

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

*На правах рукописи*

АМИРОВ ВЛАДИСЛАВ ХАРИСОВИЧ

**ИНЖЕКТОР ПУЧКА БЫСТРЫХ АТОМОВ  
С БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ**

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук  
Давыденко Владимир Иванович

Новосибирск - 2024

## Оглавление

	Стр.
<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1 Инжектор пучка быстрых атомов для токамака TCV.....</b>	<b>11</b>
<b>Глава 2 Источник ионов с баллистической фокусировкой.....</b>	<b>15</b>
2.1 Ионно-оптическая система.....	15
2.1.1 Изоляторный узел.....	19
2.1.2 Электроды ионно-оптической системы.....	23
2.1.2.1 Расчет элементарной ячейки ионно-оптической системы .....	24
2.1.2.2 Моделирование термомеханических деформаций электродов. Минимизация термомеханических деформаций электродов ИОС.....	29
2.1.2.3 Технология изготовления электродов.....	37
2.2 Плазменный ВЧ эмиттер.....	45
2.3 Многоапертурные электроды ионно-оптических систем с баллистической фокусировкой пучка для атомарных инжекторов.....	49
<b>Глава 3 Вакуумная система инжектора.....</b>	<b>58</b>
3.1 Вакуумная камера инжектора.....	59
3.2 Система вакуумной откачки инжектора.....	64
3.3 Крионасос.....	65
3.3.1 Расчет основных параметров насоса.....	67
3.3.2 Конструкция крионасоса.....	69
3.4 Экранирование крионасосов.....	73
<b>Глава 4 Элементы пучкового тракта инжектора.....</b>	<b>77</b>
4.1 Система перезарядки первичного ионного пучка.....	77
4.1.1 Оценки газовых условий в пучковом тракте инжектора.....	78
4.1.2 Конструкция канала перезарядки.....	80
4.2 Система сепарации атомарного пучка.....	83
4.2.1 Поворотный магнит.....	84
4.2.2 Приемники непerezарядившихся ионов.....	92
<b>Глава 5 Калориметр.....</b>	<b>96</b>

5.1 Общие сведения.....	96
5.2 Расчеты плотности мощности на приемных пластинах калориметра.....	98
5.3 Теплогидравлические расчеты калориметра.....	102
5.4 Конструкция калориметра.....	107
<b>Заключение.....</b>	<b>114</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>116</b>
<b>Приложение А (справочное) Акт использования инжектора.....</b>	<b>125</b>
<b>Приложение Б (справочное) Патент на изобретение.....</b>	<b>126</b>

## Введение

### Актуальность темы исследования

Современная цивилизация основана на использовании электричества во всех сферах деятельности. Поэтому не удивительно, что уровень жизни в каждой отдельной стране фактически определяется уровнем потребления электроэнергии в расчете на одного человека. Развивающиеся страны с большим населением, такие как Китай и Индия, с каждым годом увеличивают выработку электричества и ее мировое потребление неуклонно возрастает [1-3]. Источники первичной энергии (ПЭ) для выработки электричества делятся на возобновляемые, в числе которых солнечная энергия, энергия ветра, энергия воды, геотермальная энергия и т.д., и те, которые имеют ограниченный ресурс, к которым относятся ископаемое (нефть, газ, уголь) и минеральное топливо (природные уран и торий) [4-7].

Особый интерес, как источник ПЭ, представляет Управляемый Термоядерный Синтез (УТС), который в перспективе способен заменить большую часть источников ПЭ [8-11]. В настоящее время в ведущих мировых лабораториях активно продолжаются исследования в области УТС начатые в середине прошлого столетия. Инжекция мощных пучков быстрых атомов изотопов водорода представляет собой неотъемлемую часть этих исследований, поскольку является эффективным способом, который, в зависимости от назначения, позволяет обеспечивать нагрев плазмы, ее стабилизацию и генерацию токов в ней, а также доставлять атомы изотопов водорода внутрь плазмы и осуществлять ее диагностику [12-15]. Во вновь строящихся установках с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы, системы атомарной инжекции уже входят в состав штатных систем наряду с вакуумной, магнитной, питания и пр. [16, 17]. Построенные ранее установки без инжекционного нагрева плазмы дооснащаются инжекторами быстрых атомов.

Инжекторы пучков быстрых атомов [18-22] прошли длительный путь развития от небольших маломощных лабораторных образцов до устройств с мощностями в десятки мегаватт и размерами в десятки метров. В инжекторах для получения интенсивных потоков быстрых атомов изотопов водорода с энергиями до 100 кэВ, используется нейтрализация (перезарядка) положительных первичных ионных пучков. Дальнейшее повышение энергии затруднено, поскольку сечение перезарядки положительных ионов на газовой мишени сильно падает с ростом энергии частиц.

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. Конфигурация вакуумной камеры и магнитной системы этого устройства позволяют управлять формой плазмы и ее положением, что важно для проведения различных исследований. Для дальнейшего развития экспериментов потребовалось введение дополнительной мощности нагрева за счет атомарной инъекции [23]. Размеры вводимого пучка были определены размерами существующих портов токамака, имеющих форму прямоугольника со сторонами 170 x 220 мм [24].

Для обеспечения ввода требуемой мощности в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН был разработан перезарядный 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 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 преобразовать пучок с круглой формой сечения, в пучок эллиптической формы нужных размеров и обеспечить его аккуратный ввод в прямоугольный инжекционный порт токамака.

### **Степень разработанности темы исследования**

Интенсивное развитие инжекторов быстрых атомов началось после получения хороших результатов по созданию плотной и горячей плазмы на токамаке T-11 в ИАЭ им. Курчатова, где инъекция 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 дают 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 многоцелевая 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 [25-27].

Впервые разработан, изготовлен и экспериментально испытан полномасштабный калориметр [28], 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 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 кВт/см<sup>2</sup>.
- Выполненная оптимизация элементов пучкового тракта позволила достигнуть компактности конструкции, площадь, занимаемая инжектором быстрых атомов, составляет 6 м<sup>2</sup>.

## 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, Звенигород, 20-24 марта 2023 г.

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



## Публикации

Материалы диссертации опубликованы в пяти печатных и электронных изданиях, рекомендованных ВАК.

В рецензируемых научных изданиях, индексируемых международными базами данных Web of Science и Scopus:

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.

## 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 [29] и T-Flex [30], выполнены автором лично.

Непосредственно автором была проведена оптимизация конструкции элементов пучкового тракта, в результате чего была достигнута компактность конструкции. Площадь, занимаемая инжектором, составляет 6 м<sup>2</sup>. При ключевом участии соискателя осуществлена сборка инжектора и его размещение в бункере токамака TCV.

Авторский вклад автора в статье 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 приведенная конструкция ионно-оптической системы разработана автором совместно с коллегами Дейчули П.П., Ивановым А.А. и 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.

## Глава 1 Инжектор пучка быстрых атомов для токамака TCV

Токамак TCV – это исследовательская установка Федеральной политехнической школы Лозанны (EPFL), Швейцария, построенная в 1992 году. TCV – это токамак среднего размера на котором проводятся эксперименты по исследованию физики магнитного удержания плазмы при различной геометрии плазменного шнура. Сечение вакуумной камеры токамака имеет форму вытянутого прямоугольника с соотношением сторон 1:3. В вакуумной камере такой формы, за счет изменения конфигурации магнитного поля, возможно получение не менее двенадцати различных форм сечения плазменного шнура. Магнитная система токамака состоит из шестнадцати полоидальных катушек, использование которых дает возможность управлять формой плазмы, ее положением и т.д. [31].

Результаты, получаемые в ходе экспериментов на токамаке TCV, имеют важное значение для оптимизации параметров будущего реактора-токамака. Реализация сценариев с гибким изменением формы плазмы и использованием мощной управляемой в реальном времени системы электронного циклотронного нагрева (ECRH) и генерации тока (ECCD), позволила добиться значимых результатов. Для дальнейших исследований потребовался дополнительный нагрев ионов на установке TCV. Применение системы инжекции пучков быстрых атомов (NBI) с энергией 20–35 кэВ и мощностью 1–3 МВт позволила бы расширить доступный диапазон ионных и электронных температур ( $T_i/T_e \approx 0,1–0,8$ ) в зависимости от комбинирования NBI/ECRH и плотности плазмы. Система NBI должна обеспечить TCV инструментом для изучения плазмы при соответствующих реактору соотношениях  $T_i/T_e \approx 1$ . С ее помощью предполагалось исследовать физику удержания быстрых ионов и МГД явлений в плазме вместе с эффектами вращения и сценарии удержания плазмы с высоким давлением. Обоснование выбора схемы нагрева NBI на TCV, представленное в работе [32], определило требуемые параметры инжекторов нейтрального пучка, геометрию экспериментов и возможных экспериментальных сценариев.

Для ввода двух пучков быстрых атомов в токамак потребовалась модернизация вакуумной камеры токамака, в частности изготовление двух дополнительных каналов (портов) ввода мощности. Для этой цели были изготовлены и установлены два патрубка из нержавеющей стали прямоугольной формы с размерами 170 x 220 мм. Стыковка инжекторов к ним должна осуществляться через специальные соединительные элементы, которые образуют часть пучкового тракта между вакуумной камерой TCV и инжектором [24].

Помимо обеспечения требуемых параметров атомарной инжекции также требовалось обеспечить возможность размещения каждого инжектора в экспериментальном зале на площади не более  $6 \text{ м}^2$  и подключения к существующим системам обеспечения (вода, криогеника).

С учетом изложенных требований специалистами Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН был спроектирован и изготовлен инжектор сфокусированного пучка быстрых атомов дейтерия с энергией частиц 30 кэВ общий вид которого представлен на рисунке 1.1, а основные параметры приведены в таблице 1.1. Инжектор обеспечивает получение атомарного пучка мощностью 1 МВт и длительностью импульса 2 с. Данный инжектор является представителем семейства инжекторов быстрых атомов с баллистической фокусировкой, которые разрабатываются Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

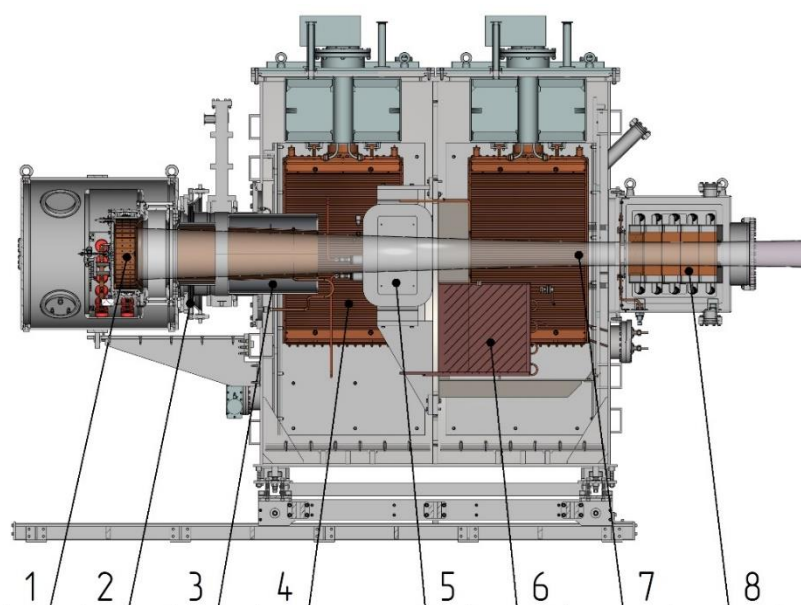


Рисунок 1.1 – Общий вид инжектора быстрых атомов: 1 – источник ионов (плазменный ВЧ эмиттер, ионно-оптическая система), 2 – юстировочный узел, 3 – нейтрализатор, 4 – крионасос, 5 – поворотный магнит, 6 – приемник ионов, 7 – пучок быстрых атомов, 8 – калориметр – приемник

В ионном источнике инжектора для получения первичной плазмы достаточной плотности и однородности применен высокочастотный плазменный эмиттер. Источники плазмы подобного типа рассчитаны на длительную работу и, в основном, не нуждаются в большом количестве сервисных мероприятий по их обслуживанию в сравнении с источниками с дуговым разрядом. Плазменный ВЧ эмиттер примыкает непосредственно к изоляторному узлу ионно-оптической системы. Ионизация газа осуществляется за счет введения высокочастотной мощности при помощи индуктора (антенны) с рабочей частотой около 4 МГц. Входная ВЧ мощность в плазменной камере составляет до 40 кВт. ВЧ катушка (антенна) намотана на камеру с диаметрами 360 x 346 мм и длиной 120 мм, которая изготовлена из оксида алюминия.

Для защиты керамики от распыления и металлизации внутри плазменной камеры расположен медный фарадеевский экран.

Для получения первичных ионных пучков, в ионном источнике этого инжектора, используется многоапертурная трехэлектродная ионно-оптическая система. Электроды системы имеют эмиссионные области, расположенные на поверхностях сферических сегментов с основанием диаметром 250 мм. Они обеспечивают формирование, ускорение и фокусировку первичного ионного пучка. Фокусное расстояние ионно-оптической системы – 4,1 м [25].

Ионно-оптическая система формирует в номинальном режиме сфокусированный пучок ионов дейтерия с током до 45 А и энергией 30 кэВ. Первичный ионный пучок перезаряжается в атомы на газовой мишени перезарядного канала (нейтрализатора). Не перезарядившиеся ионы отклоняются магнитом и попадают в водоохлаждаемые приемники.

Вакуумная камера инжектора имеет прямоугольную форму. Она является базовым элементом инжектора и определяет взаимное пространственное положение всех систем (кроме питания и контроля) относительно друг друга и является частью пучкового тракта. Вакуумная камера разделена на две равные по объему части. Внутри вакуумной камеры располагаются нейтрализатор (его длинная часть), поворотный магнит, крионасосы и приемники неперезарядившихся ионов. Вакуумная камера расположена на подвижной платформе, которая обеспечивает ее перемещение в направлении к токамаку и от него. Откачка вакуумной камеры инжектора производится двумя криогенными насосами.

Таблица 1.1 – Параметры инжектора

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

Для измерения мощности пучка быстрых атомов и обеспечения возможности работы инжектора в автономном режиме (без инъекции в плазму) на выходе вакуумной камеры пристыкован раздвижной калориметр. Калориметр позволяет принять пучок полной

длительности – 2 с. На рисунке 1.2 приведена фотография инжектора в рабочем положении на токамаке TCV.

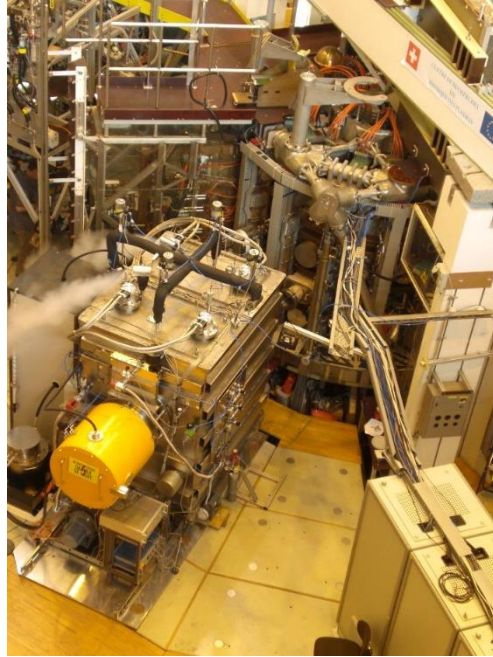


Рисунок 1.2 – Инжектор быстрых атомов в рабочем положении

Первый инжектор быстрых атомов был запущен в эксплуатацию в 2015 году. С результатами экспериментов можно ознакомиться на сайте <https://www.epfl.ch>, где имеются соответствующие ссылки на публикации в журналах.

## Глава 2 Источник ионов с баллистической фокусировкой

Важнейшими элементами в составе источника ионов инжектора быстрых атомов являются источник плазмы и система формирования пучка – ионно-оптическая система (ИОС) [33-35]. От согласованности работы этих систем, которая приобретает особую значимость при обеспечении возможности изменения энергии инжектируемых частиц, зависит стабильность мощности пучка в течение длительности импульса. Для каждого режима должно обеспечиваться оптимальное сочетание параметров плазмы, в числе которых: концентрация ионов ( $n_i$ ) и электронная температура ( $T_e$ ), с напряженностью ускоряющего электрического поля. Источник плазмы, помимо обеспечения стабильного горения разряда, должен создавать магнитные и электростатические поля нужной конфигурации для транспортировки ионов в зону вытягивания тока. Ионно-оптическая система должна создавать наилучшее сочетание электростатических полей и обеспечивать его (сочетания) стабильность. Главным требованием для обеих систем является высокая надежность при относительной простоте конструкции. На рисунке 2.1 приведена конструкция источника ионов рассматриваемого инжектора быстрых атомов.

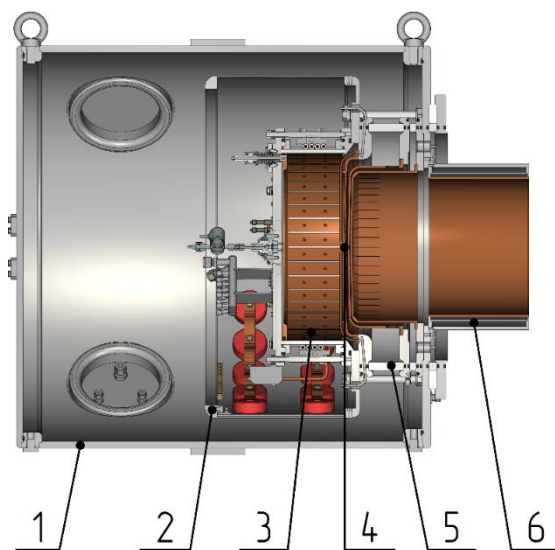


Рисунок 2.1 – Источник ионов: 1 – внешний экран, 2 – внутренний экран, 3 – плазменный ВЧ – эмиттер, 4 – электроды ионно-оптической системы, 5 – изоляторный узел ионно-оптической системы, 6 – нейтрализатор

### 2.1 Ионно-оптическая система

Одной из важнейших задач при разработке источников ионов является правильный выбор конструкции системы формирования ионного пучка – ионно-оптической системы (ИОС). ИОС

является конструктивно и технологически наиболее сложной и ответственной системой в составе источника ионов. Она определяет геометрию электродов и величины потенциалов, которые необходимо приложить к электродам, чтобы извлечь ионы из плазмы, сформировать в пучок, ускорить их до требуемой энергии при минимальном взаимодействии с электродами и выпустить с малой угловой расходимостью. Именно относительно ИОС выстраиваются остальные системы инжектора быстрых атомов.

Конструкция ионно-оптической системы определяет форму, размеры и конструктивные особенности практически всех систем инжектора. Обычно, она состоит из нескольких многоапертурных электродов, эмиссионные области которых сформированы отверстиями круглой или щелевой формы. В зависимости от компоновки, электроды могут иметь свои опорные диэлектрические элементы или располагаться на общем изоляторном узле, как показано на рисунке 2.2. В многоапертурных ионно-оптических системах получение первичного ионного пучка происходит путем сложения отдельных пучков, которые проходят процесс формирования и ускорения в элементарных ячейках системы. Элементарная ячейка образуется из согласованных отверстий на каждом из электродов, причем все отверстия имеют свой, отличный от других, профиль канала. Качество первичного ионного пучка зависит от качества пучков, полученных в элементарных ячейках, что подразумевает создания одинаковых условия во всех ячейках. Вытягивание, формирование, ускорение и фокусировка первичного ионного пучка,

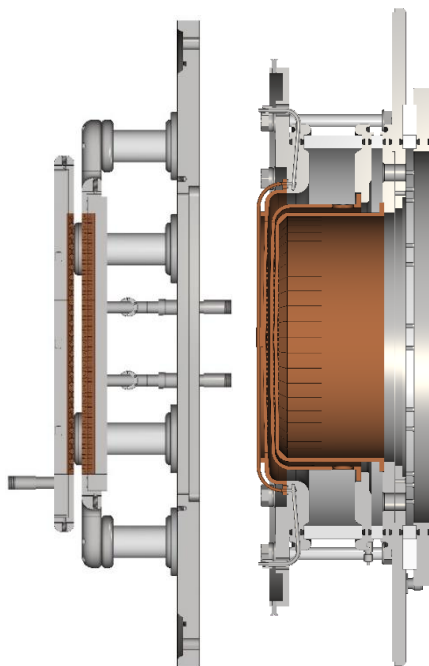


Рисунок 2.2 – Трехэлектродные ионно-оптические системы: слева – электроды через изолирующие стойки опираются на несущий фланец; справа – электроды расположены на изоляторном узле. Вытягивание, формирование и ускорение первичного пучка ионов происходит слева направо



должны происходить при оптимальной зависимости плотности тока и угловой расходимости. Высокая плотность тока и ее начальное достаточно однородное распределение по сечению пучка являются основными требованиями к ионным пучкам большого сечения, используемых для нагрева плазмы. Для достижения максимальной плотности тока в пучке на участке транспортировки угловые расходимости отдельных пучков, формируемых в элементарных ячейках ионной оптики, должны быть минимальными. Для пучков, вводимых в токамаки среднего размера и открытые магнитные системы этот фактор является определяющим, поскольку инжекционные порты установок имеют небольшие размеры. Важную роль в достижении оптимума между плотностью тока и угловой расходимостью играет положение плазменной границы.

