

На правах рукописи



Амиров Владислав Харисович

**ИНЖЕКТОР ПУЧКА БЫСТРЫХ АТОМОВ
С БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ**

**1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная
техника**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Новосибирск – 2024

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – доктор физико-математических наук Давыденко Владимир Иванович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ

Климов Александр Сергеевич – доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», профессор

Скалыга Вадим Александрович – доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», заместитель директора по научной работе

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Защита диссертации состоится «20» июня 2024 года в «14:00» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-01>.

Автореферат разослан «26» апреля 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

доктор физико-математических наук



Шехтман Лев Исаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Инжекция мощных пучков быстрых атомов изотопов водорода представляет собой неотъемлемую часть исследований в области управляемого термоядерного синтеза, активно продолжающихся в ведущих мировых лабораториях. Она является эффективным способом, который, в зависимости от назначения, позволяет обеспечивать нагрев и стабилизацию плазмы, генерацию токов в ней, а также доставлять атомы изотопов водорода внутрь плазмы и осуществлять ее диагностику. Актуальность данной работы заключается в том, что на сегодняшний день, наряду со строящимися установками с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы нового поколения, есть действующие установки, для которых требуется повышение мощности нагрева плазмы. Это установки средних размеров, для которых необходимы атомарные пучки мегаваттного уровня мощности. Стоит отметить, что дооснащение установок инжекторами быстрых атомов является сложной задачей, поскольку требуется интеграция устройства и его систем в существующую инфраструктуру. При решении подобных задач, в формировании технического задания существенную роль играют максимально допустимые размеры будущего инжектора и возможности существующих систем обеспечения.

Одной из таких установок является токамак TCV, построенный в Федеральной политехнической школе Лозанны (EPFL), Швейцария, в 1992 году. Для обеспечения ввода требуемой мощности в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН был разработан инжектор сфокусированного пучка быстрых атомов дейтерия с энергией 30 кэВ, мощностью 1 МВт и длительностью 2 с. В этом инжекторе источником положительных ионов является дейтериевая плазма, создаваемая высокочастотным (ВЧ) эмиттером. Многощелевая трехэлектродная ионно-оптическая система со сферическими электродами имеет диаметр эмиссионной области 250 мм. Она обеспечивает вытягивание ионов из плазмы, формирование, ускорение и баллистическую фокусировку пучка. Разница значений угловой расходимости поперек и вдоль щелей в сочетании с фокусировкой дает возможность получить пучок эллиптической формы. Размеры эллипса позволяют обеспечить аккуратный ввод пучка быстрых атомов через прямоугольный инжекционный порт токамака с размерами 170 x 200 мм.

Степень разработанности темы исследования

Интенсивное развитие инжекторов быстрых атомов началось после получения хороших результатов по созданию плотной и горячей плазмы на токамаке Т-11 в ИАЭ им. Курчатова, где инжекция нейтральных частиц была применена в качестве дополнительного способа нагрева плазмы. Это способствовало скорому распространению инжекционного нагрева по всем

лабораториям мира и началу масштабных исследований в этой области. Значительное количество разрабатываемых и построенных инжекторов различного типа дает возможность сделать вывод о достаточной степени разработанности этой области исследования. Известно, как и на основе каких ионов (положительных или отрицательных) получить тот или иной пучок атомов нужного энергосодержания (энергия, плотность тока и длительность). Существуют некоторые ограничения в реализации, но они скорее связаны с технической стороной обеспечения.

Проблемой инжекции мощных пучков в плазму являются малые размеры входных портов, которые зачастую меньше начальных размеров пучков, что приводит к заметным потерям мощности инжекции и затруднению ввода пучка в установку. Эффективным способом улучшения транспортировки и минимизации размеров пучков является их фокусировка. Разрабатываемые Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН многоапертурные ионно-оптические системы с баллистической фокусировкой позволяют эффективно транспортировать пучки большой мощности в установки с магнитным удержанием плазмы даже в тех случаях, когда размеры входных портов меньше начальных размеров пучков.

Основу данной работы составляют результаты работы по созданию инжектора быстрых атомов для токамака TCV.

Цель и задачи диссертационной работы

Для достижения поставленной *цели*, которая заключалась в *разработке, изготовлении и последующем запуске инжектора быстрых атомов с мощностью 1 МВт, длительностью 2 с и его интеграции в инфраструктуру токамака TCV*, потребовалось решить ряд задач, в числе которых:

- разработка ионного источника, обеспечивающего надежное формирование сфокусированного ионного пучка эллиптической формы;
- разработка криогенного вакуумного насоса, для создания и поддержания необходимых вакуумных условий в пучковом тракте;
- разработка нейтрализатора ионного пучка;
- разработка системы сепарации атомарного пучка от остаточных ионов, включающей в себя поворотный магнит и приемники ионов;
- разработка калориметра-приемника пучка для работы инжектора в автономном режиме;
- разработка конструктивной схемы инжектора, позволяющая существенно сократить длину пучкового тракта.

Научная новизна

Впервые разработана, изготовлена и экспериментально испытана многощелевая ионно-оптическая система со сферическими электродами для формирования первичного ионного пучка мощностью 1,4 МВт и длительностью 2 с. Система обеспечивает надежное формирование пучка

в условиях отсутствия активного охлаждения. Устойчивость системы к развитию термодформаций достигнута за счет специальных конструктивных решений, позволивших снизить жесткость электродов на периферии эмиссионной области.

