтной прочности. В случае холодных электродов цезий накапливается вблизи кромок апертур электродов ИОС, а его распыление пучком способствует развитию пробоев. В случае нагрева электродов усиление процессов диффузии и десорбции цезия приводит к усиленному переносу цезия из осажденных слоев на периферию электродов, 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 высокоэнергетических групп на КП. Предложенная процедура измерения тока пучка позволяет оценить разрушение ОИ по мере их транспортировки на расстоянии 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.

- Через линию транспортировки с поворотными магнитами на расстояние 3,5 м проведено 80% полученного из источника пучка ОИ (при размерах входного окна калориметра 30x30 см<sup>2</sup>), 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.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах входящих в перечень ВАК:

1. Сотников О.З. Сравнительный анализ стационарных источников отрицательных ионов водорода с различной геометрией разряда / Ю.И. Бельченко, А.Л. Санин, О.З. Сотников // 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.

**СОТНИКОВ Олег Захарович**

**Исследование источника отрицательных ионов водорода  
для инжектора высокоэнергетичных нейтралов**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 28.03.2018 г.

Подписано в печать 29.03.2018 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.6 усл. печ.л., 1.3 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 4

---

Обработано на РС и отпечатано  
на ротапринтере ИЯФ СО РАН,

*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*