Особенность формирования ионного пучка, получаемого с помощью газового разряда, состоит в том, что одним из электродов, непосредственным источником заряженных частиц, как и в плазменных источниках электронов [36, 37], является граница плазмы, положение и форма которой зависят от ее параметров и внешних полей. Значительное влияние на форму и положение плазменной границы оказывает точность профиля канала отверстия в плазменном электроде (рисунок 2.3). В этой связи особую значимость приобретает качество изготовления элементов ионно-оптической системы.

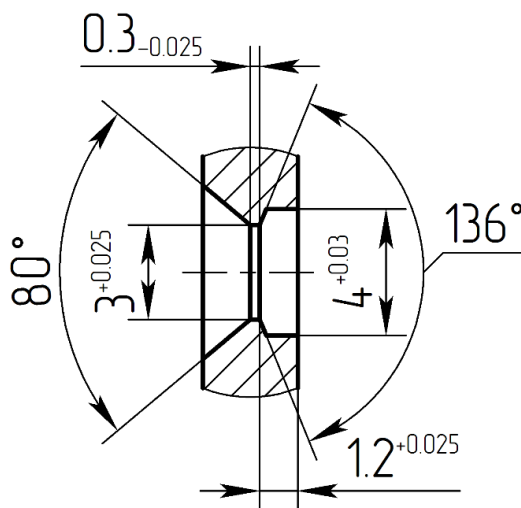


Рисунок 2.3 – Исполнительные размеры профиля канала щелевого отверстия плазменного электрода

Главным критерием работоспособности ИОС является надежность процесса формирования первичного ионного пучка, которая определяется качеством полученного пучка в элементарной ячейке и общей электрической прочностью системы. На надежность системы оказывают существенное влияние деформации электродов, которые возникают в результате нагрева вторичными частицами. Поэтому, для надежной работы системы является необходимым

обеспечение рабочего состояния электродов при котором их деформации минимальны. Для систем, формирующих интенсивные пучки с большими длительностями импульсов, это предполагает наличие активного охлаждения электродов или введение конструктивных элементов, способных частично поглощать деформации, возникающие при тепловом расширении. В начальном варианте компоновки ионно-оптической системы предлагалась конструкция, представленная в [38]. Минимизация тепловых деформаций в результате нагрева вторичными частицами в данной системе решена путем разбиения электродов на сегменты, каждый из которых имеет активное охлаждение. Подача и слив охлаждающей жидкости для сегментов осуществляется по каналам, пролегающим внутри держателей электродов. Наряду со значимыми преимуществами, в числе которых: меньшие деформации электродов, простота изготовления сегментов электродов, отсутствие дорогостоящих керамических изоляторов, от нее пришлось отказаться. Построение инжектора начинается с определения необходимой (требуемой) эмиссионной площади, относительно размера которой выстраивается конструкция инжектора, где определяющим является ее форма. Круглая форма эмиссионной области при равности площадей всегда будет иметь меньшие габариты в сравнении с областями других форм. Этот факт хорошо иллюстрирует сравнение двух ионно-оптических систем для формирования ионного пучка с током 150 А и энергией частиц 15 кэВ, представленных на рисунке 2.4.

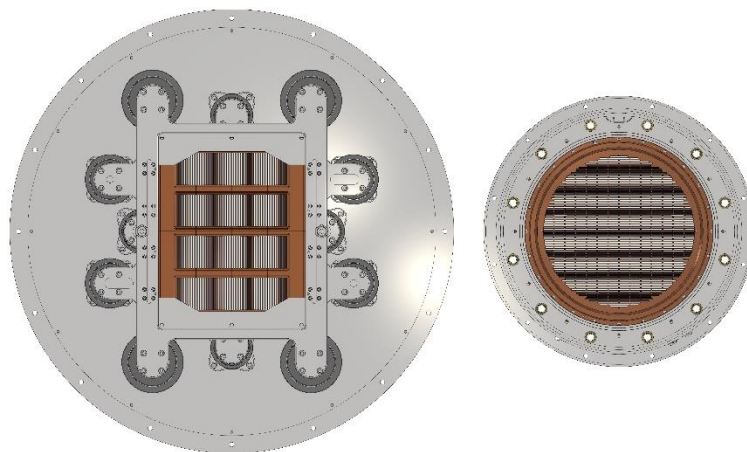


Рисунок 2.4 – Сравнение габаритных размеров ионно-оптических систем с различными формами эмиссионных областей: слева – прямоугольная; справа – круглая

Габаритный размер системы с прямоугольной эмиссионной областью составляет 992 мм, против 605 мм у системы с круглой формой. Поэтому в стремлении получить инжектор атомов с меньшими габаритными размерами была выбрана более компактная ионно-оптическая система, состоящая из элементов круглой формы. Эта система, с точки зрения изготовления, является более сложной, к тому же конструктивные особенности электродов не позволяют обеспечить их активного охлаждения. Минимизация деформаций электродов, возникающих в результате

нагрева вторичными частицами, решается путем локального снижения жесткости, что позволяет снизить уровень внутренних напряжений.

### 2.1.1 Изоляторный узел

Изоляторный узел является базовым элементом, относительно которого идет построение элементов пучкового тракта и систем инжектора быстрых атомов. Основное назначение изоляторного узла – это задание взаимного пространственного положения электродов и обеспечение распределения потенциалов между ними. Не менее важной функцией изоляторного узла является обеспечение нужного теплового состояния электродов, которые подвержены значительным тепловым нагрузкам в процессе генерации первичных ионных пучков. Рассматриваемый изоляторный узел обеспечивает инерционное охлаждение электродов, за счет передачи тепла от электродов к фланцам изоляторного узла. Все элементы изоляторного узла являются телами вращения. Слева к изоляторному узлу стыкуются источник плазмы, а справа к нему примыкает короткая часть перезарядного канала. Также, к нему крепятся магнитные экраны, которые защищают ионно-оптическую систему от воздействия внешних магнитных полей. Общий вид изоляторного узла приведен на рисунке 2.5.

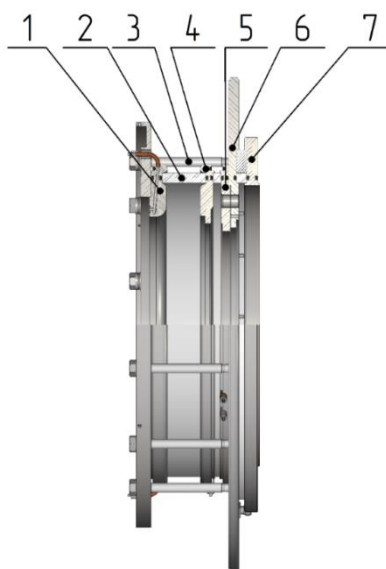


Рисунок 2.5 – Изоляторный узел: 1 – фланец первого электрода, 2 – основной изолятор, 3 – стяжная шпилька, 4 – фланец второго электрода, 5 – фланец третьего электрода, 6 – опорный фланец, 7 – фланец крепления к прицельному устройству

Конструктивно изоляторный узел представляет собой проходной изолятор, образованный

металлическими фланцами и керамическими кольцами (изоляторами), которые при сопряжении образуют вакуумноплотные соединения. Стягивание фланцев с изоляторами обеспечивается диэлектрическими шпильками. Внутренняя полость изоляторного узла является вакуумной. В ней на фланцах располагаются многоапертурные электроды системы. Установка электродов на фланцы осуществляется на специальном поворотном столе, в горизонтальном положении. Фланцы, на которых располагаются электроды, имеют трубки охлаждения, обеспечивающие отвод тепла между импульсами. Фланец плазменного электрода содержит дополнительные каналы, по которым осуществляется подвод жидкости к трубке охлаждения электрода. Керамические кольца имеют высоты, гарантирующие электрическую прочность, в соответствии с распределением потенциалов в системе. Для обеспечения вакуумной плотности и высокой надежности узла поверхностям сопрягаемых деталей необходима высокая точность. Торцевые поверхности керамических колец и фланцев должны иметь минимальное торцевое биение, которое гарантировано обеспечит их плотное прилегание. Во-первых, это предохранит от попадания уплотняющего шнура между металлом и керамическим кольцом вне полости канавки, а во-вторых исключит неравномерность давления металла на керамику в следствие несовпадения поверхностей. При неплотном прилегании поверхности металлического фланца к поверхности керамического кольца, возникают локальные сдвиговые напряжения, при которых слои в материале смещаются относительно друг друга. Для хрупких материалов, таких как керамика, этот фактор обязательно приведет к разрушению. Вакуумная плотность между керамическими кольцами и фланцами электродов обеспечивается за счет использования витонных уплотнителей из круглого шнура диаметром 7 мм, для которых во фланцах электродов обрабатываются канавки, с профилем в виде “ласточкиного хвоста”. Канавка подобного профиля исключает возможность выпадения шнура при сборке ионно-оптической системы.

Опорные поверхности, в местах крепления электродов, должны иметь низкий уровень торцевого биения и высокую чистоту поверхности, не ниже Ra1,6. Это необходимо для создания лучших условий при выставке электродов системы. При установке электродов является необходимым выдерживать зазоры между электродами и согласовать между собой отверстия на электродах.

В высоковольтной технике, где порядок напряжений оценивается десятками киловольт, всегда требуются элементы с повышенной механической прочностью и диэлектрическими свойствами. В изоляторном узле источника ионов таковыми являются диэлектрические стяжные шпильки, конструкция которых была предложена, в начале 80-х годов прошлого столетия, сотрудниками лаборатории 9-0 Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Конструктивно шпилька представляет собой диэлектрический стержень из композитного материала, на концах которого заделаны крепежные элементы. Композитный материал стержня

получают путем пропитывания стекловолоконной сердцевины эпоксидным компаундом по специальной программе. Отработанная технология получения композитного стержня и способ заделки в него крепежных элементов, позволяют достигнуть высокой надежности изделия, которая обеспечивается электрической и механической прочностью.

Для формирования сердцевины шпильки на мотовило станка наматывают стекловолокно в количестве 120 витков, общей длиной 150 м. Далее стекловолокно разрезают вдоль паза намоточной рамки, снимают и формируют жгут длиной 1350 мм концы которого фиксируют стяжками из стекловолокна. Жгут укладывают в подготовленную форму для пропитки длина которой составляет 1360 мм при высоте 40 мм и имеет ширину в 120 мм (для восьми закладываемых сердцевины). Каждый жгут из стекловолокна натягивается и фиксируется в формообразующем желобе пропиточной формы при помощи прижимных планок. Собранную форму устанавливают в камеру с термостатированием и сушат при температуре 80–90 °С, в течение 3–4 часов. По окончании сушки форму помещают в пропиточный мешок из вакуумной резины, который подключают к вакуумной системе и откачивают до давления не выше, чем 6,7 Па. После достижения, требуемого давления откачку отсекают и подключают к емкости с пропиточным компаундом и еще раз подключают к вакуумной откачке. Вакуумирование длится 10 минут после чего отсекается. Включается подача компаунда в пропиточный мешок. После заполнения компаундом мешок помещают в автоклав для полимеризации при постоянном давлении – 1,8 МПа, которое ведется в два этапа. Первый этап – полимеризация при температуре 90 °С в течение 20 часов. Второй этап – при температуре 110 °С в течение 8 часов. Остывание мешка до комнатной температуры происходит в автоклаве. Пропиточную форму извлекают из мешка, разбирают и удаляют излишки компаунда. Получившиеся заготовки длиной 1250 мм и диаметром 14 мм зачищают от лишнего компаунда. Стержни нарезают на заготовки длиной 203 мм. На концах заготовок выполняют цилиндрические проточки (посадочные места под расклинивающие элементы) диаметром 12 мм, длинами – 19,5 мм и 22,5 мм. В каждой проточке фрезеруют по три паза шириной 1 мм параллельно оси вращения шпильки. Крепежные элементы устанавливаются на свои посадочные места и, фиксируются, в начале пластинами, а потом клином. Для лучшего прилегания диэлектрика ко втулке, контактную поверхность покрывают компаундом и растягивают шпильку. Выступающие части диэлектрика за торцы металлических элементов срезают и все видимые поверхности стержня покрывают эпоксидным лаком. Эскиз механически обработанного композитного стержня приведен на рисунке 2.6.

На внутренних поверхностях крепежных элементов, обращенных к диэлектрику не должно быть каких-либо конструктивных элементов, способных обострить напряженность электрического поля (острые кроки, грани, углы, грубые неровности и т.д.). Переходы с

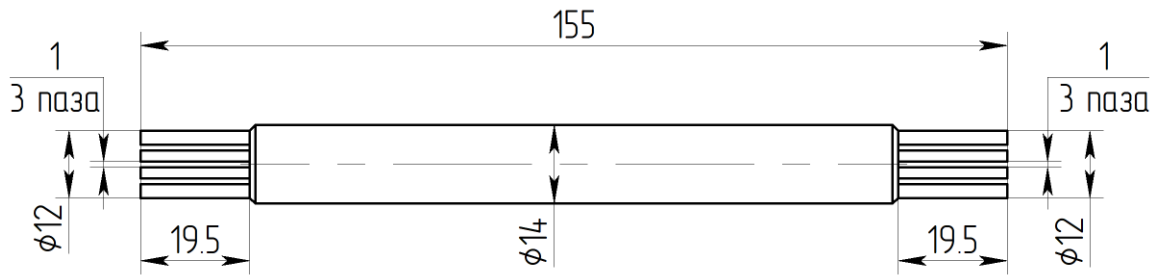


Рисунок 2.6 – Механическая обработка композитного стержня

цилиндрической части на конусную должны иметь плавность, которая обеспечивается радиусами. Сопрягаемые поверхности должны иметь требуемую чистоту и прилегать друг к другу плотно. Крепежные элементы представляют собой металлические втулки из нержавеющей стали с силовой наружной резьбой. Втулки имеют внутренний канал, изменяющий свое сечение с круглого, в начале, на эллиптическое, в конце. Изготовленные шпильки проходят обязательные испытания на электрическую и механическую прочность. Для этого из изготовленной партии выбирается два образца. Ниже приведены результаты испытаний образцов на механическую прочность.

Выбранные образцы были подвергнуты испытаниям на механическую прочность на разрывной машине. Было испытано два образца из партии. Длина каждого образца составила 202 мм. Испытания на растяжение до полного разрушения выполнялись на разрывной машине МУП-20 №137. Полное разрушение произошло при нагрузке  $F=3920$  кг (шпилька №1) и  $F=4170$  кг (шпилька №2). На рисунке 2.7 приведены фотографии, показывающие характер разрушения образцов. Слабым местом диэлектрической шпильки является место заделки стержня в металл.

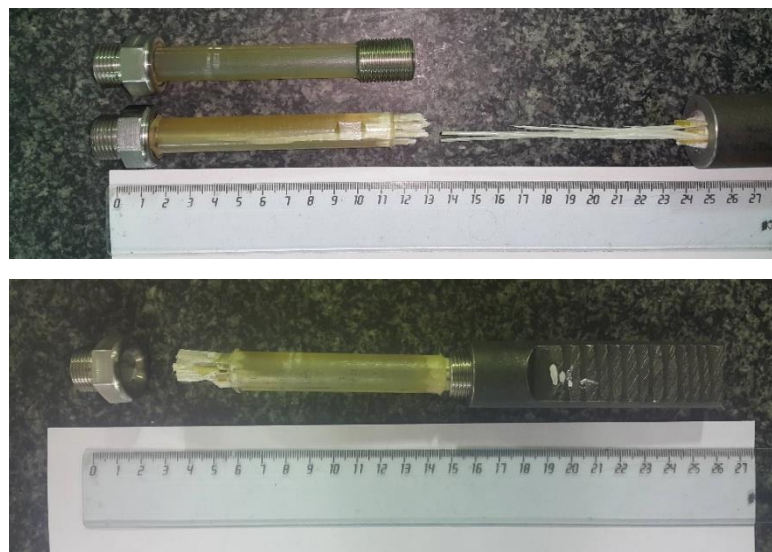


Рисунок 2.7 – Характер разрушения шпилек при испытании на разрыв

### 2.1.2 Электроды ионно-оптической системы

Для аккуратного ввода пучка быстрых атомов в инжекционный порт токамака необходимо иметь пучок прямоугольного профиля сечения или близкого к этому – эллиптический. Чтобы преобразовать пучок круглой формы в эллиптический необходимо использование многоапертурной ионно-оптической системы с щелевыми отверстиями. Изменение формы сечения пучка достигается за счет того, что угловая расходимость в поперечном направлении щели значительно выше, чем в продольном.

Для извлечения первичного ионного пучка с нужным током, необходима эмиссионная площадь, образованная массивом щелевых отверстий в круге диаметром 250 мм. При таком размере плазменного эмиттера и расчетной расходимости, пучок не сможет пройти в порт токамака, который, напомним, имеет размеры 170 x 220 мм. Для того, чтобы получить пучок нужного сечения в районе входного порта токамака, его необходимо сфокусировать. Способ баллистической фокусировки, примененный в данной системе, заключается в том, что оси щелевых отверстий направлены в одну точку – точку фокуса ИОС. Радиус внутренней сферы плазменного электрода равен фокусному расстоянию системы. Величина фокусного расстояния системы определяется диаметром эмиссионной поверхности ИОС, геометрией входного порта, а также расстоянием от порта до ИОС. Оно подобрано таким образом, что пучок нейтральных атомов на входе в инжекционный порт имеет минимальные размеры. Принятая геометрия обеспечивает общую прозрачность плазменного электрода 45%. От прозрачности электродов зависит величина их допустимого нагрева в течение импульса, так как активного отвода тепла не предусмотрено, то величина нагрева электродов определяется их теплоемкостью. Отвод тепла от электродов к фланцам изоляторного узла происходит в паузах между выстрелами. Фокусное расстояние ионно-оптической системы составляет, как указывалось выше, 4,1 м.

Первый (плазменный) электрод имеет обращенную поверхность в сторону плазменного эмиттера. Отверстия плазменного электрода всегда имеют более сложный профиль канала поскольку его особенности определяют распределение эквипотенциалей электрического поля, форму и положение эмиссионной границы плазмы, которая в случае щелевой структуры будет являться цилиндрической.

Второй электрод является ускоряющим. Он имеет небольшой (~1кВ) отрицательный потенциал, третий электрод заземлен.

Общий ионный поток складывается из отдельных пучков, образованных в элементарных ячейках, каждая из которых работает независимо.

### 2.1.2.1 Расчет элементарной ячейки ионно-оптической системы

Разработка многоапертурных ионно-оптических систем начинается с выбора оптимальной геометрии элементарной ячейки, которая обеспечивает вытягивание, формирование и ускорение пучка с небольшой угловой расходимостью при достаточной плотности тока. Количество элементарных ячеек системы определяется количеством апертур, так как каждая элементарная ячейка образуется из согласованных (соосных) между собой отверстий, расположенных на электродах. На рисунке 2.8 приведена элементарная ячейка многоапертурной трехэлектродной ионно-оптической системы.

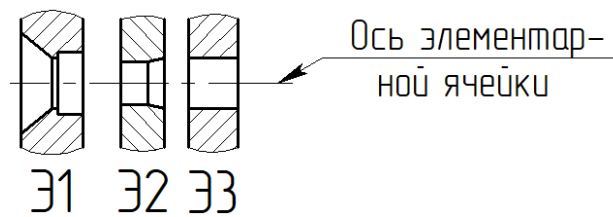


Рисунок 2.8 – Отдельная элементарная ячейка трехэлектродной ионно-оптической системы: вытягивание, формирование и ускорение первичного пучка ионов происходит слева направо

В рассматриваемом плазменном эмиттере источником заряженных частиц является плазменная граница, от положения и формы которой зависит плотность извлекаемого тока. Положение и форма границы плазмы определяются параметрами плазмы и профилем канала отверстия в плазменном электроде. Геометрия последнего определяет, насколько площадь поверхности эмиссии  $S_{эм}$  будет отличаться от площади отверстия  $S_0$ . Для высокочастотных источников плазмы, в которых концентрация ионов не так велика, выгодно увеличить площадь эмиссионной поверхности  $S_{эм} \gg S_0$  за счет локализации плазменной границы в глубине эмиссионного отверстия плазменного электрода [39]. Этого можно достигнуть путем профилирования (изменения профиля) части канала отверстия, обращенного в ускоряющий зазор. В ионно-оптических системах, разрабатываемых Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, применяются, в основном, два типа профиля канала отверстий в плазменных электродах – “со ступенькой” и “с фаской”, представленных на рисунке 2.9. С помощью кода PBGUNS (Particle Beam GUN Simulation) [40] были выполнены численные моделирования для элементарных ячеек с отверстиями в плазменных электродах приведенных профилей каналов. В расчете энергия пучка была выбрана 30 кэВ, что соответствует номинальному режиму работы инжектора. Геометрия элементарной ячейки с эквипотенциалами и траекториями частиц для разных профилей канала отверстия плазменного электрода показана



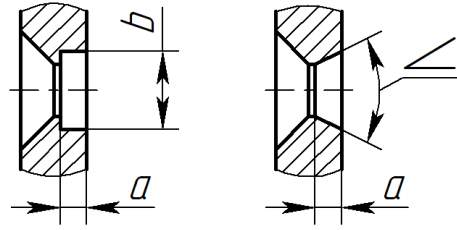


Рисунок 2.9 – Профили каналов отверстий плазменных электродов: слева – “со ступенькой”; справа – “с фаской”

на рисунке 2.10. Диаграммы эмиттанса показаны на рисунке 2.11, форма и положение плазменной границы на рисунке 2.12. Расчетная зависимость угловой расходимости пучка от плотности тока показана на рисунке 2.13.