Впервые разработан, изготовлен и экспериментально испытан полномасштабный калориметр, предназначенный для поглощения пучков полной мощности и длительности. Его приемное устройство состоит из пластин, снабженных специальными интенсификаторами теплообмена, которые существенно увеличивают интенсивность теплообмена за счет вращения (закручивания) потока, что дает возможность работы при плотностях мощности до $2,5 \text{ кВт/см}^2$.

В разработке и создании инжектора быстрых атомов применена методика программного моделирования систем инжектора. В результате этого появилась возможность оценивать уровень их напряженности и деформаций на стадии проектирования. Благодаря подробному моделированию и анализу удалось обойтись без дорогостоящих и длительных циклов разработки типа “проектирование – изготовление – испытание” и существенно сократить срок создания инжектора.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в создании и экспериментальной верификации моделей систем инжектора атомарного пучка мегаваттного уровня мощности для нагрева плазмы. Результаты, составляющие основу диссертационной работы, могут быть полезны для разработчиков инжекторов атомов, как устройств, в целом, так и для разработчиков отдельных систем.

Для разработчиков ионно-оптических систем

Разработанная и опробованная методика использования программного моделирования режимов работы электродов позволит сократить время проектирования и обойтись без изготовления и испытания промежуточных образцов. Технические решения, примененные в конструкциях электродов, будут полезны для снижения уровня деформаций электродов при тепловом расширении. Комплекс технологических решений, опробованных в данной работе, может быть использован в производстве многоапертурных электродов со сферическими поверхностями для обеспечения баллистической фокусировки пучка.

Для разработчиков приемников пучков

Предложенная конструкция калориметра, а также методика программного моделирования, использованная в его разработке, могут быть применены для создания приемников интенсивных пучков ионов и атомов с плотностями мощностей на поверхности принимающего устройства до $2,5 \text{ кВт/см}^2$. Для приемников с большими значениями плотности мощности, данные, полученные в работе, могут являться основой для дальнейших исследований в этом направлении, поскольку имеются хорошие перспективы по увеличению интенсивности теплообмена.

Методология и методы исследования

Главный методический подход, реализованный в работе, заключается в последовательном сочетании этапов разработки, изготовления и испытания узлов и систем инжектора. Разработка включила в себя аналитические расчеты и результаты численного моделирования, которые легли в основу конструкторской документации для производства. Изготовленные компоненты инжектора, в зависимости от назначения, прошли все необходимые гидравлические, вакуумные, прочностные, магнитные, электростатические и другие виды испытаний. Работоспособность инжектора быстрых атомов как изделия и стабильность заявленных параметров проверена в экспериментах по нагреву плазмы непосредственно на токамаке TCV.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие положения:

- Разработанная конструкция многоцелевой ионно-оптической системы инжектора обеспечивает формирование баллистически сфокусированного пучка ионов дейтерия мощностью 1,4 МВт и длительностью 2 с. Введение разрезов на периферии эмиссионной области позволяет поддерживать приемлемый уровень термических деформаций электродов.
- Разработанная конструкция модульного раздвижного калориметра обеспечивает поглощение и измерение профиля мощности сфокусированного пучка быстрых атомов дейтерия при плотности мощности на приемных пластинах до $2,5 \text{ кВт/см}^2$.
- Выполненная оптимизация элементов пучкового тракта позволила достигнуть компактности конструкции, площадь, занимаемая инжектором быстрых атомов, составляет 6 м^2 .

Степень достоверности и апробация результатов

Основные положения диссертации представлены в докладах на следующих конференциях:

- XLI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород, 10-14 февраля 2014 г.
- XLVIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород, 15-19 марта 2021 г.
- L Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 20-24 марта 2023 г.

Степень достоверности результатов подтверждается реально работающим инжектором быстрых атомов с заданными параметрами, о чем имеется значительное количество публикаций.

Публикации

Список публикаций, рекомендованных ВАК, приведенный в конце автореферата, содержит 5 работ. В рецензируемых научных изданиях опубликовано 4 статьи и получен патент на изобретение.

Личный вклад

Личное участие автора в создании инжектора быстрых атомов является существенно значимым. Для ионно-оптической системы автором были разработаны конструкции многоапертурных электродов, обеспечивающие надежное формирование первичного ионного пучка мощностью 1,4 МВт и длительностью 2 с. Для чего были созданы исходные твердотельные модели электродов, для которых был выполнен анализ их поведения под действием тепловых нагрузок во время формирования пучка и проведена оптимизация конструкции для снижения уровня деформаций. В процессе производства электродов автор принимал участие в обсуждении вопросов, касающихся технологии изготовления и выбора материала. Результаты разработки и создания ионно-оптической системы стали основой материала, опубликованного в статье [1], написанной автором лично, при совместном обсуждении с соавторами.

В конструкции калориметра все узлы и детали были разработаны автором лично. Для получения конфигурации приемного устройства пучка нейтралов были проведены необходимые расчеты. По результатам расчета сопряженного теплообмена была получена конструкция приемной пластины калориметра и определены требуемые параметры входящего потока. Гидравлический расчет выбранной конструктивной схемы системы подачи воды и проведенная оптимизация показали возможность их поддержания на требуемом уровне. Во время производства калориметра автор принимал непосредственное участие в технологической проработке. Материалы, содержащие результаты разработки и создания калориметра, легли в основу статьи [2], написанной автором лично. Совместные обсуждения с коллегами Капитоновым В.А., Ивановым А.А. позволили улучшить ее содержание.

Непосредственно автором были разработаны и рассчитаны системы и узлы инжектора, в числе которых: вакуумная камера на платформе, поворотный магнит, элементы экранирования криогенных насосов. Все расчеты, проведенные в программных комплексах Ansys и T-Flex, выполнены автором лично.