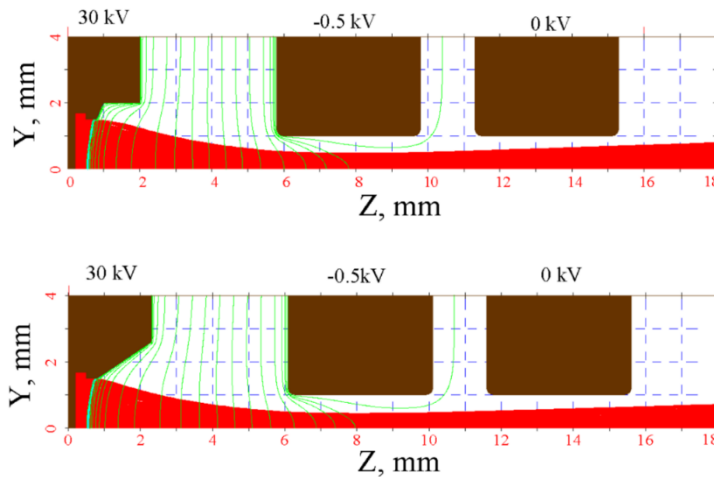


Рисунок 2.10 – Геометрия элементарной ячейки с эквипотенциалами и траекториями частиц для ускоряющего напряжения 30 кВ: верхний рисунок для профиля канала отверстия плазменного электрода “со ступенькой”; снизу для профиля канала отверстия плазменного электрода “с фаской”

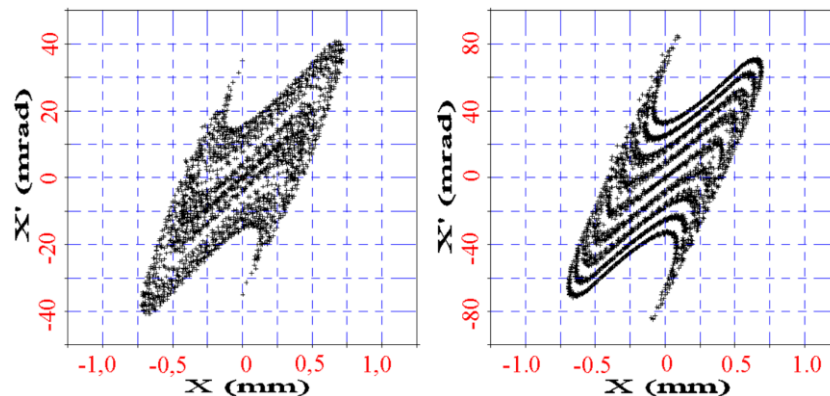


Рисунок 2.11 – Диаграммы эмиттанса ионного пучка (ускоряющее напряжение 30 кВ): слева – профиль канала отверстия плазменного электрода “со ступенькой”; справа – профиль канала отверстия плазменного электрода “с фаской”

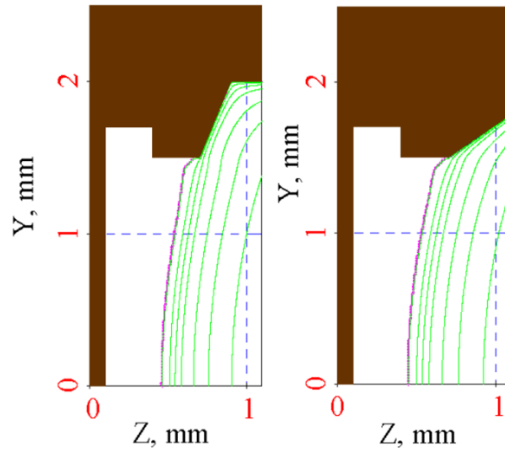


Рисунок 2.12 – Положение плазменной границы для ускоряющего напряжения 30 кВ: слева – профиль канала отверстия плазменного электрода “со ступенькой”; справа – профиль канала отверстия плазменного электрода “с фаской”

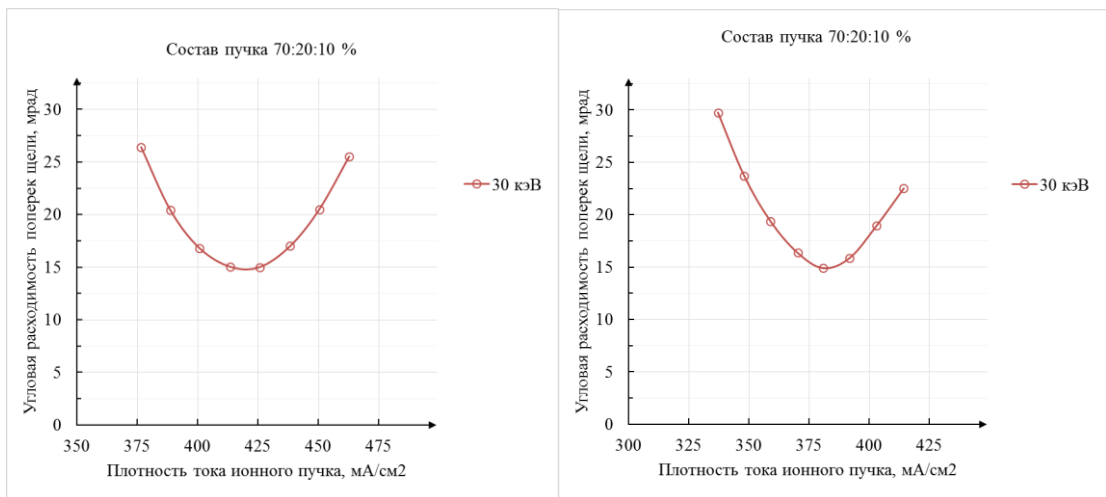


Рисунок 2.13 – Расчетная зависимость угловой расходимости пучка от плотности тока для ускоряющего напряжения 30 кВ: слева – профиль канала отверстия плазменного электрода “со ступенькой”; справа – профиль канала отверстия плазменного электрода “с фаской”

При исходном моделировании предполагалось, что пучок состоит полностью из ионов  $D_1^+$ . После получения результатов моделирования, плотность тока пересчитывалась в соответствии с измеренным составом пучка с содержанием ионов –  $D_1^+$ ,  $D_2^+$ ,  $D_3^+$ , соответственно 70:20:10%. Этому составу пучка соответствует коэффициент пересчета 0,865.

Форма профиля канала отверстия “со ступенькой” позволяет получить наименьшую угловую расходимость пучка ионов из элементарной ячейки – приблизительно 15 мрад, причем этот минимум достигается при плотности тока около 420 mA/cm<sup>2</sup>. Для профиля канала “с фаской” наименьшая угловая расходимость приблизительно равна 15 мрад, но она реализуется при существенно меньшей плотности тока – около 380 mA/cm<sup>2</sup>. Исходя из того, что пучок атомов для нагрева плазмы должен иметь высокую плотность тока и малую угловую расходимость, вариант

профиля канала отверстия плазменного электрода “со ступенькой” был выбран в качестве основного.

Принимая во внимание, что диапазон энергий частиц инжектора составляет 10–35 кэВ, то для максимального значения энергии были выполнены подобные расчеты. Как и предполагалось, при большей энергии удалось получить меньшее значение расходимости при большей плотности тока. Как и для расчета пучка с энергией 30 кэВ, вариант использования профиля со ступенчатым выступом показал лучшую зависимость угловой расходимости от плотности тока, в сравнении со структурой канала “с фаской”. На рисунке 2.14 и 2.15 приведены геометрии ячеек, эквипотенциалей и расчетные зависимости угловых расходимостей от плотности тока.

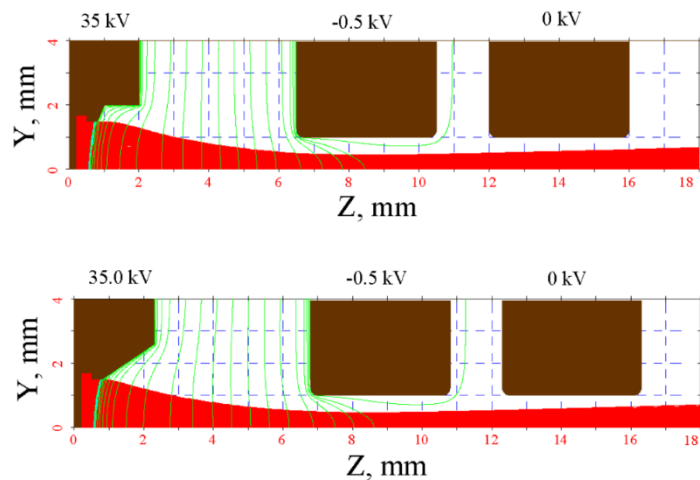


Рисунок 2.14 – Геометрия ячейки с эквипотенциалами и траекториями частиц для ускоряющего напряжения 35 кВ: верхний рисунок для профиля канала отверстия плазменного электрода “со ступенькой”; снизу для профиля канала отверстия плазменного электрода “с фаской”

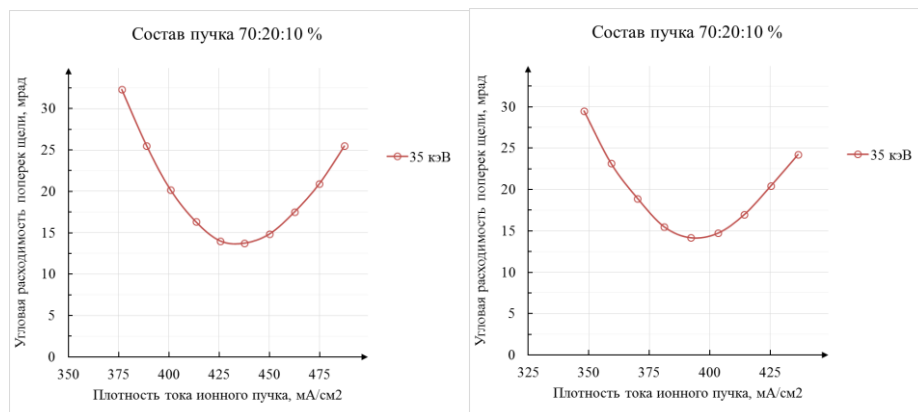


Рисунок 2.15 – Расчетная зависимость угловой расходимости пучка от плотности тока для ускоряющего напряжения 35 кВ: слева – профиль канала отверстия плазменного электрода “со ступенькой”; справа – профиль канала отверстия плазменного электрода “с фаской”

Результаты расчетов для двух значений ускоряющего напряжения показали, что форма электрода “со ступенькой” предпочтительнее, так как дает меньшую величину расходимость при большем значении плотности тока (рисунок 2.16). Стоит отметить, что с точки зрения технологии, профиль канала отверстия “со ступенькой” значительно сложнее в изготовлении, так как он имеет большее число линий контура профиля и жесткое требование контроля глубины ступеньки, что требует дополнительных операций и более сложной программы для станка с ЧПУ.

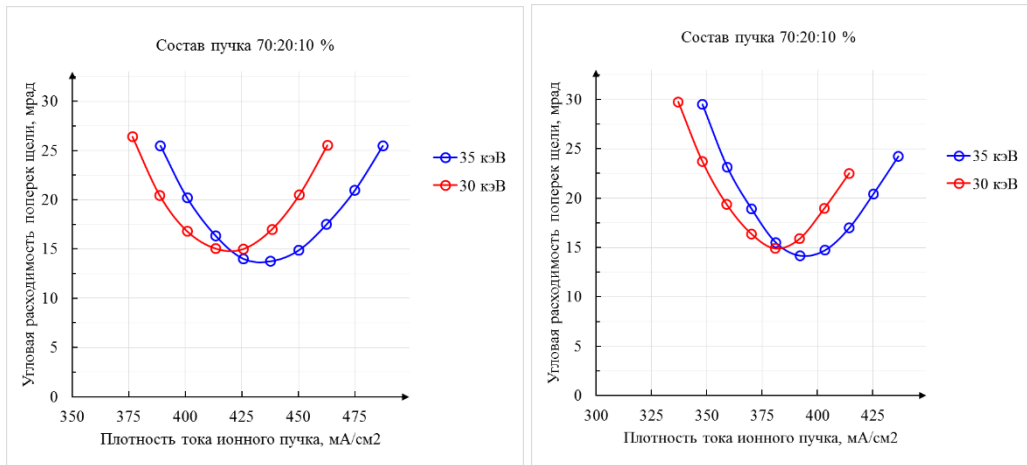


Рисунок 2.16 – Расчетная зависимость угловой расходимости пучка от плотности тока для обеих структур при значениях ускоряющих напряжений 30 и 35 кВ: слева – профиль канала отверстия плазменного электрода “со ступенькой”; справа – профиль канала отверстия плазменного электрода “с фаской”

Для ячеек со ступенчатой структурой при ускоряющем напряжении 30 и 35 кВ, расчеты показали угловую расходимость 15 и 13,75 мрад поперек ячейки соответственно. Экспериментальная проверка расчетных данных, которая проводилась в эксперименте с формированием пучка из одной ячейки показала [41], что полученная расходимость выше расчетной примерно на 10%. Так что следует ожидать расходимости около 16,5 и 15,1 мрад, для напряжений 30 и 35 кВ соответственно.

В результате численных расчетов и экспериментальных исследований [41] была выбрана показанная на рисунке 2.17 геометрия ячейки ионно-оптической системы с целевым отверстием шириной 3 мм и длиной 47 мм. Такие размеры имеет большинство щелей эмиссионной области, за исключением тех, которые располагаются вблизи границы круга – апертуры диаметром 250 мм. Для данной геометрии элементарной ячейки были проведены экспериментальные измерения значений расходимости на одноапертурной модели. Измеренная в эксперименте угловая расходимость пучка, сформированного щелевой ячейкой, составила 12 мрад в направлении вдоль щели и 22 мрад в направлении поперек щели. Экспериментальное значение

расходимости вдоль ячейки получилось ниже расчетного, а расходимость поперек ячейки оказалась несколько больше расчетной.

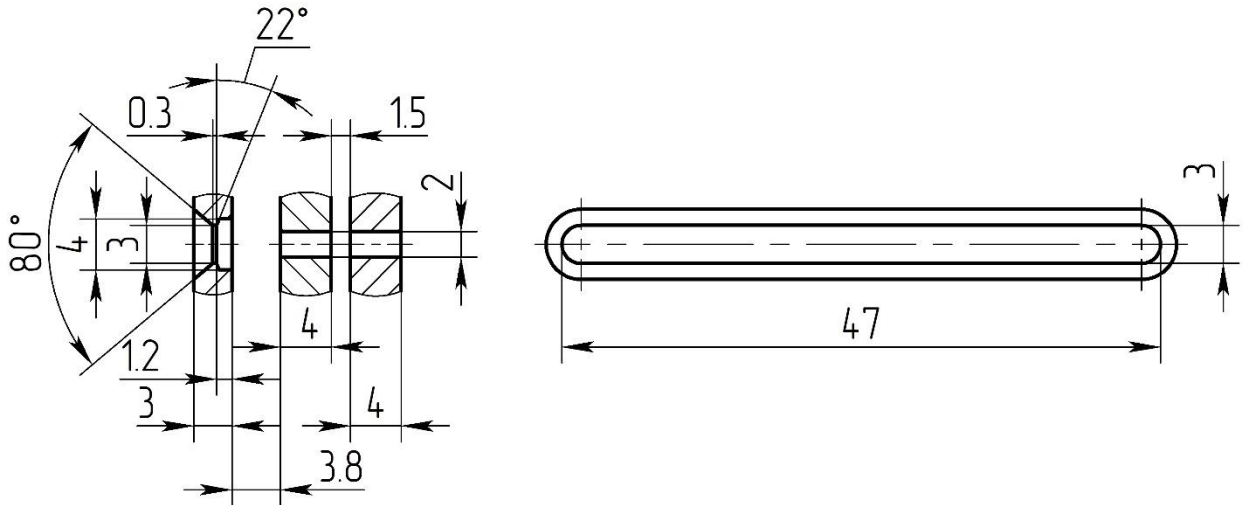


Рисунок 2.17 – Отдельная элементарная ячейка ионно-оптической системы: вытягивание, формирование и ускорение первичного пучка ионов происходит слева направо

Расчетная плотность тока значительно отличается от экспериментальной, при этом V-образная зависимость сохраняется и все точки кривой смещаются в область меньших плотностей тока на одинаковую величину. Это объясняется тем, что доступные программы для моделирования формирования пучка с плазменным эмиттером не позволяют в полной мере воссоздать движение плазмы до плазменной границы и взаимодействия частиц с краями эмиссионного отверстия. Так, снижение плотности тока по сравнению с расчетной на 5% обуславливается неоднородностями плазменного эмиттера, на 30% – потерей частиц на краях эмиссионного отверстия.

### 2.1.2.2 Моделирование термомеханических деформаций электродов. Минимизация термомеханических деформаций электродов ИОС

При формировании первичного ионного пучка ионно-оптической системой в процессах ионизации и перезарядки образуются вторичные заряженные частицы. Двигаясь в обратном направлении и ускоряясь на полное напряжение, они приобретают достаточно большую энергию и попадая на электроды существенно их нагревают.

В трехэлектродных ионно-оптических системах основная тепловая нагрузка от бомбардировки вторичными частицами, приходится на плазменный и вытягивающий электроды. В различных источниках величина тепловой мощности, сообщаемой электродам оценивается 0,8–2% от мощности первичного ионного пучка. Специалистами Института ядерной

физики им. Г.И. Будкера СО РАН принято, что величины тепловых мощностей, прикладываемых к плазменному и вытягивающему электродам, следует принимать равными 1% от мощности первичного ионного пучка [42].

В результате нагрева вторичными частицами возникают термомеханические напряжения, которые вызывают деформации электродов. Эти смещения могут влиять как на формирование пучка, вызывая осевое рассогласование отверстий в элементарной ячейке, так и на электрическую прочность системы, изменяя зазоры между электродами. Поэтому расчет величины нагрева и определение уровня деформаций на стадии проектирования является важным этапом в процессе создания электродов. Подобный вид моделирования позволяет определить характер влияния нагрева электрода на изменения его заданной формы и определить меры для их устранения или снижения. По результатам анализа в конструкцию вносятся нужные изменения и расчет повторяется. Моделирование продолжается до получения оптимальных величин деформаций и позволяет получить финальную конструкцию для изготовления электрода.

В рассматриваемой ИОС электроды имеют недостаточную толщину для введения каналов активного охлаждения. Отвод тепла осуществляется за счет теплового контакта с охлаждаемыми фланцами изоляторного узла. Подобный способ не обеспечивает охлаждение электрода во время рабочего импульса, а эффективен только для отвода тепла в промежутках между выстрелами. В условиях, когда невозможно обеспечить приемлемого теплового состояния электрода за счет активного охлаждения, минимизировать уровень деформаций возможно за счет введения конструктивных элементов – разрезов на периферии эмиссионной области. Конструктивные особенности плазменного электрода сделали возможным введение азимутальных разрезов на периферии эмиссионной области. Это конструктивное решение позволило образовать пластинчатую пружину между сферической эмиссионной областью и фланцем электрода, которая поглощает расширение материала и предотвращает возрастание внутренних напряжений. Данное решение является достаточно эффективным и дает возможность снизить деформации более чем на порядок. В силу конструктивных особенностей электроды 2 и 3 были лишены возможности подобной оптимизации. Единственным доступным решением, минимизировать деформации в них, осталось снижение жесткости электродов на периферии эмиссионной области. Этого удалось достигнуть путем введения радиальных разрезов в месте сопряжения сферической эмиссионной области и цилиндрической обечайки электрода.

В качестве конструкционного материала для изготовления центральных эмиссионных областей электродов использовался сплав марки БрХЦр. Этот материал обладает достаточно высокими твердостью 120–140 НВ и теплопроводностью  $\lambda=366$  Вт/(м·град). Помимо этого, данный сплав обладает хорошей электропроводностью. Легирование хромом дает возможность

упрочнения при последующем старении, а легирование цирконием повышает температуру рекристаллизации, что позволяет расширить температурный интервал эксплуатации.

Расчеты температурных полей и деформаций в электродах ионно-оптической системы были выполнены с использованием программного комплекса ANSYS. Для анализа были созданы расчетные модели электродов, эмиссионные области которых были заполнены щелевыми отверстиями, с геометрическими размерами, полученными в расчетах элементарной ячейки, которые располагались по принципу кирпичной кладки. Вид плазменного электрода приведен на рисунке 2.18.



Рисунок 2.18 – Начальный вариант плазменного электрода: многоапертурная эмиссионная область с щелевыми отверстиями со смещением

Подобный способ размещения отверстий позволяет обеспечить наибольший коэффициент заполнения и добиться хорошего уровня оптической прозрачности системы. Данный вид размещения отверстий в эмиссионной области делает электрод наиболее устойчивым к развитию деформаций в результате нагрева. В параграфе 2.3 приведен сравнительный анализ электродов трех типов, отличающихся формой и расположением отверстий в эмиссионных областях. Выполнены расчеты профилей температуры для каждого случая, внутренних напряжений и возникающих деформаций. Приводится оценка времени жизни электродов – усталостной долговечности, которая определяется максимально возможным количеством последовательных циклов нагрева и остывания.