Непосредственно автором была проведена оптимизация конструкции элементов пучкового тракта, в результате чего была достигнута компактность конструкции. Площадь, занимаемая инжектором, составляет 6 м². При ключевом участии соискателя осуществлена сборка инжектора и его размещение в бункере токамака TCV.

Авторский вклад автора в статью [3] заключается в разработке конструкций многоапертурных электродов, которые были получены после выполненных им расчетов и проведенных оптимизаций. Для статьи [4] автором были созданы модели многоапертурных электродов и выполнены расчеты термомеханических деформаций. В публикации [5] указанная конструкция ионно-оптической системы разработана автором совместно с коллегами Дейчули П.П., Ивановым А.А., Сорокиным А.В.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Материал изложен на 126 страницах, содержит 95 рисунков, 4 таблицы и включает библиографический список из 88 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность создания инжекторов быстрых атомов с баллистической фокусировкой пучка для термоядерных исследований. Приведено краткое описание принципов работы инжектора атомарного пучка. Обсуждены задачи, которые требовалось решить для создания инжектора мегаваттного уровня мощности.

В первой главе диссертации кратко представлено описание токамака TCV, предназначенного для исследований высокотемпературной плазмы. Обсуждаются детали технического задания на разработку инжектора, в том числе: мощность пучка быстрых атомов и энергия частиц, требования к инжекционным портам, возможные габаритные размеры инжектора и место расположения на токамаке. Общий вид инжектора быстрых атомов представлен на рисунке 1, а его параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры инжектора

Параметр	Значение
Мощность пучка через порт токамака TCV	1,00–1,05 МВт
Стабильность энергии пучка	$\pm 5\%$
Номинальная энергия пучка	30 кэВ $\pm 5\%$
Основной атомный компонент	Дейтерий
Дополнительный атомный компонент	Водород
Длительность нейтрального пучка (без модуляции)	2 с
Диапазон энергии пучка	15–35 кэВ

Приводится краткий обзор систем, их назначение и расположение в составе инжектора, а также рабочие параметры и требования к ним.

Во второй главе рассматривается ионный источник инжектора (рисунок 2), основными элементами которого являются плазменный эмиттер и ионно-оптическая система (ИОС). Для формирования интенсивного пучка большого сечения используется плазменный ВЧ эмиттер с диаметром камеры 360 мм. ИОС является конструктивно и технологически наиболее сложной и значимой системой источника ионов. Она состоит из трех многоапертурных электродов, эмиссионные области которых сформированы отверстиями шелевой формы с различными профилями каналов. Кроме формирования пучка, ИОС обеспечивает баллистическую фокусировку за счет сферической

формы эмиссионных областей электродов. Главным критерием работоспособности ИОС является надежность процесса формирования первичного ионного пучка, которая определяется качеством полученного пучка в элементарной ячейке, устойчивостью сферических поверхностей и общей электрической прочностью системы. Основу главы составляют результаты, полученные при разработке и изготовлении многощелевых электродов сферической формы. Каждый электрод является прецизионным изделием, для изготовления которого требуется значительные производственные и временные затраты. Для того чтобы избежать изготовления и испытания промежуточных прототипов, процессу

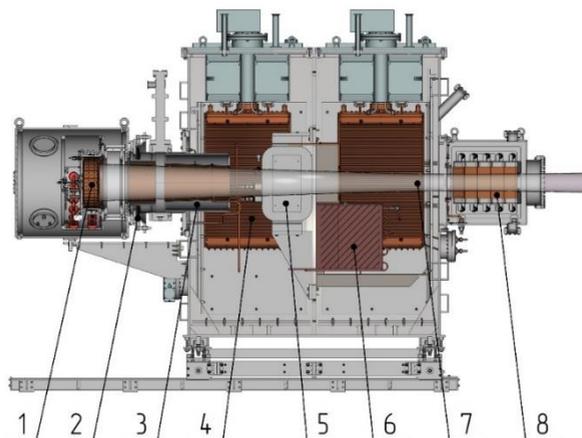


Рисунок 1 – Общий вид инжектора быстрых атомов: 1 – источник ионов (ВЧ драйвер, ионно-оптическая система), 2 – юстировочный узел, 3 – нейтронизатор, 4 – крионасосы, 5 – поворотный магнит, 6 – приемник ионов, 7 – пучок быстрых атомов, 8 – калориметр – приемник

производства предшествовал этап моделирования. Это позволило разработать конструкцию электродов готовую к производству и оценить влияние на них эксплуатационных факторов во время работы.

Разработка начиналась с выбора геометрии элементарной ускоряющей ячейки и ее расчета до получения оптимальной зависимости угловой расходимости от плотности тока. По результатам расчетов определялись профили каналов отверстий в каждом из электродов, их толщины и зазоры между ними (рисунок 3). Радиусы сферических поверхностей электродов задавались относительно радиуса сферы внутренней поверхности плазменного электрода, который близок к фокусному расстоянию ИОС. На основе этих данных создавались 3D-модели многоапертурных электродов.

На следующем этапе для полученных моделей проводилось моделирование и анализ теплового состояния в режиме рабочих нагрузок. Это позволило оценить состояние электрода с учетом степени его нагрева, величину деформаций и внутренних напряжений. Полученные данные использовались для разработки мер по снижению уровня деформаций электрода. В начальной геометрии модели электродов показали высокие значения деформаций, соизмеримые с межэлектродными зазорами. На периферии эмиссионной области для снижения жесткости были введены

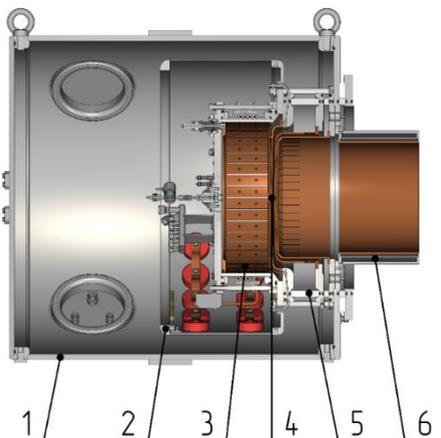


Рисунок 2 – Источник ионов: 1 – внешний экран, 2 – внутренний экран, 3 – плазменный ВЧ – эмиттер, 4 – электроды ионно-оптической системы, 5 – изоляторный узел ионно-оптической системы, 6 – нейтрализатор

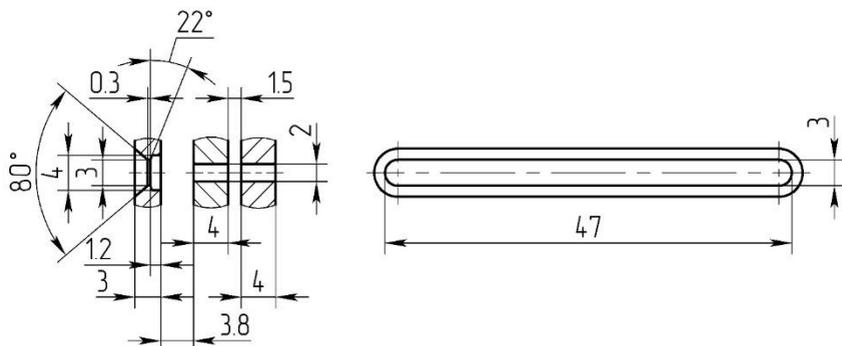


Рисунок 3 – Отдельная элементарная ячейка ионно-оптической системы. Вытягивание, формирование и ускорение первичного пучка ионов происходит слева направо

азимутальные разрезы, что снизило деформации до допустимого уровня. На рисунке 4 приведены значения деформаций электродов в начальной геометрии и после введения разрезов. По завершению этого этапа разрабатывалась конструкторская документация, которая была передана в экспериментальное производство Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН для технологической проработки.

Подробно обсуждается технология изготовления многоапертурных электродов. В начале формулируются требования к изделиям, проводится анализ конструктивных и технологических особенностей, оцениваются требования к точности изготовления. Это дает возможность определить предварительное количество технологических операций и их последовательность. Важное значение в достижении результата играет правильный выбор материала для изготовления, который должен иметь не только высокие тепло- и электропроводность, но и нужную технологичность – максимальное соответствие требованиям возможности изготовления. Сформулированным требованиям соответствует хромоциркониевая бронза марки БрХЦр.

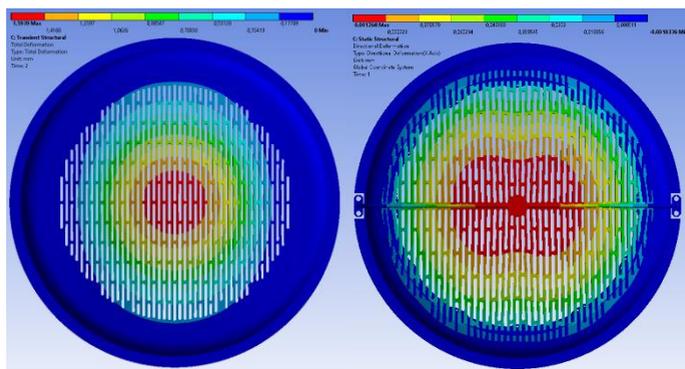


Рисунок 4 – Расчетные деформации. Слева – значение величины деформации в направлении оси пучка для начальной геометрии (максимум – 1,6 мм). Справа – значение величины деформации в направлении оси пучка после введения разрезов (максимум – 0,09 мм)

Данный материал принадлежит к группе низколегированных жаропрочных медных сплавов, способных изменять свою твердость в широком диапазоне и упрочняться в процессе старения. Это дает значительные преимущества с точки зрения механической обработки и позволяет возвращать утерянную форму сферическим поверхностям. После выбора материала проводилась финальная проработка технологического цикла (рисунок 5), в котором определялась окончательное количество

операций, их последовательность, требуемое технологическое оснащение, способы измерения и контроля качества изготовления.

Следует отметить, что для изготовления электродов был применен пятикоординатный станок с ЧПУ. Это позволило достигнуть нужных качества

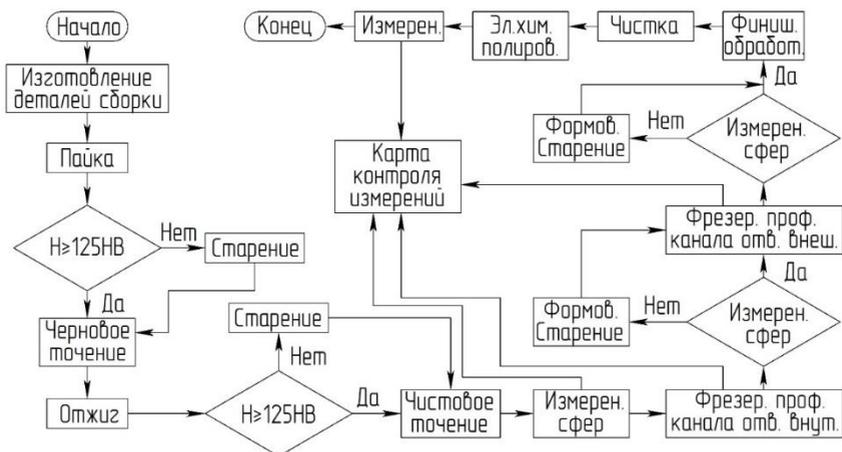


Рисунок 5 – Блок-схема производственного цикла электрода

и точности изготовления. Под управлением специальной программы стало возможным получение сложных профилей каналов отверстий.