Для плазменного электрода, на внутреннюю поверхность щелевых отверстий, прикладывалась нагрузка в виде теплового потока величиной 12 кВт в течение импульса 2 с. Максимальная температура электрода достигла 105,8 °С, при этом максимальное значение деформации, соответствующее поперечному смещению центральной части сферического участка электрода, составило ~1,6 мм. Через 300 с после снятия тепловой нагрузки (300 с – пауза

между импульсами) максимальное значение температуры электрода снизилось до значения 23,7 °С. Расчетные значения температуры и деформации плазменного электрода приведены на рисунке 2.19. Профиль температуры электрода через 300 с после рабочего импульса приведен на рисунке 2.20.

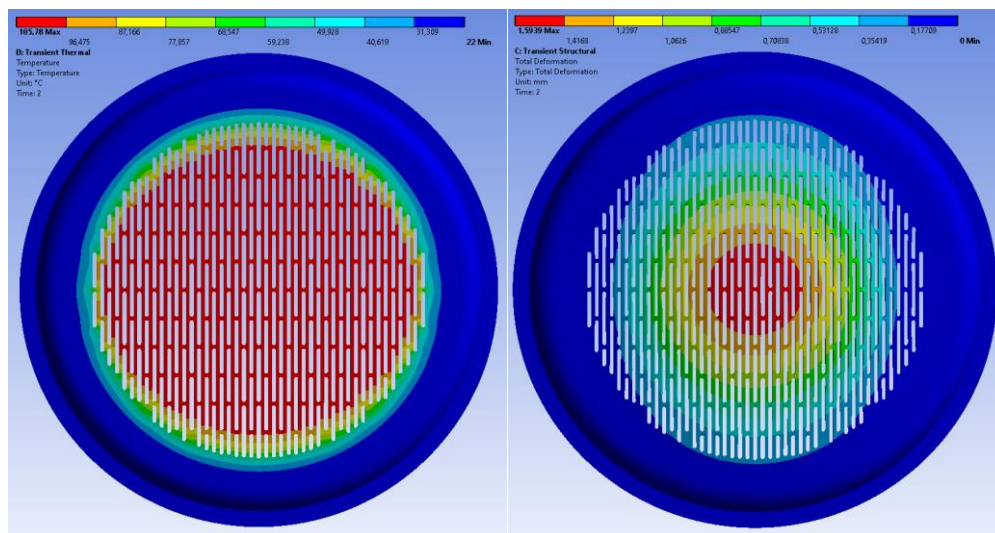


Рисунок 2.19 – Нагрев и деформации: слева – нагрев плазменного электрода за импульс длительностью 2 с (максимум – 105,8 °С, минимум – 22 °С); справа – значение величины деформации в направлении оси пучка (максимум – 1,6 мм)

Величина смещения 1,6 мм является недопустимо большой, поскольку соизмерима с величиной зазора между электродами. В этом случае формирование отдельных пучков будет неоптимальным, поскольку соответствующие элементарные ячейки на плазменном и ускоряющем электродах будут смещены. Следует отметить, что увеличение зазора между электродами приведет также к падению оптимальной плотности тока вследствие уменьшения электрического поля.

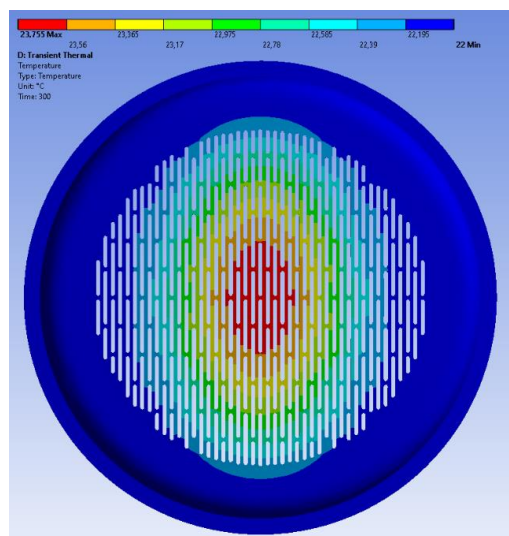


Рисунок 2.20 – Профиль температуры плазменного электрода через 300 с после импульса: максимум – 23,7 °С, минимум – 22 °С



Как было отмечено, для снижения деформаций плазменного электрода в его конструкцию были введены азимутальные разрезы на периферии эмиссионной области. Конструктивно разрезы располагаются на двух concentричных окружностях как показано на рисунке 2.21.

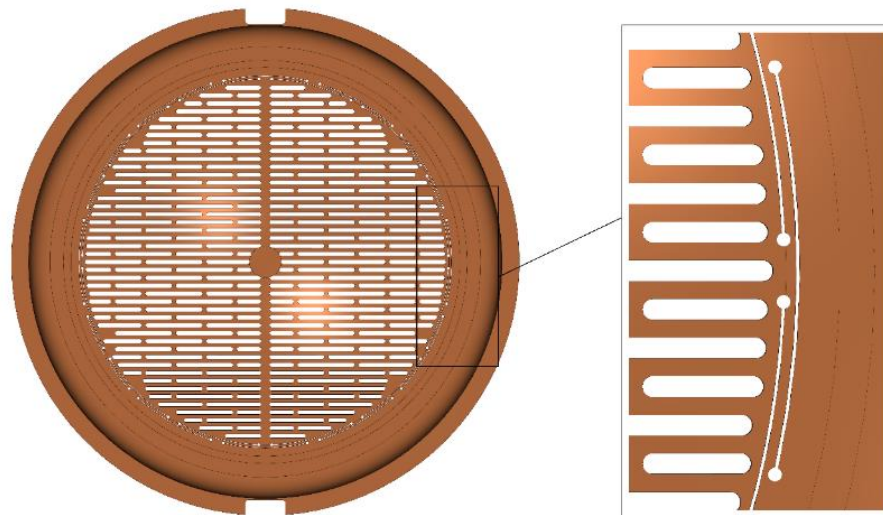


Рисунок 2.21 – Азимутальные разрезы на границе эмиссионной области плазменного электрода

Разрезы на внутренней и внешней окружностях смещены относительно друг друга на половину углового периода и имеют равную ширину – 1 мм. Данное решение позволяет снизить деформации, но вместе с этим создает дополнительный барьер на пути движения теплового потока, в виде лабиринта. Это обстоятельство ведет к увеличению нагрева электрода и требует лучшего охлаждения. Для дополнительного теплоотвода, в центральной части электрода был введен конструктивный элемент – площадка охлаждения. Эта площадка имеет хороший тепловой контакт с охлаждаемой бобышкой. В тело бобышки впаяна трубка охлаждения, которая имеет независимое от электрода крепление к фланцу изоляторного узла. Введение площадки охлаждения несколько снизило эмиссионную площадь электрода, которая оценивается величиной в 5,3%.

Для новой геометрии электрода было проведено повторное моделирование. Расчетный профиль температуры и величина деформации оптимизированного варианта плазменного электрода за импульс длительностью 2 с показаны на рисунке 2.22. Максимальная температура электрода составила 106 °С, при максимальном значении деформации 0,09 мм. Величина деформации плазменного электрода является допустимой. За время паузы в 300 с температура снизилась до значения 37,1 °С. Это достаточно высокая остаточная температура, которая в последствие может привести к перегреву электрода.

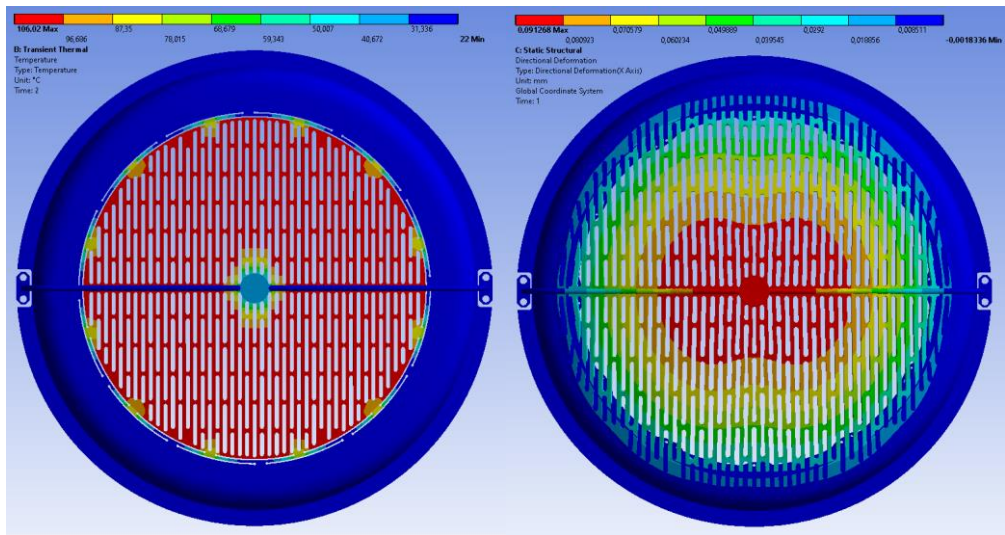


Рисунок 2.22 – Нагрев и деформации: слева – нагрев плазменного электрода за импульс длительностью 2 с (максимум – 106 °С, минимум – 22 °С); справа – значение величины деформации в направлении оси пучка (максимум – 0,09 мм)

Для того чтобы снизить температуру до начального значения в 22 °С потребовалось еще дополнительных 100 секунд. На рисунке 2.23 приведено расчетное время жизни электрода – усталостная прочность, которая определяется количеством рабочих циклов электрода до начала необратимых пластических деформаций. За один цикл принимается нагрев электрода в течение импульса и его полное остывание до начальной температуры. Минимальное значение составило – 4410 циклов.

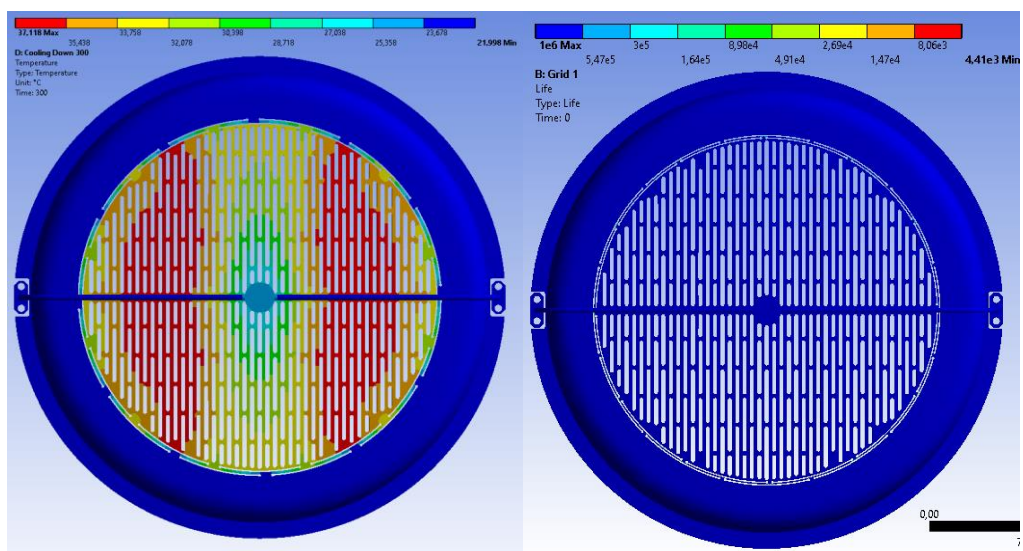


Рисунок 2.23 – Остывание и долговечность: слева – профиль температуры плазменного электрода через 300 с после рабочего импульса (максимум – 37,1 °С, минимум – 22 °С); справа – время жизни электрода, минимальное количество циклов до начала разрушения – 4410

Форма и размеры вытягивающего и третьего электродов не позволяют разместить азимутальные разрезы необходимой формы. Единственным доступным решением остается

снижение жесткости электрода за счет радиальных разрезов, которые располагаются в месте сопряжения сферического сегмента и цилиндра (обечайки), как на рисунке 2.24.

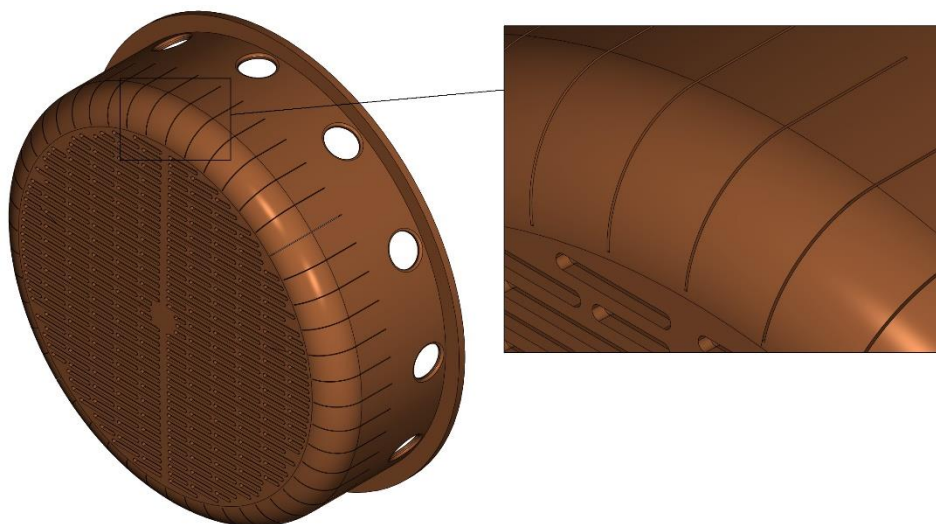


Рисунок 2.24 – Радиальные разрезы на периферии эмиссионной области вытягивающего электрода

Радиальные разрезы не препятствуют отводу тепла из центральной части электрода и в сочетании с большей толщиной эмиссионной области должны обеспечить меньшую величину нагрева.

Для моделирования теплового состояния вытягивающего электрода на внутреннюю поверхность каналов щелевых отверстий была приложена тепловая мощность величиной 12 кВт в течение 2 с. Результаты расчета приведены на рисунке 2.25. Величина максимального нагрева электрода за импульс составил 93,9 °С при максимальном значении деформации в 0,3 мм. За время остывания, в момент паузы 300 секунд, температура электрода снизилась до 27 °С, как показано на рисунке 2.26. Для снижения остаточной температуры до значения начальной, потребовались дополнительные 24 секунды. Оценка усталостной долговечности показала хороший запас по количеству циклов, который приведен на рисунке 2.26. Этот вариант конструкции вытягивающего электрода был принят к изготовлению.

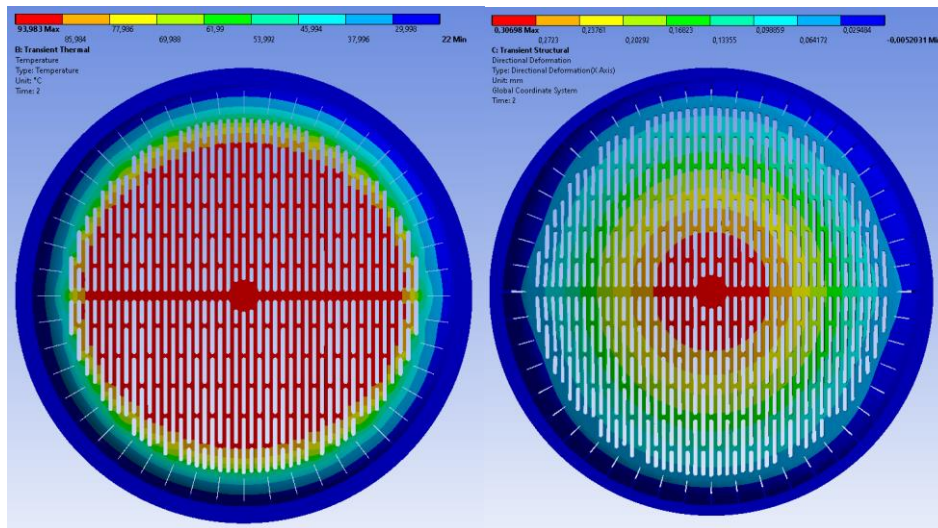


Рисунок 2.25 – Нагрев и деформации: слева – нагрев вытягивающего электрода за импульс длительностью 2 с (максимум – 93,9 °С, минимум – 22 °С); справа – значение величины деформации в направлении оси пучка (максимум – 0,3 мм)

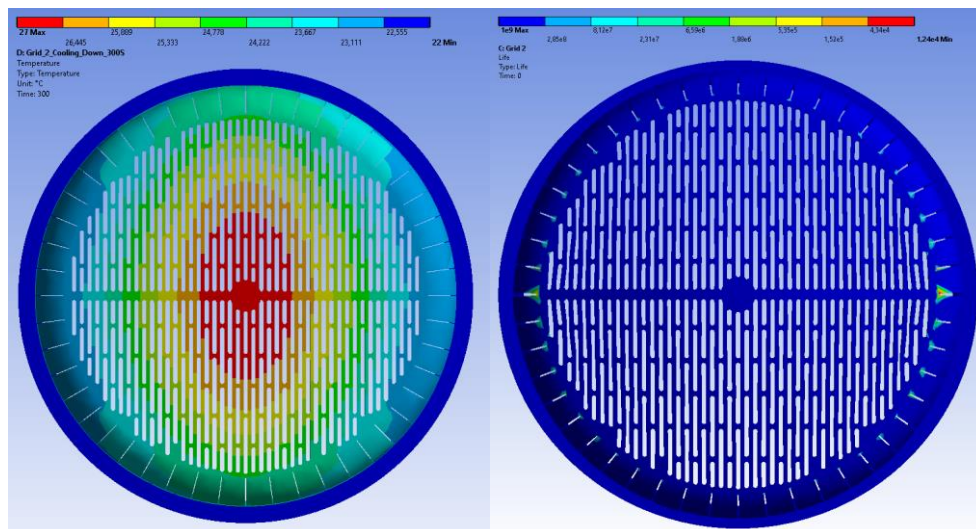


Рисунок 2.26 – Остывание и долговечность: слева – профиль температуры второго электрода через 300 с после рабочего импульса (максимум – 27 °С, минимум – 22 °С); справа – время жизни электрода, минимальное количество циклов до начала разрушения – 12400

Расчет и оптимизация третьего электрода прошли по той же методике, что и для вытягивающего. На рисунке 2.27 приведен общий вид электродов после оптимизации.

Для получения высокой плотности тока пучка требуется, чтобы толщина плазменного электрода была как можно меньше. На данный момент, основная трудность состоит в изготовлении сферических поверхностей с толщинами менее 3 мм с внутренними каналами для покачивания охлаждающей жидкости. Наиболее перспективными для изготовления подобных электродов являются технологии – 3D-печати и гальванопластики. Технология прямой 3D-печати, которая подразумевает использование в качестве печатного материала расплав металла,

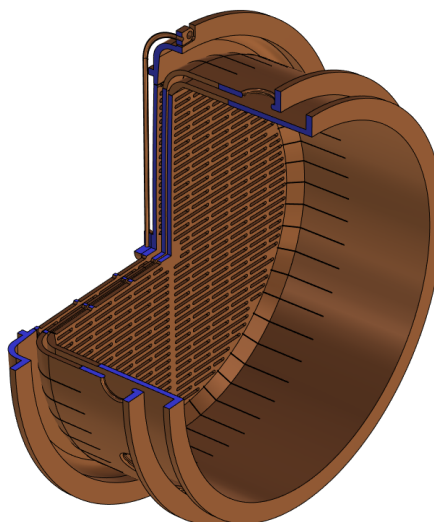


Рисунок 2.27 – Конструкция триода, принятая к производству

очень трудоемка и требует больших финансовых затрат. Альтернативный метод 3D-печати, так называемый метод печати по выжигаемым моделям, не дает гарантии полного удаления вспомогательного технологического материала из зоны теплового контакта металла и теплоносителя. Этот способ подразумевает 3D-печать системы каналов охлаждения из полимерного материала, которая после нанесения на нее теплозащитного керамического слоя помещается в расплавленный металл. После твердения металла, полимерный материал выжигается, оставляя внутри детали керамический каркас. При достаточных размерах и простоте геометрии каналов охлаждения можно добиться полного удаления керамики из полости детали, но при диаметрах отверстий 1–1,5 мм этого гарантировать нельзя. Оставшаяся в каналах керамика будет оказывать неблагоприятное влияние на теплообменные процессы и характер течения жидкости в каналах.

### 2.1.2.3 Технология изготовления электродов

Технологический цикл изготовления электродов ионно-оптической системы инжектора нейтральных атомов является достаточно длительным и включает в себя нескольких этапов. Помимо затрат времени на проведение основных и вспомогательных операций производственного процесса, требуется проектирование и изготовление дополнительной технологической оснастки, включая написание специальных программ для станков с ЧПУ. На рисунке 2.28 представлена блок-схема производственного цикла многоапертурного электрода.