Кратко обсуждается конструкция изоляторного узла, являющегося базовым элементом в ионно-оптической системе. Относительно изоляторного узла выстраиваются все элементы ионного источника. Он задает взаимное пространственное положение электродов и обеспечивает распределение потенциалов между ними. Рассмотрены элементы конструкции изоляторного узла и приводятся основные требования к ним.

Подробно обсуждается технология изготовления диэлектрической шпильки. С ее помощью элементы изоляторного узла стягиваются между собой с образованием вакуумноплотных соединений. Поэтому к механической и электрической прочностям шпилек предъявляются высокие требования. Рассматривается технология изготовления шпильки и дается обзор результатов испытания образцов на механическую прочность.

Обсуждение конструкции плазменного ВЧ эмиттера (рисунок 6) начинается с обоснования выбора типа источника, который определяется способом ионизации рабочего газа. Приводятся технические данные и принцип работы плазменного эмиттера. Важным элементом в конструкции источника плазмы является охлаждаемый фарадеевский экран, который защищает керамическую стенку от воздействия плазмы и тепловых нагрузок.

В конце главы дается обзор конструкций многоапертурных электродов ионно-оптических систем с баллистической фокусировкой для инжекторов

быстрых атомов, разработанных в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Приводится описание трех типов многоапертурных электродов и их конструктивные отличия. Дается сравнительный анализ теплового состояния при одинаковых условиях нагружения. Электроды, отличающиеся формой отверстий и способом их расположения в эмиссионной области, по-разному

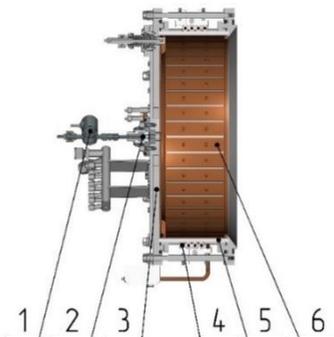


Рисунок 6 – Плазменный ВЧ эмиттер: 1 – газовый клапан, 2 – узел поджига, 3 – торцевая стенка, 4 – ВЧ антенна, 5 – боковая стенка, 6 – экран Фарадея

воспринимают влияние эксплуатационных факторов. Например, при меньшем уровне разогрева электрод с круглыми отверстиями показывает больший уровень внутренних напряжений, чем электроды со щелевыми отверстиями. Причем уровни деформаций во всех трех типах отличаются сотыми долями миллиметра. Расчет усталостной долговечности показал, что минимальное количество циклов нагружения выдержит электрод с круглыми отверстиями. Для снижения уровня деформаций в конструкции электродов были внесены одинаковые конструктивные изменения в виде азимутальных разрезов и проведен повторный расчет. При примерно равном уровне разогрева, с разницей 1–2 °С, в электродах существенно уменьшились внутренние напряжения. Минимального снижения деформаций, не менее чем в 17 раз, удалось достигнуть для электрода с круглыми отверстиями. Электроды с щелевыми отверстиями в рядном расположении и со смещением показали значения снижения деформаций в 17,9 и 27,5 раз соответственно. Значительных улучшений удалось добиться и по увеличению усталостной прочности электродов. Минимальное значение количества циклов нагружения удалось повысить до 20000.

В третьей главе диссертации обсуждается вакуумная система инжектора. Для создания и поддержания требуемых вакуумных условий система должна обеспечивать откачку основных потоков газа, сопутствующих получению пучка и его перезарядке, а также газовыделения с поверхностей элементов пучкового тракта, натекания через неплотные вакуумные соединения и потоки десорбированных частиц с криопанелей насосов. Для

этого системе необходимо обладать достаточной производительностью. Объем вакуумной системы инжектора образован соединенными между собой источником ионов, вакуумной камерой и калориметром и разделен на две части диафрагмой. Система в течение рабочего импульса длительностью 2 с подвергается газовой нагрузке из источника ионов величиной 20 л·торр/с. Поддержание давления на уровне $\leq 10^{-2}$ Па при такой нагрузке обеспечивается двумя идентичными криогенными насосами со скоростью откачки 150 тыс. л/с каждый, которые расположены по обе стороны диафрагмы. Помимо криогенного насоса система снабжена механическим насосом для начальной откачки до давления 1 Па и турбомолекулярным насосом для откачки до давления 10^{-5} Па.

Подробно обсуждается вакуумная камера инжектора. Помимо формирования объема вакуумной системы и части пучкового тракта, она обеспечивает взаимное расположение элементов инжектора. К вакуумной камере стыкуются ионный источник и калориметр, внутри нее расположены поворотный магнит, нейтрализатор, приемники ионов и крионасос, который расположен по обе стороны диафрагмы. Вакуумная камера должна иметь достаточную механическую прочность, поскольку от ее устойчивости зависит пространственное положение элементов инжектора, которое определяется местами их крепления к ней. Приводятся данные расчета напряженного состояния вакуумной камеры и обсуждается технология ее изготовления. Подробно рассмотрен процесс вакуумного отжига камеры, который позволяет удалить различные примеси из поверхностных слоев металла и снять внутренние напряжения, накопленные в процессах механической обработки и сварки.