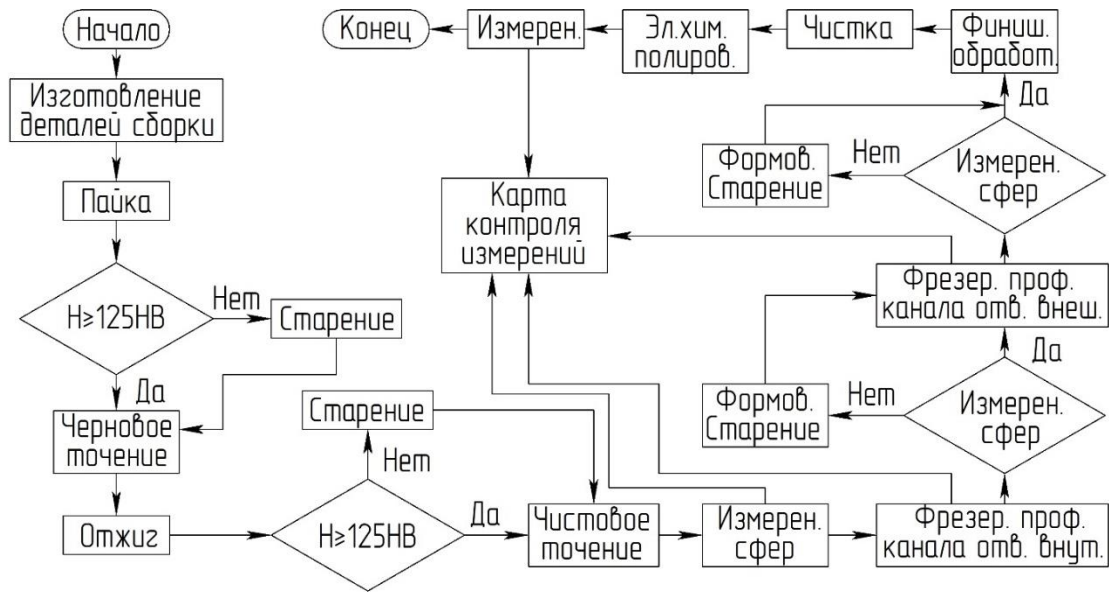


Рисунок 2.28 – Блок-схема производственного цикла электрода

Каждый электрод ионно-оптической системы является прецизионным, высокоточным вакуумным изделием, от качества которого зависят электростатические характеристики системы и точность геометрии ускоряющей ячейки. Поэтому особое внимание уделяется контролю исполнительных размеров и микронеровностей поверхностей. Результаты измерений заносятся в карту контроля и в последующем сравниваются с номинальными размерами в конструкторской документации, на основании чего делается заключение о пригодности изделия.

Изготовление многоапертурных электродов с баллистической фокусировкой предполагает большое количество операций механической обработки, в числе которых: токарная, фрезерная и сверлильная. Это требует от материала хорошей обрабатываемости резанием, что делает необходимым наличие нужной твердости материала. Результатом любой механической обработки являются пластические деформации материала, которые ведут к поверхностному упрочнению с образованием внутренних напряжений. Неравномерное распределение напряжений в теле детали всегда сказывается потерей ее формы в процессе обработки, что часто приводит к ошибкам в изготовлении. Для возврата утерянной формы детали, путем формования, от материала требуется максимальная пластичность. Поэтому одним из важнейших требований, предъявляемых к конструкционным материалам для изготовления многоапертурных сферических электродов, является их способность изменять внутреннюю структуру и принимать нужные механические свойства, необходимые для данного этапа технологической проработки. Этим требованиям соответствует низколегированный медный сплав марки БрХЦр [43], химический состав которого приведен в таблице 2.1. Хромоциркониевая бронза марки БрХЦр является трехкомпонентным жаропрочным сплавом, который обладает высокими электро- и

теплопроводностью, и способностью к упрочнению в результате старения (дисперсионного твердения).

Таблица 2.1 – Химический состав бронзы марки БрХЦр [44]

Сплав	Компоненты, %			Примеси, %				
	Cr	Zr	Cu	Zn	Pb	Ni	As	Bi
БрХЦр	0,4–1,0	0,03–0,05	98,82–99,57	<0,001	<0,003	<0,03	<0,01	<0,02

В силу конструктивных особенностей ионно-оптических систем с баллистической фокусировкой электроды имеют значительные осевые размеры. По этой причине, для рационального использования материала, исходная заготовки для каждого электрода формируется из нескольких деталей. Из полученной заготовки, в результате дальнейшей механической обработки, получают тело детали со сферической эмиссионной областью. В каждой эмиссионной области прорезаются отверстия с каналами определенного профиля.

Рассмотрим для примера процесс изготовления плазменного электрода.

Заготовка плазменного электрода была сформирована из диска и кольца, которые были соединены при помощи вакуумной пайки [45, 46]. На рисунке 2.29 приведен фрагмент чертежа на получение паяной заготовки. Внутри показан контур профиля электрода.

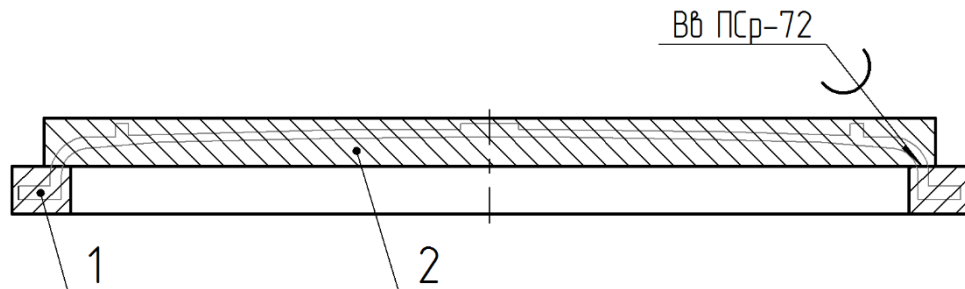


Рисунок 2.29 – Пайка диска и кольца: 1 – кольцо, 2 – диск

Для получения надежного паяного соединения главным требованием является качество сопрягаемых поверхностей. Они должны иметь торцевое биение не выше 20 мкм, при высоте микронеровностей не более 1,6 мкм. Это гарантирует отсутствие пустот в паяном соединении и улучшает смачиваемость поверхностей припоем. Серебряный припой марки ПСр-72, в виде фольги, закладывается между подготовленными поверхностями, после чего детали стягиваются и помещаются в вакуумную печь. Пайка осуществляется при температуре 800 °С и давлении не более  $10^{-2}$  Па, с последующим остыванием в печи.

После пайки проводится обязательное измерение твердости материала заготовки, которая может снижаться в результате продолжительного воздействия высокой температуры. Для дальнейшей механической обработки наличие твердости является необходимым требованием.

Материал с высокой твердостью лучше противостоит механическим воздействиям со стороны инструмента, что обеспечивает устойчивость прецизионных профилей каналов отверстий и сферических поверхностей. Стоит отметить, что материал с низкой (недостаточной) твердостью значительно быстрее выводит из строя режущий инструмент. Если твердость оказывается недостаточной, то заготовку подвергают процессу старения. Этот процесс позволяет вернуть твердость материала в диапазон 125–130 МПа по шкале Бринелля. Сам процесс включает в себя два этапа, а именно подготовку сплава к старению и само старение [47].

Подготовительной операцией к процессу старения является закалка. Она позволяет решить две задачи: подготовить сплав к старению и добиться максимальной пластичности для дальнейшей деформации. Технологическая температура данного процесса  $T_z = 950\text{--}980\text{ }^\circ\text{C}$  с точностью нагрева  $\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ , в защитной среде, при закалке в воду [48]. Выдержка при этой температуре составляет 1,0–1,5 часа. Нижний предел температуры рекомендуется для мелких деталей, а верхний для массивных. Высокая точность нагрева необходима для того, чтобы избежать необратимых структурных изменений сплава, которые возможны при крайне высоких температурах. Важным показателем является скорость нагрева, которая определяется из расчета не менее 1 часа на 25 мм сечения детали.

Сам процесс старения также является процессом термообработки, при котором происходит качественное изменение внутренней структуры сплава в результате чего происходит его упрочнение. Этот процесс протекает при температуре  $T_c = 460\text{--}480\text{ }^\circ\text{C}$  (с точностью  $- 20\text{ }^\circ\text{C}$ ). Время выдержки заготовки в садочной печи – четыре часа. Остывание заготовки происходит вместе с печью.

После восстановления твердости приступают к токарной обработке. Это достаточно трудоемкий процесс с удалением большого количества материала, в результате которого получают тело детали плазменного электрода с профилем, показанным на рисунке 2.30. Процесс токарной обработки был разделен на два этапа – черновое и чистовое точение.

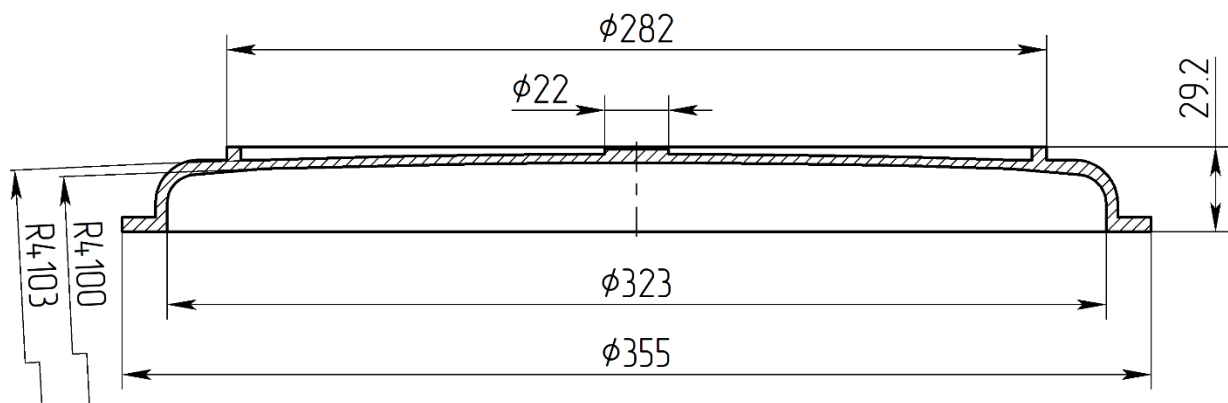


Рисунок 2.30 – Заготовка плазменного электрода после токарной обработки



Черновом точение предусматривает значительное снятие материала, толщинами до нескольких миллиметров, за один проход инструмента. При таких режимах обработки деталь испытывает сильное воздействие со стороны режущего инструмента, в результате которых возникают пластические деформации материала, которые ведут к поверхностному упрочнению – наклепу. Это приводит к возникновению внутренних напряжений, которые могут сказаться потерей формы детали [49-51]. Поэтому, после чернового точения предусмотрен отжиг, который позволяет убрать наклеп. Для этого деталь была нагрета до температуры разупрочнения сплава, которая находится на уровне 700 °С и выдержана при этой температуре в течение двух часов. После разупрочнения твердость сплава снизилась до значения 65 НВ, что сделало необходимым повторение процесса старения.

Черновое точение продолжается до получения толщины сферического сегмента электрода примерно равное двум толщинам от величины чистового размера. В силу того, что толщина электрода значительно меньше протяженности сферической поверхности, последующее воздействие режущего инструмента сказалось бы потерей сферичности поверхности. Поэтому для дальнейшей обработки потребовалось использование дополнительно разработанной технологической оснастки. Для обработки внутренней поверхности была изготовлена наружная оправка, которая фиксировала поверхность с внешней стороны, а для обработки внешней поверхности сферы, использовалась внутренняя правка, которая удерживала деталь по стороны малого диаметра сферы.

Чистовое точение осуществлялось снятием материала толщинами до 1 мкм. Это позволило достигнуть требуемой точности размеров и существенно снизить усилие воздействия режущего инструмента на деталь.

После завершения токарной обработки были выполнены контрольное измерение полученных размеров. С особой тщательностью осуществлялся контроль сферических поверхностей. Для этого деталь закреплялась на специальной подставке, оснащенной поворотным столом. Деталь фиксировалась таким образом, чтобы ось ее вращения (центр) совпадала с осью вращения стола подставки. Измерения проводились на координатно-измерительной машине (КИМ). После совмещения центра детали с нулевым положением измерительной головки КИМ, подставка фиксировалась. Перемещение измерительной головки может управляться специальной программой или оператором. Измеренные значения в автоматическом режиме записываются в файл данных. Для получения большей информации о параметрах сферических поверхностей, контроль размеров необходимо проводить как в радиальном, так и в азимутальном направлениях. Для этого была разработана схема измерений, которая определяла линии–траектории движения измерительной головки КИМ. На рисунке 2.31 представлены фрагменты схем для обоих видов измерений. Все измерения начинались

от центральной (нулевой) точки – вершины сферического сегмента. При азимутальных измерениях измерительная головка КИМ перемещалась по концентрическим окружностям от центра к периферии. Радиус окружностей изменялся с приращением 10 мм. Данный способ измерения позволил определить симметричность сферы относительно оси детали. При радиальном измерении измерительная головка КИМ двигалась от центра к периферии по линии измерения на образующей сферы. Угловой шаг между линиями измерений –  $15^\circ$ . Данный способ позволил определить средний радиус сферы, который равен среднему арифметическому измеренных значений.

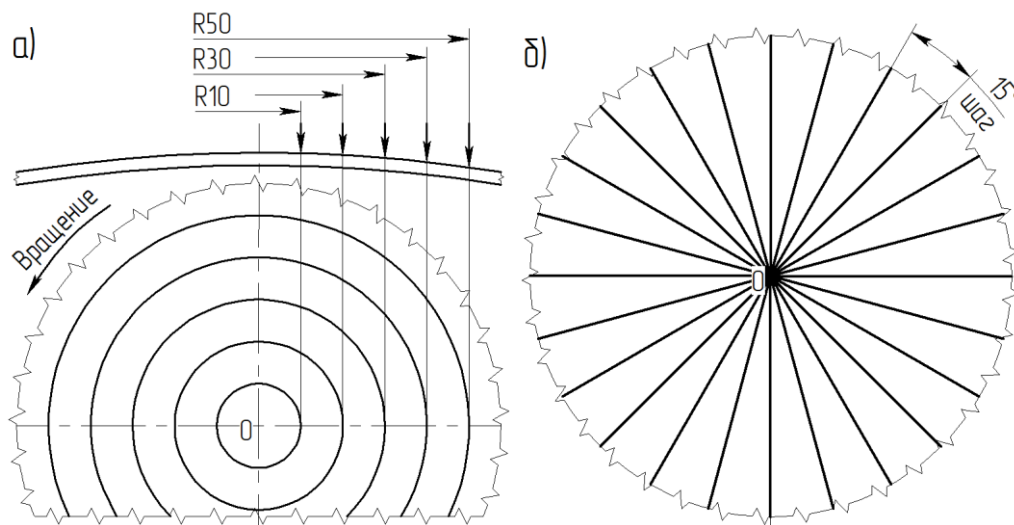


Рисунок 2.31 – Фрагменты схем измерения сферических поверхностей: а) – азимутальные измерения; б) – радиальные измерения

Предпоследним этапом механической обработки является фрезеровка отверстий в эмиссионной области электрода. Этот процесс осуществлялся под контролем управляющей программы, которая координировала перемещения поворотного стола станка, режущего инструмента и согласовывала их. Программа контролировала скорость обработки и обеспечивала автоматический режим, при котором влияние человеческого фактора на точность изготовления минимально. Из-за сложности профиля канала отверстия этот этап был разделен на два – это фрезерование отверстий с внутренней стороны детали и фрезерование с наружной стороны.

Для фрезеровки отверстий были изготовлены специальные оправки, которые выполняли роль фиксирующих элементов в процессе обработки. Этот вид оправок был изготовлен из металла с заведомо меньшей твердостью, чем у сплава БрХЦр, чтобы не нанести механических повреждений детали. Каждая оправка имела сферическую поверхность эквивалентную соответствующей поверхности электрода. Сопряжение оправки и электрода осуществлялось по сферическим поверхностям (без зазоров). Оправка исключала возможность перемещения поверхности электрода в результате механического воздействия со стороны фрезы.

Фрезерование отверстий велось от центра к периферии. После завершения обработки внутренней стороны детали, были проведены измерения радиусов сферических поверхностей, значения которых оказались вне поля допуска.

В большинстве случаев после снятия детали с оправки происходит отклонение значений радиусов сфер от номинальных. Происходит это по двум причинам – внутренние напряжения и снижение жесткости детали. Внутренние напряжения, как уже упоминалось, связаны с наклепом, а падение жесткости является следствием удаления значительной части материала из тела детали. Для того, чтобы вернуть нужную форму детали необходимо последовательно повторить термические процессы закалки и старения, а в промежутке между ними провести процесс формования эмиссионной области, который позволит вернуть радиусам сфер номинальные значения. Формование электрода осуществляется в специальном приспособлении, которое изображено на рисунке 2.32.

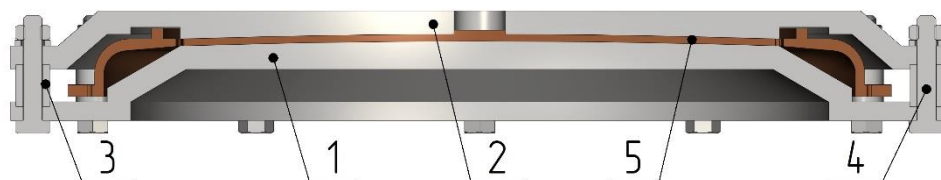


Рисунок 2.32 – Приспособление для формования электрода: 1 – нижняя оправка, 2 – верхняя оправка, 3 – ограничительная втулка, 4 – резьбовое соединение, 5 – электрод

Оно состоит из двух оправок со сферическими поверхностями, ограничительных втулок и стяжных элементов. Для изготовления оправок используется материал, твердость которого выше твердости материала электрода. Сферические поверхности оправок имеют радиусы равные номинальным радиусам электрода. Поверхности оправок, которые соприкасаются с деталью, как это и полагается для технологической оснастки, имеют класс чистоты выше, чем у объектовой детали. Процесс формования осуществлялся путем стягивания оправок 1 и 2 между собой до упора, роль которого выполняла ограничительная втулка 3. Размер (высота) втулки был подобран таким образом, чтобы сомкнувшиеся детали образовали зазор между сферическими поверхностями равный толщине электрода. Это является важным, потому что если зазор окажется больше требуемого, то радиусы сфер не будут соответствовать номинальным, а если зазор окажется меньше, то электрод получит пластические деформации поверхностных слоев с их упрочнением. Обработка отверстий с наружной стороны осуществляется по такой же программе.

Финишная обработка является заключительной механической операцией обработки изделий, которая включает в себя снятие заусенцев и размерное притупление кромок.

После окончания механической обработки изделия проходят этап очистки, в результате которого с их поверхностей удаляются различные виды загрязнений, в числе которых: следы смазочно-охлаждающей жидкости, стружка, производственная пыль, потожировые следы исполнителей. На рисунке 2.33 показаны электроды до начала процесса очистки.

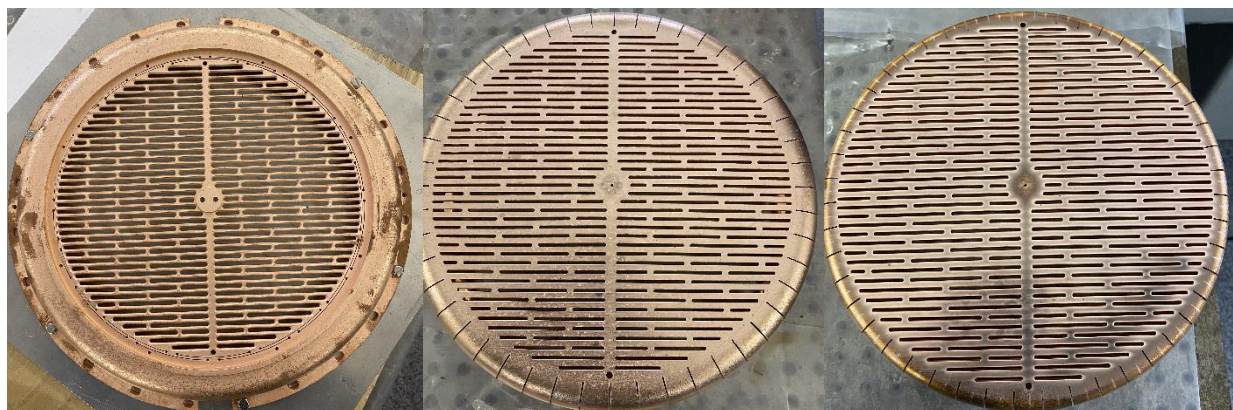


Рисунок 2.33 – Электроды до начала очистки: слева-направо – 1, 2, 3

Для электродов была применена ультразвуковая очистка. Данный процесс осуществляется в специальной моющей жидкости, в которую вводятся ультразвуковые колебания. Это позволяет удалить с поверхности деталей различные виды загрязнений более качественно за более короткий промежуток времени. Данный процесс является подготовительным перед электрохимической полировкой.

Процесс электрохимической полировки [52] является заключительным в технологическом цикле изготовления. Во время его проведения происходит удаление части слоя материала за счет растворения в электролите. Основным компонентом электролита является ортофосфорная кислота, в которую добавлен ангидрид и небольшое количество дистиллированной воды. Обрабатываемая деталь является анодом, а катодом служит рабочая ванна с электролитом. Данный способ обработки позволил улучшить шероховатость поверхности на 1-2 класса и придать детали блеск. Процесс протекал при температуре электролита 20–30 °С при анодной плотности тока 30–50 А/дм<sup>2</sup>, в течение 1–2 минут. На рисунке 2.34 показаны электроды 1 и 3, после электрохимической полировки.

После завершения технологического цикла проводятся контрольные измерения размеров всех исполнительных размеров. Для каждого эмиссионного отверстия контролю подлежит геометрия профиля канала, приведенная на рисунке 2.3, а также его осевая направленность. Напомним, что ось канала отверстия должна быть направлена в точку фокуса системы. Все измеренные величины заносятся в карту контроля.

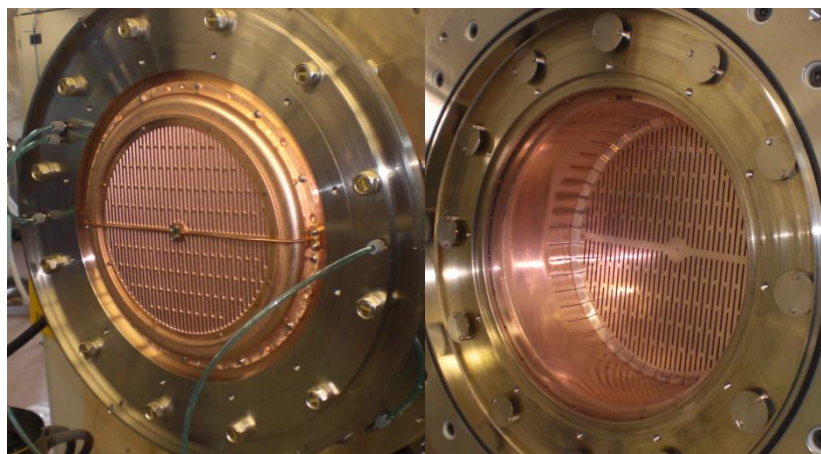


Рисунок 2.34 – Электроды 1 и 3 после электрохимполировки

Подводя итог можно сказать, что для изготовления электродов с баллистической фокусировкой требуется высокотехнологичное производство, которое является сочетанием высокой квалификации специалистов и хорошего технического оснащения. Для осуществления производственного цикла, требуется основательная проработка технологических процессов, включая написание управляющих программ для станков с ЧПУ. Использование пятикоординатных станков с ЧПУ позволило достигнуть качества и точности, не виданных ранее. Под управлением специальной программы стало возможным получение более сложных профилей каналов отверстий. Особую, значимую роль в достижении требуемого результата сыграло использование хромоциркониевой бронзы, свойства которой весьма полезны в условия частого возникновения пластических деформаций во время обработки.

## 2.2 Плазменный ВЧ эмиттер

Для формирования интенсивного ионного пучка большого сечения необходим источник способный обеспечить требуемую поверхность эмиссии, на которой поддерживается высокая степень однородности плотности плазмы в течение импульса. Для этого источник плазмы должен обеспечивать хорошую стабильность получения разряда и поддержания его горения, что, в основном, определяется надежностью работы элементов его конструкции. В инжекторах быстрых атомов с импульсами большой длительности, широкое распространение получили высокочастотные источники плазмы на основе индукционного разряда [53-57]. В этих устройствах возбуждение и поддержание ВЧ разряда осуществляется за счет ввода мощности в разрядные камеры через торцевую или боковую стенки, выполненные, как правило, из керамического материала.

В режимах работы больших мощностей и длительностей импульсов разряда, элементы конструкции плазменного источника подвержены значительным тепловым нагрузкам. Основными каналами нагрева элементов конструкции источников плазмы являются потоки плазмы, омические потери в ВЧ антенне и потери на вихревые токи, возбуждаемые ВЧ полем образующиеся в замкнутых конурах металлических деталей. Наиболее слабым местом ВЧ источника является керамическая стенка, которая при отсутствии защиты, подвержена перегреву, распылению и металлизации частицами, распыленными с металлических элементов. Для ее защиты применяется защитный экран – экран Фарадея, который несколько ослабляет электромагнитное поле внутри плазменной камеры, что снижает эффективность генерации плазмы.

В современных источниках плазмы тепловые нагрузки на экраны Фарадея составляют десятки киловатт при длительностях импульсов близких к стационарным, что требует для них охлаждения с высокой интенсивностью теплообмена. Обеспечение оптимальных температурных условий защитных экранов является частью работ, направленных на увеличение эффективности генерации плазмы, которые ведутся в мировых научных центрах [58-60].

В конструкции инжектора применен комбинированный источник плазмы в котором введение ВЧ мощности осуществляется со стороны боковой цилиндрической стенки. Начальная ионизация рабочего газа инициируется электронной эмиссией в результате вакуумного пробоя, а дальнейшее горение разряда в плазме поддерживается путем введения ВЧ мощности в плазменную камеру при помощи индуктора (антенны). Общий вид плазменного (источника) эмиттера с указанием основных элементов конструкции приведен на рисунке 2.35.

Внутренний объем источника плазмы формируют торцевая стенка 3 и боковая стенка 5. Вакуумная плотность между элементами, формирующими объем плазменной камеры (торцевая стенка, боковая стенка и опорный фланец) обеспечивается уплотнителями из вакуумной резины. Между собой эти элементы стягиваются металлическими шпильками, на концах которых, под гайками, уложен пакет из тарельчатых пружин. Их наличие позволяет гасить деформации, возникающих в результате теплового расширения элементов конструкции и обеспечивать постоянное усилие на резьбе. Боковая стенка источника плазмы, выполненная из глиноземной керамики с высоким содержанием оксида алюминия, имеет наружный диаметр 360 мм, толщину стенки 7 мм и длину 120 мм. В конструкции применена трехвитковая охлаждаемая ВЧ антенна 4, изготовленная из медной трубки диаметром 8 мм, по которой прокачивается вода. Антенна закреплена на специальных кронштейнах в средней плоскости плазменной камеры. Рабочая частота ВЧ антенны около 4 МГц.

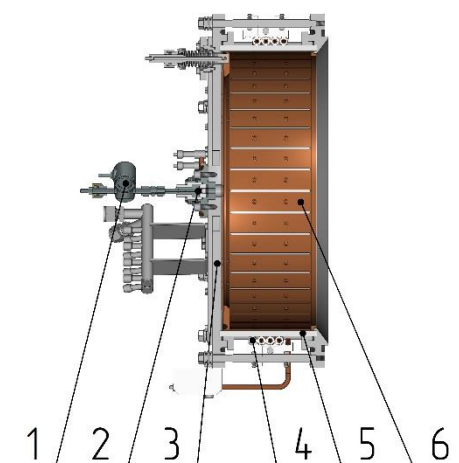


Рисунок 2.35 – Плазменный ВЧ эмиттер: 1 – газовый клапан, 2 – узел поджига, 3 – торцевая стенка, 4 – ВЧ антенна, 5 – боковая стенка, 6 – экран Фарадея

Торцевая стенка источника изготовлена из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. На ней размещаются коллекторы для подключения элементов, имеющих охлаждение и узел поджига разряда 2 с интегрированным в него клапаном напуска рабочего газа 1. Узел поджига представляет собой два коаксиальных электрода разделенных керамическим изолятором. В теле торцевой стенки отфрезерованы пазы для укладки постоянных магнитов. Магниты устанавливаются таким образом, что после наложения на них магнитопровода, на внутренней (вакуумной) поверхности стенки создается мультипольное магнитное поле. Охлаждение торцевой стенки и узла поджига обеспечивается впаянными медными трубками. Поверхность торцевой стенки, обращенная в вакуум, защищена тепловым экраном, изготовленным из молибдена.

Для защиты боковой керамической стенки от неблагоприятных факторов в плазменной камере установлен экран Фарадея. Он представляет собой сборку, которая приведена на рисунке 2.36. К разрезному медному экрану 4 припаяны медные фланец 2 и кольцо 5. К фланцу через резьбовые элементы крепится молибденовый тепловой экран 1. Для отведения теплоты от экрана во фланец впаяна трубка 3. Экран Фарадея крепится к торцевой стенке источника плазмы через сильфонные развязки, что дает возможным его беспрепятственное расширение при нагревании.

Процесс ионизации рабочего газа протекает в следующей последовательности. В плазменную камеру эмиттера, через газовый клапан напускается рабочий газ инжектора (водород или дейтерий). После напуска газа в камеру включается ВЧ антенна, подключенная к высокочастотному генератору, которая создает вихревое поле в плазменной камере. В результате вакуумного пробоя в узле поджига, в плазменную камеру эмитируются электроны, где, попадая в высокочастотное электрическое поле, начинают ускоряться. Ускоренные электроны запускают процесс ударной ионизации молекул рабочего газа в камере. Максимальная величина выделяющейся мощности в этом процессе оценивается величиной до 40 кВт.

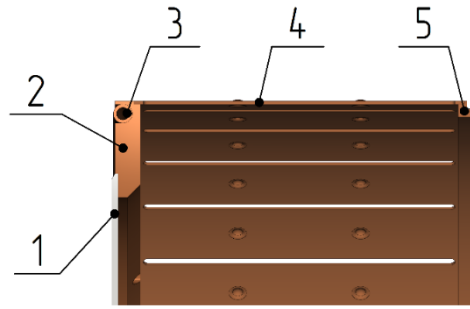


Рисунок 2.36 – Экран Фарадея: 1 – тепловой экран торцевой стенки, 2 – фланец, 3 – трубка охлаждения, 4 – разрезной экран, 5 – кольцо

Экран Фарадея является наиболее нагруженным элементом от состояния которого зависит работоспособность источника плазмы. Поэтому является необходимым расчет его теплового состояния. Величина тепловой нагрузки на экран Фарадея зависит от множества факторов и может быть определена только экспериментальным путем. В работе [61] показано, что экспериментально измеренная тепловая нагрузка на фарадеевский экран составила около 65,8% от общей нагрузки на источник плазмы. В программном комплексе Ansys было смоделировано тепловое состояние фарадеевского экрана. Для этого на внутренней поверхности экрана была распределена тепловая мощность 30 кВт, а в канале трубки охлаждения задано условие конвективного теплообмена с коэффициентом теплоотдачи 12000 Вт/м<sup>2</sup>К. Результат расчета приведен на рисунке 2.37.

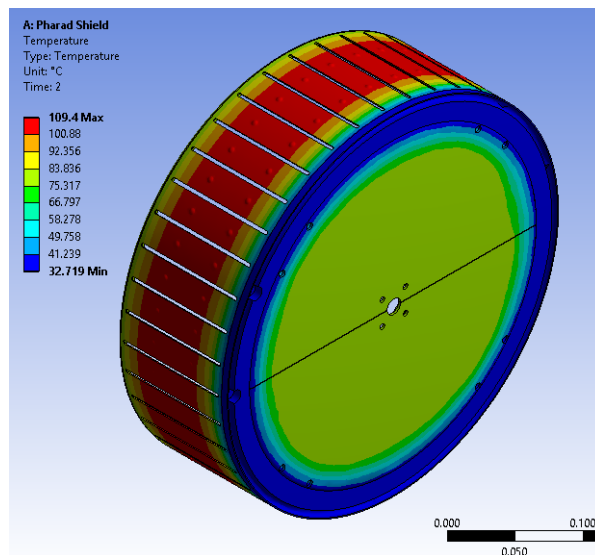


Рисунок 2.37 – Температурное поле экрана Фарадея за импульс 2 с: максимум – 109,4 °С, минимум – 32,7 °С

Наиболее разогретой деталью экрана является разрезной экран. Значение градиента его температура составило 109,4 °С. Наличие сильфонных компенсаторов в подвеске экрана обеспечивает свободу расширения металла в результате нагрева, что предохраняет его



от разрушительных напряжений. Места пайки и сварки находятся в приемлемых температурных условиях – 35–40 °С.

На торцевой стенке источника, как упоминалось выше, располагаются постоянные магниты, формирующие периферийное мультипольное магнитное поле вблизи поверхности, обращенной в вакуум. Ее назначение, с одной стороны, состроит в рассеивании потока обратных электронов, поступающих из ионно-оптической системы, и тем самым в уменьшении плотности теплового потока на торцевую стенку. С другой стороны, мультипольное магнитное поле снижает поток плазмы на стенку, тем самым увеличивая энергетическую эффективность разряда [62, 63]. Таким образом магнитная стенка улучшает удержание ионов плазмы в камере и увеличивает эффективность поглощения высокочастотной мощности в разряде.

Источник плазмы имеет достаточную простоту конструкции и демонстрирует высокую надежность работы. Плазменный эмиттер крепится непосредственно к изоляторному узлу ионно-оптической системы.

### **2.3 Многоапертурные электроды ионно-оптических систем с баллистической фокусировкой пучка для атомарных инжекторов**

Многоапертурные ионно-оптические системы с баллистической фокусировкой для инжекторов быстрых атомов, разрабатываемых в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, в 90-х годах прошлого столетия перешли на более высокий уровень развития [64]. В это время начали появляться компьютерные коды, позволяющие рассчитывать и оптимизировать элементарные ячейки многоапертурных электродов, а также инженерные программы, способные рассчитывать параметры их состояния под действием термомеханических нагрузок и оценивать жизнеспособность в условиях нагружения. Не менее важным стало появление в то же время пятикоординатных станков с ЧПУ, которые позволили достигнуть нужных качества и точности изготовления многоапертурных электродов ИОС. В системах с баллистической фокусировкой получение первичного ионного пучка происходит из отдельных пучков, которые проходят процесс формирования и ускорения в элементарных ячейках ионно-оптической системы. Причем каждая элементарная ячейка образуется из согласованных отверстий на каждом из электродов. Точность профиля отверстия, его направленность и взаимное расположение отверстий определяют качество полученного пучка. Отклонение профиля отверстия и межэлектродных зазоров от проектных приведут к изменению угловой расходимости пучков в элементарных ячейках и могут ухудшить электрическую прочность системы. Ошибки ориентации осей

отверстий, связанные с точностью сферических поверхностей электродов и их смещением с заданной оси, не позволят точно свести пучки из отдельных элементарных ячеек в области фокусировки. В результате в области фокусировки расчетные размеры пучка и плотности тока атомов не будут обеспечены.

С появлением программного комплекса ANSYS моделирование рабочих состояний электродов вышло на качественно новый уровень. При наличии реальной твердотельной модели, еще на стадии проектирования, стало возможным определение характера поведения электрода под воздействием нагрузок, а в частности расчет температурного поля, определение внутренних напряжения и величин его деформаций. Подобный вид моделирования позволяет проводить пошаговую оптимизацию моделей до получения требуемого результата, в которой особое внимание уделяется методам по снижению деформаций. Здесь же можно провести расчет усталостной долговечности изделия, которая является определяющим критерием его надежности.

В ионно-оптической системе инжекторов, разрабатываемых в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, применяется три типа многоапертурных электродов. Их отличие друг от друга заключается в форме и расположении отверстий, которые формируют эмиссионную область. В электродах первого типа она заполнена ячейками в виде круглых отверстий, образующих гексагональную структуру. Второй тип содержит отверстия в виде щелей, которые расположены со смещением на полпериода. У электродов третьего типа эмиссионная область образована отверстиями в виде щелей с рядным расположением. Все три типа приведены на рисунке 2.38. Каждый тип электродов имеет свои преимущества и недостатки. ИОС состоящие из многоапертурных электродов с круглыми отверстиями формируют пучки круглого сечения. В случае применения многоапертурных электродов с щелевыми отверстиями, из-за разных значений угловых расходимостей поперек и вдоль щелей, генерируют пучки эллиптического сечения.

Все три типа электродов имеют высокую прозрачность, значения которой достигают уровня 50%. Причем ограничения по прозрачности в большей степени связаны с прочностными свойствами электродов, а не со сложностью размещения отверстий в эмиссионной области. Высокая прозрачность и большие площади эмиссии, значения диаметров которых достигают 340 мм, позволяют добиться величин извлеченного ионного тока более 150 А. При этом необходимо иметь оптимальную зависимость плотности тока от угловой расходимости пучка, которая обеспечивается небольшими толщинами плазменного и ускоряющего электродов, значения которых располагаются в диапазоне от 1,5 до 3,5 мм. Электроды с большими диаметрами

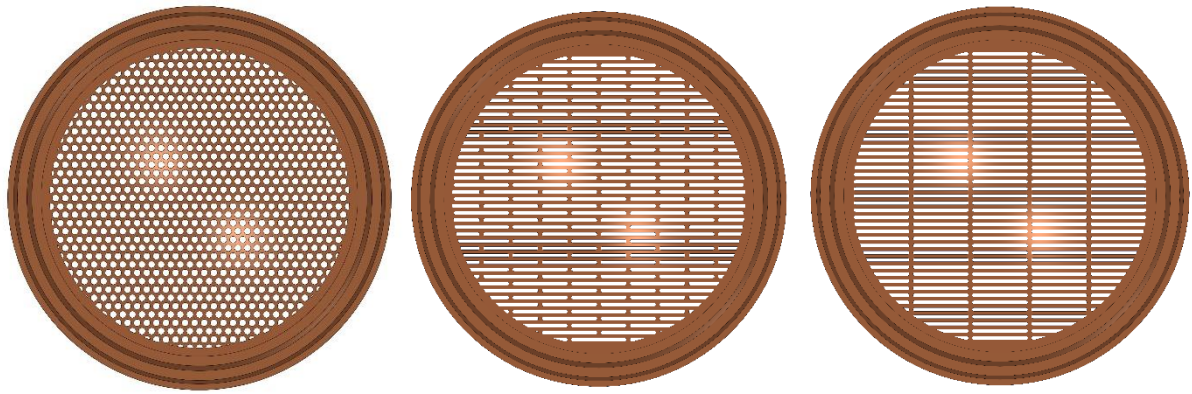


Рисунок 2.38 – Три типа электродов: слева – электрод с круглыми отверстиями; в центре – электрод с отверстиями в виде щелей со смещением; справа – электрод с отверстиями в виде щелей с рядным расположением

и малыми толщинами эмиссионных областей очень чувствительны к изменению заданной геометрии, поэтому, чтобы обеспечить сохранение их формы, необходимо решить две задачи.

Первая задача связана с изготовлением. Получение сферических поверхностей не предоставляет особых трудностей. Достаточно сложно сохранить их до конца процесса изготовления. Потеря формы происходит по двум причинам. Первая – это снижение жесткости из-за значительного удаления материала из тела детали в процессе обработки отверстий. Вторая – внутренние остаточные напряжения, которые возникают в материале при его контакте с инструментом. Величина напряжения находится в прямой зависимости от прикладываемой силы. Поэтому для минимизации усилий воздействия на электрод со стороны режущего инструмента, является важным подбор оптимальных режимов резания, при которых удаление материала происходит малыми толщинами. Обработка должна вестись поочередно с каждой стороны. Контроль сферичности электрода ведется на протяжении всего технологического цикла. Восстановление формы осуществляется путем проведения ряда технологических процессов, в числе которых: снятие внутренних напряжений, холодная формовка и упрочнение.

Вторая задача – это обеспечение приемлемого температурного режима работы электродов. В процессе работы системы на электроды воздействуют потоки вторичных частиц, мощность которых оценивается десятками киловатт. Это взаимодействие ведет к разогреву материала и его объемному расширению. Конструктивно электрод представляет собою внутреннюю (эмиссионную) область в форме сферического сегмента, которая сопряжена с опорным фланцем или цилиндрической обечайкой. Тепловая мощность от вторичных частиц поглощается только внутренней частью. Разогретая сфера имеет две зоны значительных напряжений. Внутреннюю зону, где напряжения возникают в результате сжатия слоев материала и наружную, где напряжения возникают за счет растяжения слоев. Все это способствует возникновению

внутренних напряжений, значения которых, в некоторых случаях, приближаются к пределу прочности материала.

Вследствие возникновения внутренних напряжений проявляются два усложняющих фактора. Первый – это механические деформации материала электрода. Электроды, получившие значительные деформации теряют заданное положение относительно друг друга. В результате этого нарушаются зазоры между электродами, соосные отверстия теряют осевую согласованность. Все это существенно снижает качество пучка.

Вторым фактором является снижение усталостной долговечности электрода, которая в современных системах является главным критерием надежности. В процессе работы ионно-оптической системы электроды подвергаются воздействию циклических термомеханических нагрузок, которые возникают в следствие расширения материала во время рабочего импульса. В результате продолжительного циклического нагружения возникают необратимые пластические деформации, которые ведут к образованию усталостных трещин. После образования усталостной трещины разрушение материала становится вопросом времени.