Подробно обсуждена конструкция криогенного насоса. Обосновывается выбор типа насоса и проводится аналитический расчет его параметров, в котором определяются площади откачных поверхностей и тепловые нагрузки на них. Делается оценка тепловых нагрузок на теплозащитный экран панели и азотный бак. Приводится оценка расхода азота при захолаживании защитных экранов при запуске насоса. Рассматривается способ снижения тепловых нагрузок на азотный бак путем установки теплозащитных экранов.

Детально обсуждаются конструктивные особенности криогенного насоса. Приводится подробное описание элементов криогенного насоса, условий их эксплуатации и требований к ним. Обосновываются конечные размеры элементов и материалы для их изготовления. Строится модель криогенного насоса с учетом всех характерных особенностей и функционального назначения (рисунок 7).

Криопанели и защитные тепловые экраны работают при криогенных температурах и поэтому их тепловому состоянию уделяется особое внимание.

Полученные аналитические данные проверяются путем проведения моделирования и анализа теплового состояния с учетом расчетных нагрузок (рисунок 8).

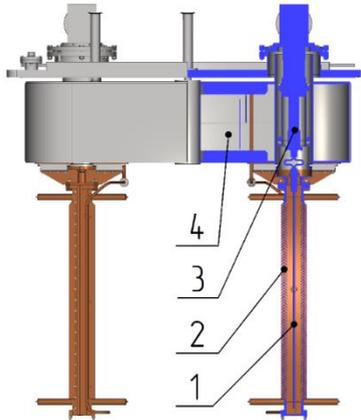


Рисунок 7 – Крионасос. Основные элементы: 1 – криоконденсационная панель, 2 – теплозащитный шевронный экран, 3 – криокулер, 4 – азотный бак

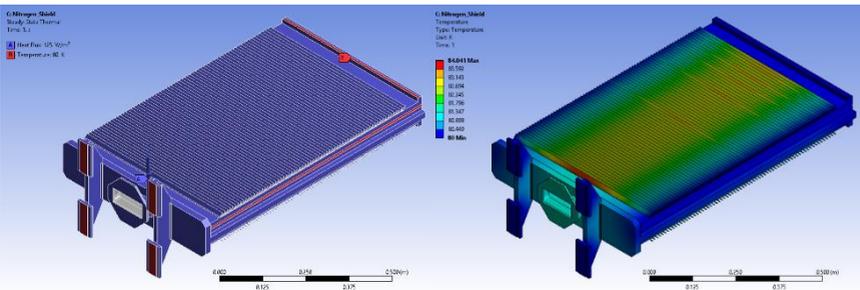


Рисунок 8 – Тепловой расчет экрана. Слева – граничные условия задачи: красным выделены зоны с температурой 80 К, синим – поверхность, воспринимающая общий падающий тепловой поток с плотностью 125 В/м^2 .

Справа – температурное поле теплового экрана:
 максимум – 84 К, минимум – 80 К

Важными элементами в поддержании температурного состояния криопанелей и теплозащитных экранов являются трехслойные экраны, которые защищают их от потоков тепла со стенок вакуумной камеры. Приводится конструктивная схема защитного экрана с указанием элементов и расположение экранов внутри вакуумной камеры.

Для выбранной схемы выполнена аналитическая оценка эффективности экранирования и снижения расхода жидкого азота за счет экранирования.

Полученные расчетные значения сравниваются с экспериментальными

данными, с которыми имеется хорошее согласие.

В четвертой главе описаны элементы пучкового тракта инжектора, которые обеспечивают преобразование первичного ионного пучка в пучок быстрых атомов и отделяют его от неперезарядившихся ионов.

Для оценки газовых условий использовалась упрощенная модель пучкового тракта инжектора, расчет которой позволяет определить профиль давления по длине пучкового тракта, потери и поток газа из инжектора в токамак.

Обсуждается назначение и конструктивные особенности нейтрализатора. Конструктивно он состоит из двух частей – короткой и длинной, которые разделены шибером. Для сокращения длины пучкового тракта длинная часть нейтрализатора максимально утоплена в вакуумную камеру. В длинной части нейтрализатора предусмотрен канал для дополнительного напуска мишенного газа. Нейтрализатор защищен двухслойным магнитным экраном, который позволяет снизить влияние внешнего магнитного поля до уровня, при котором оно не оказывает существенного увеличения разброса по поперечным скоростям образующихся нейтральных частиц. Приводится конструкция нейтрализатора с обозначением основных элементов (рисунок 9).

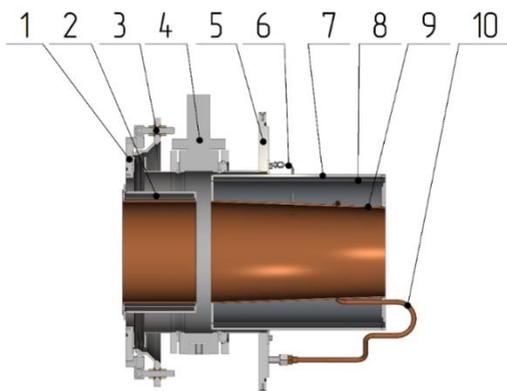


Рисунок 9 – Канал перезарядки (нейтрализатор). Основные элементы:
1 – фланец изоляторного узла, 2 – короткая часть канала перезарядки,
3 – узел подвеса, 4 – шибер, 5 – опорный фланец, 6 – трубка напуска мишенного газа, 7 – наружный магнитный экран, 8 – пермалловый экран, 9 – тепловой экран, 10 – трубка охлаждения

Рассматривается система сепарации атомарного пучка от ионов, которая состоит из отклоняющего магнита и приемников отклоненных частиц. В конструкцию системы интегрирована диафрагма, ограничивающая пучок и снижающая поток газа во вторую половину вакуумной камеры (рисунок 10).