Снизить величины возникающих внутренних напряжений возможно двумя способами. Первый – это обеспечить оптимальный тепловой режим работы электрода во время рабочего импульса, путем введения активного охлаждения. На данный момент технологические возможности производства Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН не позволяют получить каналы охлаждения в сферических поверхностях с толщинами до 3 мм. Существуют способы для подведения активного охлаждения к отдельным участкам электродов, которое лишь улучшает теплоотвод между импульсами. Второй способ и пока единственный – это введение в конструкцию электродов конструктивных элементов, которые позволят снизить напряжения за счет поглощения части расширения в них или уменьшат жесткость материала в заданном направлении. Подобные конструктивные элементы представляют собой разрезы разной направленности, которые располагаются на периферии эмиссионной области. Разрезы делятся на азимутальные и радиальные. Азимутальные разрезы - это два массива с одинаковым числом разрезов, которые расположены на двух concentрических окружностях. Разрезы на внутренней и внешней окружностях ориентированы таким образом, что образуют пластинчатую пружину. Таким образом конструкция электрода представляет собой внутреннюю сферическую поверхность, которая подвешена к опорному фланцу через пластинчатую пружину. Введение данных элементов позволяет снизить деформации в результате расширения более чем в десятки раз, а внутренние напряжения более чем на четверть. Радиальные разрезы – это массив разрезов, который располагается в месте сопряжения сферического сегмента с цилиндрической обечайкой. Смысл данного решения заключается в том, чтобы разделить радиусную или коническую

переходную деталь электрода, на множество пластинчатых элементов, суммарная жесткость которых меньше чем исходной.

Проведем сравнительный анализ электродов, изображенных на рисунке 2.38, в котором покажем возникновение неблагоприятных факторов при нагреве и как введение азимутальных разрезов позволит их снизить. Все электроды имеют одинаковые геометрические размеры, прозрачность, массу и отличаются лишь формой и расположением отверстий в эмиссионных областях. Приложим тепловую нагрузку в виде теплового потока, к внутренним поверхностям отверстий равной 36 кВт в течение 300 мс. Все электроды имеют одинаковое закрепление на поверхности с постоянной температурой 20 °С. Материал электродов – хромоциркониевая бронза марки БрХЦр с пределом прочности 460 МПа.

Все три типа электродов за одинаковый промежуток времени показали различные значения величин градиента температуры, которые приведены на рисунке 2.39. Наибольшую величину нагрева, равную 99,7 °С, показал электрод с щелевыми отверстиями с рядным расположением. На три градуса меньше нагрелся электрод с щелевыми отверстиями со смещением, показав

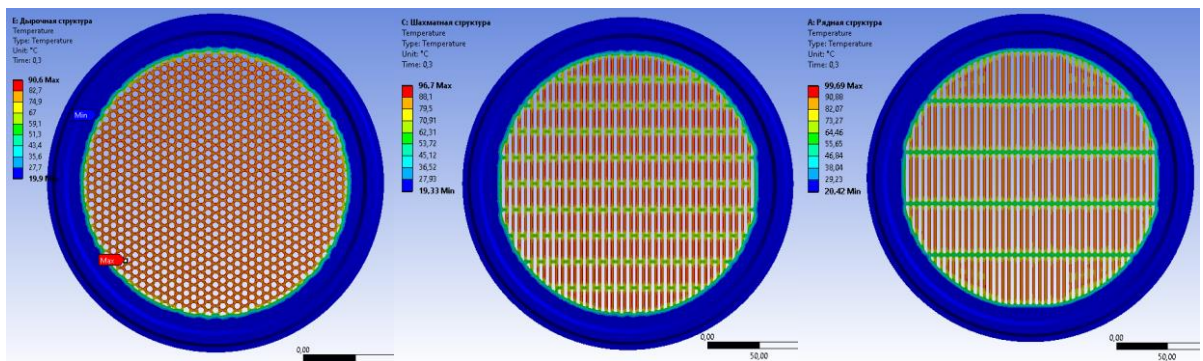


Рисунок 2.39 – Нагрев электродов за импульс 300 мс: слева – электрод с круглыми отверстиями; в центре – электрод с отверстиями в виде щелей со смещением; справа – электрод с отверстиями в виде щелей с рядным расположением

величину 96,7 °С. Наименьшее значение нагрева, равное 90,6 °С, показал электрод с круглыми отверстиями. Большой уровень разогрева электродов с щелевыми отверстиями объясняется тем, что теплоотвод осуществляется только в двух направлениях – поперек и вдоль щелей, в отличие от электрода с отверстиями в котором таких ограничений нет.

Внутренние напряжения с наибольшими значениями возникают в электроде с круглыми отверстиями, максимальная величина которых достигает уровня 419,9 МПа. Зоны напряжений расходятся в виде кругов от центра к периферии. Причем в центральной части находится область со средними значениями от 100 до 140 МПа, за ней следует зона с относительно малыми напряжениями от 0,3 до 47 МПа, а к периферии они достигают своего максимума. Наибольшие значения наблюдаются в месте сопряжения сферического сегмента с кольцом. Равномерное

распределение напряженностей в виде колец правильной формы объясняется однородной радиальной жесткостью электрода с круглыми отверстиями. У электродов с щелевыми отверстиями наблюдается асимметрия в распределении напряжений. Напряжения распределяются по зонам в виде эллиптических участков. Это объясняется тем, что электроды подобных типов имеют два направления жесткости – поперек и вдоль щелей. Значение максимальных напряжений в них более чем на 20 МПа ниже чем в электроде с круглыми отверстиями.

Картина распределения деформаций для каждого из электродов имеет сходство с картиной распределения для напряжений, которые возникают в электродах в силу линейной связи между ними. На рисунке 2.40 приведены результаты расчетов деформаций для каждого из электродов. Как видно из рисунка поле деформаций имеет кольцевую структуру в соответствии с симметрией задачи. Зона с максимальными значениями перемещений находится в центре сферического сегмента. С продвижением от центра электрода к периферии деформации убывают. Максимальное значение деформации имеет электрод с круглыми отверстиями. Электроды с щелевыми отверстиями имеют меньшие значения деформаций, причем электрод со смещением отверстий имеет меньшие деформации, как и ожидалось.

Возникновение деформаций подобной величины в электродах недопустимо, поскольку они сопоставимы с толщинами электродов и зазорами между ними. При возникновении подобных перемещений ионно-оптическая система способна потерять не только возможность формирования пучка за счет рассогласования отверстий в элементарной ячейке, но и электрическую прочность.

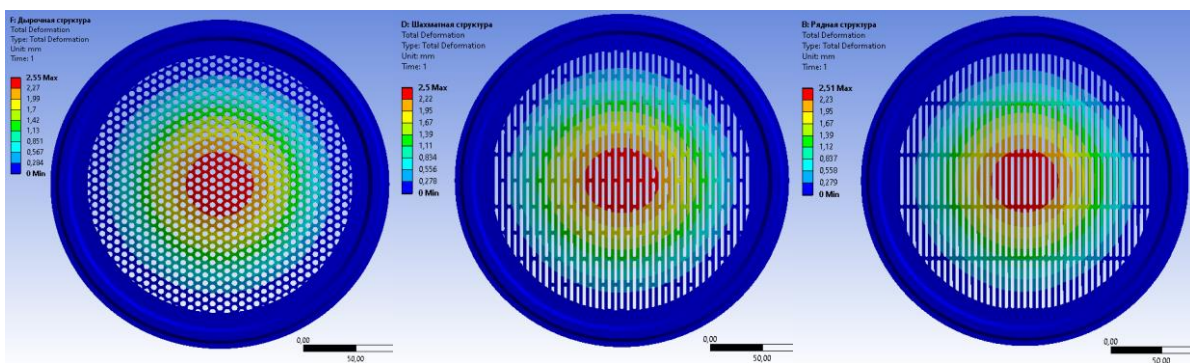


Рисунок 2.40 – Значения деформаций, возникающих в электродах: слева – электрод с круглыми отверстиями; в центре – электрод с отверстиями в виде щелей со смещением; справа – электрод с отверстиями в виде щелей с рядным расположением

Расчет усталостной долговечности показал, что наименьшее количество циклов нагружения может выдержать электрод с круглыми отверстиями. Его разрушение должно наступить примерно через 9500 циклов. При гарантийном сроке эксплуатации инжектора в 10 лет

и минимальном количестве выстрелов в день – 20 раз, усталостная долговечность электродов должна составлять не менее чем  $5,2 \cdot 10^4$  циклов. Электроды с круглыми отверстиями будет необходимо заменить как минимум пять раз, а электроды со щелевыми отверстиями потребуют четырехкратной замены. Сервисное обслуживание по замене электродов приведет к остановке работы инжектора и его разборке. Изготовление электродов потребует длительного времени и материальных затрат. Покажем, каким образом введение дополнительных конструктивных элементов позволяет снизить уровень внутренних напряжений и деформаций, а также увеличить усталостную долговечность электродов.

В электродах, изображенных на рисунке 2.38, введены азимутальные разрезы на периферии эмиссионных областей. Электроды с изменениями в конструкции приведены на рисунке 2.41.

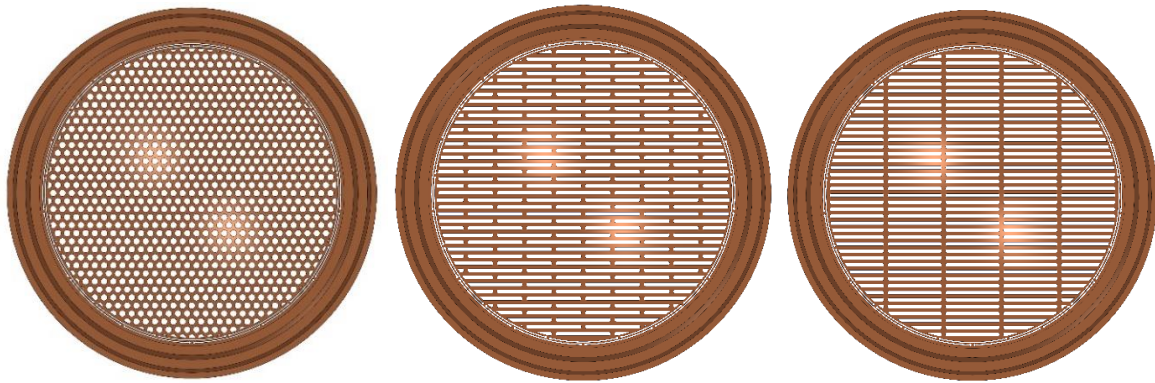


Рисунок 2.41 – Электроды после оптимизации: слева – электрод с круглыми отверстиями; в центре – электрод с отверстиями в виде щелей со смещением; справа – электрод с отверстиями в виде щелей с рядным расположением

На рисунке 2.42 представлены температурные поля электродов, где больший уровень нагрева показал многоапертурный электрод с круглыми отверстиями. Его максимальная

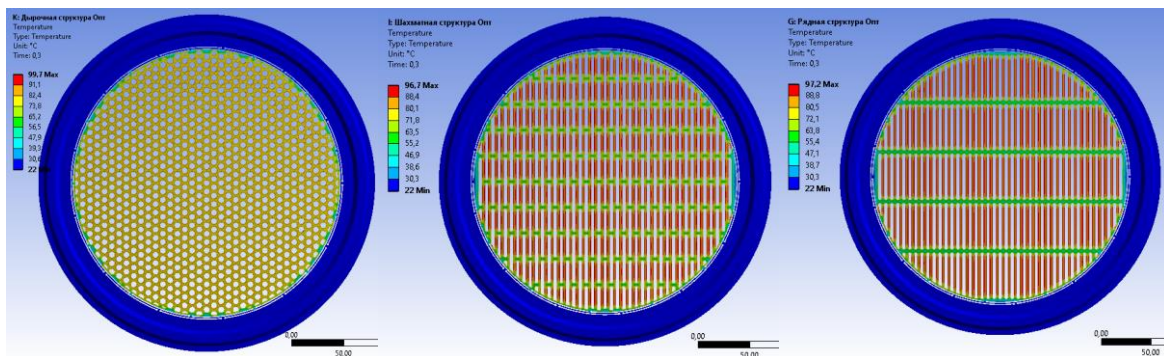


Рисунок 2.42 – Нагрев за импульс 300 мс после оптимизации: слева – электрод с круглыми отверстиями; в центре – электрод с отверстиями в виде щелей со смещением; справа – электрод с отверстиями в виде щелей с рядным расположением

температура составила 99,7 °С. Минимальный уровень нагрева равный 96,7 °С соответствует многоапертурному электроду с щелевыми отверстиями со смещением. Многоапертурный электрод с щелевыми отверстиями с рядным расположением имеет величину нагрева в максимуме 97,2 °С. Если для электродов без разрезов разница в температуре находилась в интервале 6–9 °С, то для оптимизированных версий она уже не имеет таких различий. Введение разрезов в конструкцию выравнивает условия теплообмена разогретой эмиссионной области с холодным внешним кольцом. Для всех вариантов каналы теплоотвода на периферии одинаковы по протяженности и имеют равные сечения.

Введение разрезов в конструкцию электродов позволило существенно снизить возникающие внутренние напряжения, о чем можно судить по уровню их деформаций. На рисунке 2.43 приведены расчетные значения деформаций оптимизированных электродов. Минимального уровня снижения деформаций, в 17 раз, удалось достигнуть для электрода с круглыми отверстиями. Для щелевых отверстий со смещением деформации снизились в 27,5 раза, а для рядного расположения щелевых отверстий в 17,9 раза. За счет существенного снижения уровня внутренних напряжений удалось повысить усталостную долговечность до уровня ~20000 циклов.

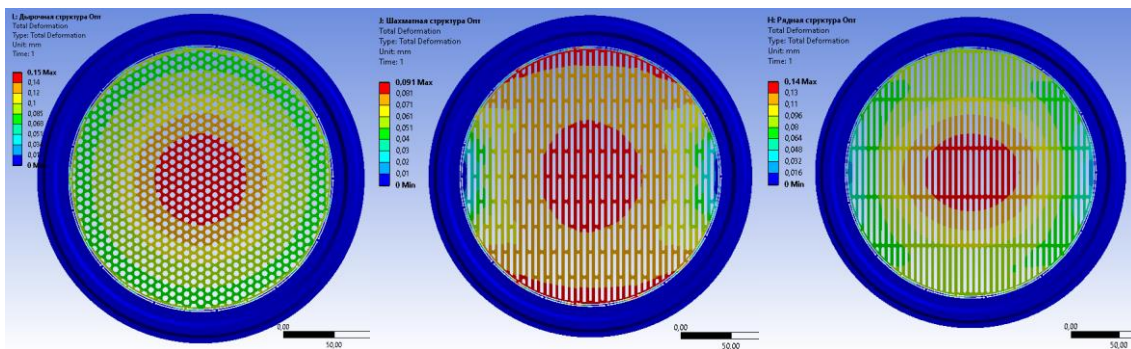


Рисунок 2.43 – Значения деформаций: слева – электрод с круглыми отверстиями; в центре – электрод с отверстиями в виде щелей со смещением; справа – электрод с отверстиями в виде щелей с рядным расположением

Введение конструктивных элементов, которые позволяют снижать жесткость в нужных областях электродов, позволяет добиться значительных улучшений условий их эксплуатации. Ионно-оптические системы с баллистической фокусировкой могут обеспечить высокие значения извлеченного тока из-за высокой прозрачности и большой плотности тока. При использовании подобных систем важным условием является оптимальное соотношение между длительностью импульса и мощностью пучка инжектора. Определяющим фактором является уровень нагрева, которого достигают электроды ионно-оптической системы. Для разработанных



многоапертурных электродов ИОС пучки с длительностями до 2 с могут иметь мощность до 1,5 МВт, а пучки с мощностью 5 МВт могут иметь длительностью не более 300 мс.

### Глава 3 Вакуумная система инжектора

Инжектор интенсивного атомарного пучка должен обладать вакуумной системой достаточной производительности, что подразумевает сочетание высокой скорости откачивающих устройств в сочетании с хорошей проводимостью элементов тракта. 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. Вакуумная система является совокупностью взаимосвязанных элементов и устройств, формирующих ее объем, а также создающих и поддерживающих нужный уровень разрежения в пучковом тракте.

Объем вакуумной системы инжектора образован соединенными между собой источником ионов, вакуумной камерой и калориметром, и разделен на две части диафрагмой. После присоединения к порту токамака TCV, вакуумный объем инжектора становится частью его вакуумной системы. Последовательность соединения элементов приведена на рисунке 3.1.

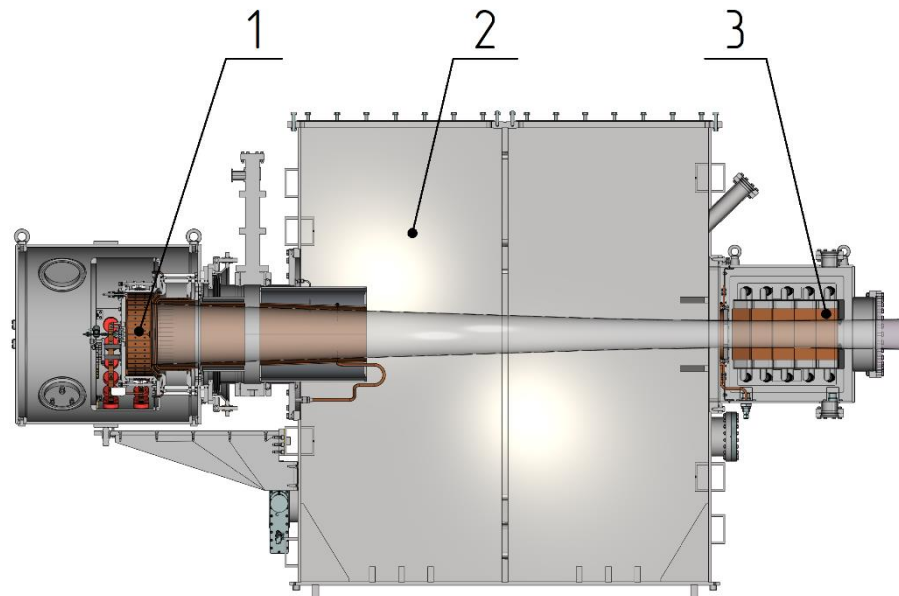


Рисунок 3.1 – Элементы, образующие вакуумный объем инжектора: 1 – источник ионов, 2 – вакуумная камера, 3 – калориметр

Вакуумноплотные соединения элементов вакуумного объема обеспечиваются витоновыми уплотнениями. Основным элементом вакуумного объема является вакуумная камера 2, которая является несущим элементом в составе инжектора быстрых атомов. Для создания и поддержания

требуемого разрежения в пучковом тракте в состав системы включены три вида откачных насосов. Режим основной откачки обеспечивается двумя идентичными криогенными насосами, а для других целей используются два вспомогательных насоса – турбомолекулярный и механический. Они необходимы для получения предварительного вакуума и откачки во время обслуживания криогенных насосов.

Контроль степени разрежения в вакуумной камере обеспечивается вакуумметрами. Также в состав вакуумной системы входит система заливки жидкого азота. К элементам вакуумной системы следует отнести стандартные вакуумные затворы (шиберы), краны, патрубки, шланги и прочее.

### 3.1 Вакуумная камера инжектора

Вакуумная камера инжектора является основным элементом вакуумного объема. 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 крепления к ней.

Габаритные размеры вакуумной камеры по внутренней поверхности – 1300 x 1678 x 1881 мм. Она изготовлена из немагнитной нержавеющей листовой стали марки AISI 304L. Передняя, задняя и боковые стенки выполнены из листа толщиной 10 мм, а днище камеры из листа толщиной 15 мм. Все стенки камеры усилены приварными швеллерами, днище – приварными ребрами жесткости. Камера разделена на две равные по объему части внутренней перегородкой, которая выполняет функцию ребра жесткости для боковых стенок и является местом крепления некоторых узлов. С учетом размеров ребер и фланцев общий осевой размер вакуумной камеры составляет 1810 мм, при высоте – 1970 мм и ширине – 1434 мм. Ее объем около 4 м<sup>3</sup>, при весе 2236 кг.

На основе выбранной геометрии вакуумной камеры, была создана трехмерная модель, для которой, в программном комплексе T-Flex CAD, был проведен расчет напряженно-деформированного состояния. Это позволило оценить максимальные деформации, коэффициент запаса прочности по пределу текучести и эквивалентные напряжения. Результаты моделирования приведены на рисунках 3.2-3.4.

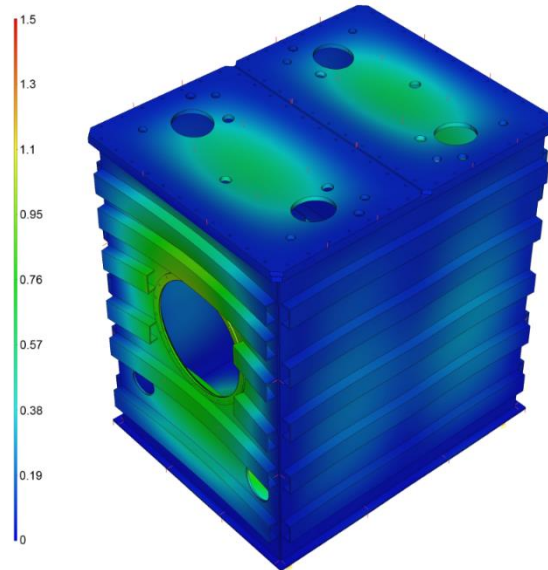


Рисунок 3.2 – Поперечные смещения стенок вакуумного бака под действием атмосферного давления снаружи: максимальная величина смещения около 1 мм

Расчет показал, что смещения стенок вакуумной камеры под действием атмосферного давления в максимальных значениях не превышают одного миллиметра. Расчетные внутренние напряжения, возникающие в металле, значительно ниже предела прочности, определяемого пределом текучести, который для стали марки AISI 304L составляет 210 МПа. Коэффициент запаса прочности, в зависимости от участка вакуумной камеры, имеет величину от 8 единиц и более. Следует отметить, что после установки некоторых элементов на вакуумную камеру прочность отдельных ее участков увеличивается, так как эти элементы добавляют общей жесткости конструкции.