Поясняется взаимное расположение элементов системы сепарации относительно друг друга и в вакуумной камере инжектора.

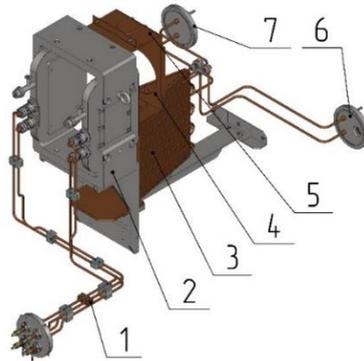


Рисунок 10 – Система сепарации атомарного пучка: 1 – система питания поворотного магнита, 2 – поворотный магнит, 3 – приемник положительных ионов, 4 – диафрагма, 5 – приемник отрицательных ионов, 6 – фланец вводов диафрагмы, 7 – фланец вводов приемника положительных ионов

Обсуждение поворотного магнита начинается с обоснования выбора типа и конструктивной модели, который построен по дипольной схеме и имеет обмотки возбуждения. Приведен расчет параметров катушки, определяются намоточные данные и строится предварительная модель магнита. Для выбранной модели проводится расчет, в котором определяются поле в зазоре магнита и его распределение, а также поле в магнитопроводах. Обсуждается методика расчета и технологии изготовления катушек возбуждения, которые должны соответствовать вакуумным требованиям.

Обсуждается конструкция приемников неперезарядившихся ионов. Перед началом конструирования проводилось численное моделирование отклонения частиц поворотным магнитом. Этот расчет позволил определить места падения частиц и оценить плотность мощности в отклоненных пучках. По траекториям разлета частиц определялись размеры приемников и их местоположение, а по величинам плотности мощности приемника требуемая интенсивность теплообмена в каналах охлаждения приемника.

Суммарная отводимая мощность составила 216 кВт при максимальном локальном значении ее плотности 3,26 кВт/см². Для снижения плотности мощности приемные поверхности были развернуты таким образом, чтобы угол падения частиц был минимальным. Эти изменения окончательно определили конструкцию приемников и основные требования к системе охлаждения.

Пятая глава диссертации посвящена разработке и созданию калориметра (рисунок 11). В начале дается вводное описание назначения и конструктивных особенностей приемников, применяемых для поглощения

интенсивных пучков. Формулируются общие требования к ним и возможные пути повышения энергоэффективности.

При создании калориметра нужно было увязать между собой два обстоятельства: создать устройства с наименьшим осевым размером и обеспечить его требуемым расходом теплоносителя из существующей системы водоснабжения. Для этого потребовалась разработка и создание устройства компактных размеров с высокой энергоэффективностью.

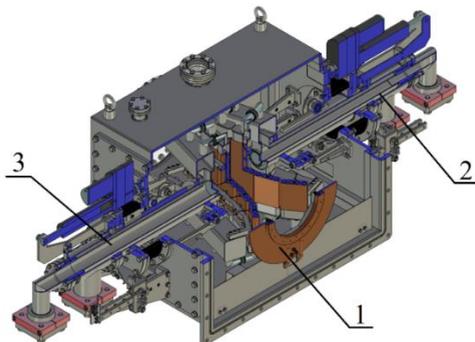


Рисунок 11 – Общий вид калориметра. Основные элементы:

- 1 – вакуумная камера с прицельным устройством (диафрагмой),
- 2 – узел правой приемной панели, 3 – узел левой приемной панели

Для уменьшения продольного размера калориметра была применена оппозитная модульная схема. При такой компоновке каждая приемная панель является независимым модулем, который обеспечен своей системой водоснабжения и вводом движения в вакуум, и требует только фиксации на фланце вакуумной камеры калориметра. Не связанные между собой механически приемные панели, смыкаясь внутри вакуумной камеры, образуют V-образный приемник. Такая форма приемника позволяет обеспечить надежное перекрытие пучка и получить наименьший размер вдоль оси. Для того, чтобы снизить тепловую нагрузку теплообменники были расположены под различными углами по отношению к оси пучка (рисунок 12). Максимальное значение плотности мощности после снижения составило $2,5 \text{ кВт/см}^2$. Теплосъем такой удельной мощности является довольно сложной задачей, требующей значительной интенсивности теплообмена. Для увеличения интенсивности теплообмена в каналы теплообменников были установлены интенсификаторы теплообмена – завихрители.

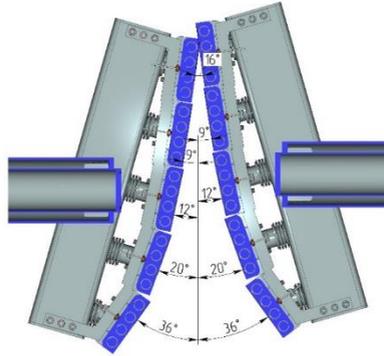


Рисунок 12 – Углы поворота теплообменников

Для оценки эффективности работы завихрителей были созданы расчетные модели, которые представляли собой модель теплообменника, максимально приближенную к реальной, в каналах которого устанавливались различные типы завихрителей. Модели рассчитывались в программном комплексе Ansys Fluent. Моделировался сопряженный теплообмен, при котором на поверхности теплообменника, по зонам, прикладывались различные значения падающей мощности, а внутри теплообменника моделировалось течение жидкости. В каналы устанавливались завихрители с различными диаметрами стержней, шагом навивки и числом заходов. Лучших значения были получены для завихрителя, показанного на рисунке 13.

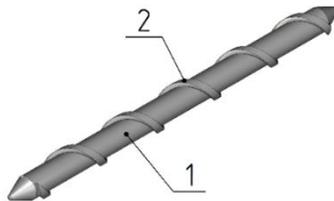


Рисунок 13 – Конструкция завихрителя: 1 – стержень, 2 – навивка из проволоки

В расчетах нагрев воды в каналах пластины составил в среднем $32\text{ }^{\circ}\text{C}$, падение давления $3,6\text{ атм.}$, а средний коэффициент теплоотдачи воды вблизи поверхности каналов охлаждения в среднем $8 \cdot 10^4\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$. Зависимость температуры поверхности пластины, поглощающей мощность пучка, от времени показана на рисунке 14.

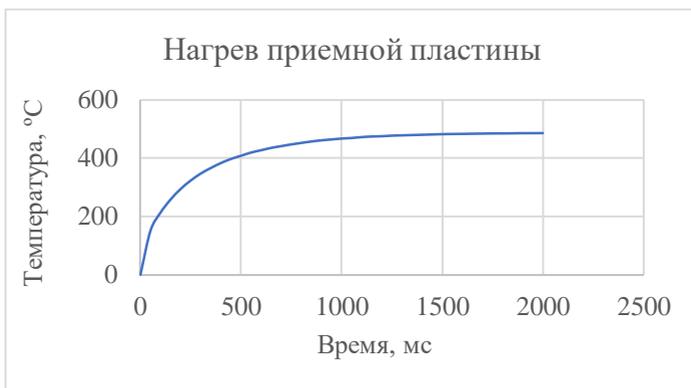


Рисунок 14 – Изменение температуры приемной пластины в зависимости от времени

Расчетный массовый расход воды для данного температурного режима составил 2 кг/с на один теплообменник. Таким образом, секундный и минутный расходы на одну приемную панель – 10 кг/с и 600 кг/мин соответственно.

В заключении представлены основные результаты работы.

В приложении А приведен акт, подтверждающий установку и использование разработанного инжектора на токамаке TCV.

В приложение Б включен патент на изобретение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В конструкции инжектора был реализован ряд технических и конструктивных решений, благодаря которым был создан инжектор пучка быстрых атомов с баллистической фокусировкой, который по своим характеристикам является уникальным в области техники инжекторов пучков быстрых атомов высокой интенсивности.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Разработан и изготовлен ионный источник, обеспечивающий надежное формирование сфокусированного ионного пучка эллиптической формы.
2. Разработан и создан криогенный вакуумный насос, для создания и поддержания необходимых вакуумных условий в пучковом тракте.
3. Разработан и создан нейтрализатор ионного пучка.
4. Разработана и создана система сепарации атомарного пучка от остаточных ионов, включающей в себя поворотный магнит и приемники ионов.
5. Разработан и создан калориметр-приемник пучка для работы инжектора в автономном режиме.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях:

1. Ion-Optical System with Ballistic Focusing of a Powerful Deuterium Atom Beam Injector for Plasma Heating / **V. Kh. Amirov**, A. I. Gorbovskiy, V. I. Davydenko [et al.]. – Текст : электронный // Physics of Atomic Nuclei. – 2021. – Vol. 84, nr 7. – P. 1285–1290. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778821070012>. – Дата публикации: 29.12.2021.
2. Receiver Calorimeter of Fast Atom Beam Injector in Megawatt Range / **V. Kh. Amirov**, T. D. Akhmetov, A. I. Gorbovskiy [et al.]. – Текст : электронный // Physics of Atomic Nuclei. – 2022. – Vol. 85, nr 1. – P. S50–S60. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778822130038>. – Дата публикации: 11.01.2023.
3. High-Power Neutral Beam Injector with Tunable Beam Energy for Plasma Heating and Stabilization / A. V. Brul, A. G. Abdrashitov, **V. Kh. Amirov** [et al.]. – Текст : электронный // Plasma Physics Reports. – 2021. – Vol. 47, nr 6. – P. 518–525. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1063780X21060040>. – Дата публикации: 17.06.2021.
4. Multi-slit triode ion optical system with ballistic beam focusing / V. Davydenko, **V. Amirov**, A. Gorbovsky [et al.]. – Текст : электронный // Review of Scientific Instruments. – 2016. – Vol. 87. – P. 02B303. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.4931788>. – Дата публикации: 29.09.2015.

Патент на изобретение:

1. Патент № 2794724 Российская Федерация, МПК H01J 27/08 (2006.01), H01J 37/08 (2006.01). Ионно-оптическая система источника ионов : № 2022125447 : заявл. 29.09.2022 : опубл. 24.04.2023 / **Амиров В. Х.**, Дейчули П. П., Иванов А. А., Сорокин А. В. ; заявитель ИЯФ СО РАН. – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.

Амиров Владислав Харисович

**ИНЖЕКТОР ПУЧКА БЫСТРЫХ АТОМОВ
С БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Сдано в набор 16.04.2024.
Подписано в печать 17.04.2024.
Формат 60×90 1/16. Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 2

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринте ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11