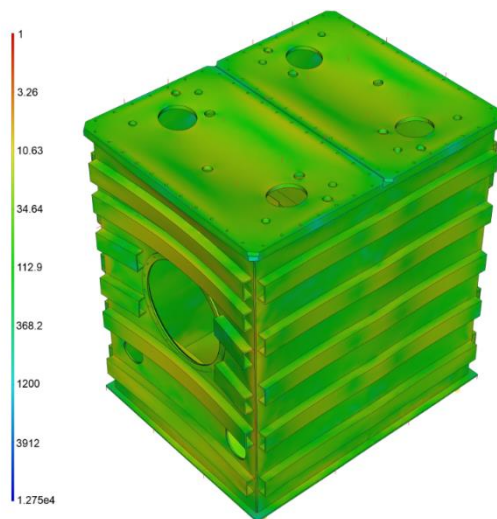


Рисунок 3.3 – Коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям: минимальное значение коэффициента запаса 8

На передней стенке камеры расположен круглый фланец с внутренним диаметром 630 мм для установки длинной части перезарядного канала (нейтрализатора). На задней стенке камеры расположен прямоугольный фланец размером 556 x 770 мм, для установки калориметра. Внутренняя перегородка обеспечивает дифференциальную откачку газа, поступающего из источника ионов и нейтрализатора. На ней располагаются поворотный магнит и приемники неперезарядившихся ионов. Верхний фланец камеры имеет два прямоугольных входных отверстия размером 790 x 1300 мм для установки криогенных насосов.

На передней стенке камеры расположены следующие порты: патрубок для подключения турбомолекулярного насоса с фланцем размером DN 250 ISO-F, патрубок для подключения питания и системы охлаждения поворотного магнита, с фланцем размером – DN 160CF, два патрубка с фланцами размерности DN 40CF, для присоединения вакуумметра и 10 мм патрубок для подачи газа на крионасос.

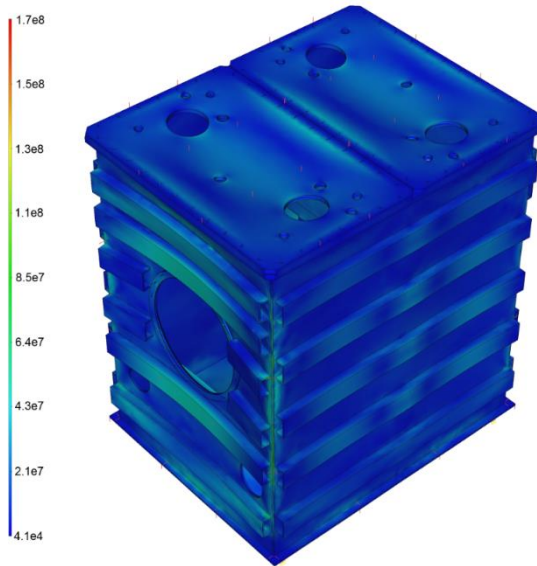


Рисунок 3.4 – Напряжения эквивалентные: максимальное значение 64 МПа

На задней стенке камеры расположены следующие порты: два патрубка с фланцами размером – DN 160CF для подключения системы охлаждения к приемникам неперезарядившихся ионов и диафрагме, два патрубка KF40 для установки вакуумметров, наклонный патрубок CF63 для установки оптической диагностики пучка и 10 мм патрубок для подачи газа на другой крионасос.

Вакуумная камера устанавливается на подвижной платформе, которая обеспечивает перемещение инжектора к токамаку и от него, и также позволяет выполнить некоторую юстировку инжектора целиком относительно токамака.

Платформа также изготовлена из немагнитной стали марки AISI 304L. Общий вид вакуумной камеры, установленной на платформе показан на рисунке 3.5.

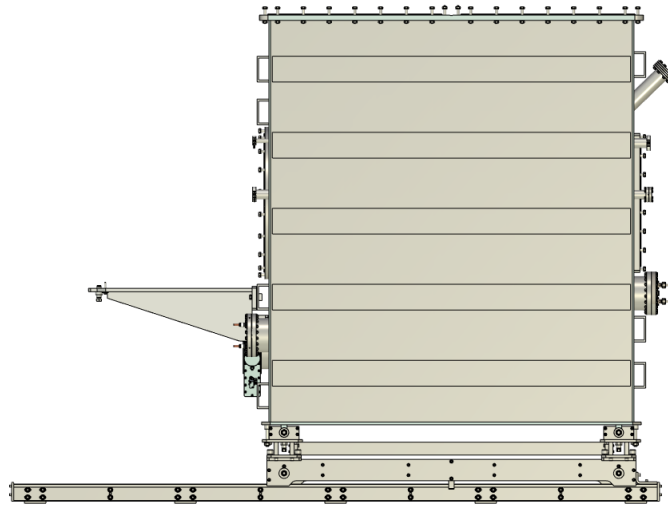


Рисунок 3.5 – Вакуумная камера на платформе

Технологический цикл изготовления вакуумной камеры инжектора пучка атомов осуществляется в несколько этапов. Начальным этапом производства является изготовление основного объема вакуумной камеры – корпуса, который получается путем сваривания между собой стенок камеры. Для этого при помощи специальной технологической оснастки, вертикальные стенки камеры предварительно фиксируются относительно друг друга. Проверяется прилегание сопрягаемых поверхностей и соосность отверстий на передней и задней стенках. В процессе сварки корпуса накладываются два вида швов – вакуумноплотные швы (с внутренней стороны корпуса), которые обеспечивают герметичность соединения, и прочностные (с внешней стороны), для усиления соединения.

После сварки выполняют обработку (планировки) горизонтальных плоскостей корпуса, образованных верхними и нижними кромками стенок. Эта операция позволяет получить плоскостность и взаимную параллельность поверхностей верхней и нижней плоскостей корпуса, которые они теряют из-за термодформаций (поводок) в процессе сварки. Термодформации возникают в результате неравномерного нагрева сварочной зоны и прилегающих участков, усадки – перехода металла из жидкой фазы в твердую, и возможной внутренней неоднородности, которая связана со структурным изменением.

Следует выбирать сварочные режимы, исключая перегрев металла и обеспечивающие быстрое остывание сварных швов [65, 66]. Для этого применяют режимы с малой погонной энергией или искусственное охлаждение зоны термического влияния (участки в области шва). Это необходимо во избежание межкристаллитной коррозии, которой подвержены нержавеющие стали с высоким содержанием хрома.

Следующим этапом является окончательное формирование корпуса вакуумной камеры. К полученному корпусу привариваются днище, фланцы, внутренние ребра жесткости и патрубки. Все сварные соединения проходят рентгеновский контроль на наличие внутренних

дефектов и вакуумную плотность. Испытание на герметичность проводится масс-спектрометрическим методом при помощи гелиевого течеискателя. Пороговая чувствительность течеискателя должна быть не менее  $1,3 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ . После этого корпус камеры отправляется на участок механической обработки.

На участке механической обработки производится доработка остальных элементов конструкции. На верхнем фланце для крепления крионасосов планируется плоскость с чистотой поверхности не хуже Ra 1,6. В отверстиях нарезается метрическая резьба. На фланцах, находящихся на оси пучка (фланцы на передней и задней стенках), также обрабатываются поверхности и резьбовые отверстия. Поверхности этих фланцев должны быть согласованы как между собой, так и с осью пучка. После завершения всех видов механической обработки вакуумная камера переходит на участок термической обработки, показанный на рисунке 3.6.

Перед термообработкой внутреннюю поверхность камеры приводят в соответствие с нормами вакуумной гигиены. Осуществляется мойка поверхностей с применением различных чистящих и сорбирующих веществ. После очистки вакуумных поверхностей от грубых загрязнений вакуумная камера проходит процесс термической обработки – обезгаживающего отжига [67-70]. Это позволяет избавиться от воды, различных газов и примесей,



Рисунок 3.6 – Вакуумная камера после отжига: позади камеры видна вакуумная печь

адсорбированных на поверхности и внутри металла. Стоит отметить, что данный процесс позволяет частично снять внутренние напряжения, которые возникают в процессе нагрева-плавления-остывания металла. Отжиг проводят в вакуумной печи при давлении  $1,3 \cdot 10^{-4}$  Па. Для контроля температуры внутри печи устанавливаются термопары, которые располагаются на поверхности вакуумной камеры. Нагреватель помещается непосредственно внутрь отжигаемой камеры. Откачка вакуумной печи производится турбомолекулярным насосом. Включение нагревательного элемента происходит одновременно с включением насоса. Синхронность процессов является важным условием. Постоянно ведется контроль температуры. После того, как температура внутри печи достигает значения в  $400$  °С, нагрев и откачку прекращают. Остывание происходит вместе с печью в течение двух суток.

### 3.2 Система вакуумной откачки инжектора

Система вакуумной откачки предназначена для создания и поддержания требуемого уровня давления в пучковом тракте инжектора. Сохранение требуемых вакуумных условий является необходимым для обеспечения электрической прочности ионно-оптической системы, допустимых ионизационных потерь пучка в процессе его транспортировки, малых потоков газа из инжектора в токамак. На рисунке 3.7 приведена схема системы вакуумной откачки инжектора, которая показывает расположение и подключение входящих в ее состав элементов.

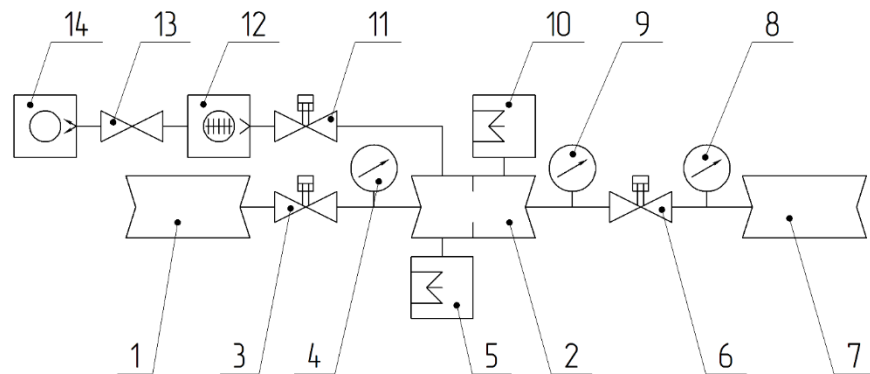


Рисунок 3.7 – Схема системы вакуумной откачки: 1 – источник ионов, 2 – вакуумная камера, 3 – шибер DN400, 4, 8, 9 – вакуумметры, 5, 10 – крионасосы, 6 – шибер DN250, 7 – вакуумная камера токамака TCV, 11 – шибер DN250, 12 – турбомолекулярный насос, 13 – затвор механический, 14 – механический насос

Режимом максимальной газовой нагрузки системы (режим основной откачки) является момент импульса (выстрела) инжектора. Процессы формирования первичного ионного пучка и его перезарядка, сопровождаются большими газовыми потоками из ионного источника,



нейтрализатора и приемника неперезарядившихся ионов. Во время этого режима система подвергается газовой нагрузке из источника ионов величиной 20 л·Торр/с в течение импульса длительностью 2 с. Поддержание давления на уровне  $\leq 10^{-2}$  Па при такой нагрузке обеспечивается двумя идентичными криогенными насосами с быстротой откачки 150 тыс. л/с каждый, которые расположены по обе стороны диафрагмы. Криогенные насосы имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с другими средствами получения высокого вакуума, важнейшими из которых являются – чистота откачки, высокая производительность и невысокая стоимость. Принцип действия насосов основан на конденсации и сорбции при низких температурах.

Для проведения подготовительных или сервисных мероприятий, требующих откачку, система оснащена дополнительно двумя механическими насосами.

Механический насос производительностью – 35 м<sup>3</sup>/ч и предельным давлением 1,3 Па (Leybold SCROLLVAC SC 60D), позволяет создавать и поддерживать давление во внутреннем объеме инжектора на уровне среднего вакуума, а также требуемое давление на выходе высоковакуумного насоса.

Турбомолекулярный насос TMP Leybold TURBOVAC 1100C, производительностью 3600 м<sup>3</sup>/ч (по водороду), предназначен для создания необходимых вакуумных условий ( $1,3 \cdot 10^{-3}$  Па) перед запуском криогенных насосов. С его помощью во время режимов регенерации крионасосов происходит удаление газов, испаряющихся с поверхностей криопанелей и экранов, из внутреннего пространства инжектора.

### 3.3 Крионасос

Крионасосы разработаны в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН и изготовлены на собственном экспериментальном производстве. В основу работы насосов положен метод конденсации газов на поверхностях, охлаждаемых до низких (криогенных) температур [71]. Данный тип насосов позволяет получить вакуум, свободный от органических загрязнений, с одновременным обеспечением большой скорости откачки. Насосы подобного типа целесообразно применять не только для откачки больших камер, но и в условиях больших газовых нагрузок.

Конструкция насоса представляет собой сочетание в одном агрегате устройства для получения низких температур (криогенатор) и устройства для обеспечения откачки (криопанель с теплозащитным жалюзийным экраном). В конструкции насоса имеется две

низкотемпературные системы (два контура), каждая из которых соответствует своя рабочая температура. Первая – это контур криоконденсационной панели, которая работает при температуре не выше 4,2 К. Вторая – это контур теплозащитного экрана, который охлажден до температуры 80 К.

В контуре криопанели для поддержания температурного состояния используется тепловой контакт с криоголовкой, охлаждение которой осуществляется компрессором криогенератора (криокулера) с замкнутым циклом циркуляции гелия. Наличие замкнутого цикла является предпочтительным, поскольку во время работы криогенератора отсутствует расход рабочего газа. Для его работы требуется только электрическая сеть и обычная техническая вода.

Криопанель является основной откачивающей частью насоса. Откачка объема осуществляется за счет криоконденсации газов на ее поверхности, которая имеет температуру жидкого гелия. Для защиты криопанели от тепловых потоков со стороны элементов пучкового тракта и стенок вакуумной камеры, она располагается внутри теплозащитного экрана.

Теплозащитный экран охватывает всю поверхность криопанели и обеспечивает оптическую непроницаемость для теплового излучения, но при этом сохраняет достаточную проводимость для откачиваемого газа. Поскольку насос не имеет входного патрубка (нет определенного направления потока откачиваемого газа), то наиболее рациональным способом защиты криопанели от тепловой радиации является применение шевронного теплового экрана. Такой тип экрана имеет оптимальную конструкцию, которая обеспечивает наибольшее снижение теплового потока и достаточно большую вероятность пролета  $c_n$  молекулы через экран.

Вероятность пролета представляет собой отношение числа молекул, прошедших через теплозащитный экран,  $N_1$  к числу молекул, падающих на его поверхность,  $N_2$ :

$$c_n = N_1 / N_2.$$

Удельная проводимость теплозащитного экрана  $U_s$  связана с вероятностью пролета соотношением:

$$U_s = c_n S_T,$$

где  $S_T$  – теоретическое значение максимально возможной быстроты откачки на единицу площади. Рабочая температура теплозащитного экрана составляет 80 К. Поддержание температурного режима в контуре теплозащитного экрана обеспечивается жидким азотом, который содержится в специальном резервуаре. Заливная схема этого контура наряду с преимуществами имеет главный недостаток – большой расход азота, величина которого максимальна во время запуска насоса.

В процессе работы крионасосы достигают предельной сорбционной емкости, что снижает быстроту откачки и ухудшает давление в пучковом тракте. Для восстановления параметров насосы нуждаются в регенерации. Регенерация – это процесс нагрева внутренней области криогенного насоса для удаления замороженных газов в атмосферу. Полная регенерация выполняется путем выключения криокулера, нагрева обоих контуров до температуры, выше комнатной и продувки оставшихся газов и паров воды из крионасоса.

Для полного удаления паров воды в течение полной регенерации все внутренние компоненты крионасоса могут нагреваться до температур от 40 °С до 60 °С. Более того, требуется напуск азота в объеме от 1,4 до 2,8 литров для испарения одной унции (28 грамм) воды в жидком состоянии при комнатной температуре. Для безопасного осуществления процесса регенерации крионасосов используется турбомолекулярный насос. Он обеспечивает откачку испаряющихся газов и поддерживает нужное давление в системе.

### 3.3.1 Расчет основных параметров насоса

Расчет параметров крионасоса выполнялся по методике и с использованием данных, приведенных в работе [71]. В качестве исходных данных для расчета насоса были приняты величина потока газа из источника ионов, который определен как 20 л·Торр/сек. и требуемая скорость откачки в 150 тыс. л/с. Целью расчета являлось определение геометрических размеров основных элементов насоса (криопанели и теплозащитного экрана) и мощности охлаждающих устройств.

Скорость откачки насоса  $S_n$  зависит от общей проводимости соединительных коммуникаций и теплозащитного экрана  $U_0$  и может быть выражена соотношением

$$S_n = \frac{S_k U_0}{S_k + U_0},$$

которое можно представить в виде:

$$S_n = (F_n S_k + U_3) / F_n S_k U_3,$$

где  $U_3$  – пропускная способность теплозащитного экрана.

Если известна вероятность пролета  $c_n$  молекул откачиваемого газа через экран, то площадь поверхности панели (при коэффициенте захвата, равном единице, для  $H_2$  при температуре криопанели, равной 4,2 К) определяется как

$$F_n = S_n / S_k c_n.$$

Пренебрегая изменением коэффициента аккомодации (эффективность захвата молекул поверхностью) молекул откачиваемого газа на азотном экране, можно считать, что теоретическая скорость конденсации газа будет равна  $44,2 \text{ л/(с}\cdot\text{см}^2)$  (таблица 1-7 [71]). Вероятность пролета молекул через шевронный экран  $c_n = 0,29$  (таблица 2-3 [71]). Тогда

$$F_n = \frac{150000}{44,2 \times 0,29} \approx 11000 \text{ см}^2.$$

При определении тепловых нагрузок на криопанель принималась степень ее черноты  $\varepsilon_n = 0,5$  (с учетом покрытия ее слоем конденсата). Тогда получим:

$$Q = \varepsilon_{np} \sigma F_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.1)$$

и таблице 3-4 [71] определяем тепловую нагрузку за счет излучения  $Q_{u.n.} = 1,3 \text{ Вт}$ . Конструктивно насос состоит из двух криопанелей и двух теплозащитных экранов.

Определим тепловые нагрузки на теплозащитный экран. Поверхность каждого теплозащитного экрана равна  $F_n = 12422 \text{ см}^2$ . При зачерненной наружной поверхности теплозащитного экрана ( $\varepsilon_s = 0,9$ ) по формулу (3.1) и таблице 3-5 [71] тепловая нагрузка за счет излучения будет примерно  $155 \text{ Вт}$ .

При площади поверхности азотного бака  $F_{AB} = 21711 \text{ см}^2$  и степени его черноты  $\varepsilon_s = 0,3$  (соответствует полированной стали марки 304L) тепловая нагрузка за счет излучения составит  $154 \text{ Вт}$ .

Далее перейдем к определению нагрузок через тепловые мосты, которыми являются элементы подвески азотного бака. Азотный бак подвешен на трех трубках из нержавеющей стали длиной  $288 \text{ мм}$  каждая. Диаметр трубок  $27 \text{ мм}$ , толщина стенки  $1 \text{ мм}$ . Теплоприток по тепловому мосту определится по формуле:

$$Q_m = \frac{F}{l} \int_{T_1}^{T_2} \lambda dT,$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения,  $l$  – длина теплового моста,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала,  $T_1$  и  $T_2$  – температура соответственно на “холодном” и “теплом” концах теплового моста. Для расчета воспользуемся средним значением теплопроводности, что упростит вычисление. Тогда

$$Q_m = \frac{F}{l} \lambda (T_2 - T_1).$$

Принимая  $\lambda = 16,2 \text{ Вт / (м}\cdot\text{К)}$ , найдем  $Q_m = 1 \text{ Вт}$  через одну трубку и  $3 \text{ Вт}$  через всю подвеску бака (три трубки).

Тепловая нагрузка на азотный бак составит:

$$Q_{AB} = 2Q_{TЭ} + 3Q_m + Q_B = 2 \times 155 + 3 \times 1 + 154 = 467 \text{ Вт.}$$

Далее определяем величину расхода жидкого азота. По таблице 3-10 [71], в которой приведены количества испаряемого хладагента на 1 Вт тепловой нагрузки, получаем, что расход жидкого азота равен 9,8 л/ч. Если сравнить найденный расход азота с величиной реального расхода (данные измеренные при работе инжектора), который составляет 7,5–8,5 л/ч, то он немногим выше. Это обусловлено тем, что в вакуумной камере установлены дополнительные теплозащитные экраны, которые снижают тепловой поток со стенок вакуумной камеры на теплозащитные экраны насоса и азотный бак, который имеет достаточно большую поверхность. Дополнительная теплозащитная экранировка будет рассмотрена ниже.

Поскольку охлаждение теплозащитного экрана от температуры  $T_1$  до  $T_2$  производится только за счет испарения, то можно определить расход жидкого азота на охлаждение по формуле:

$$G_x = \frac{m_{п}}{q_x} \int_{T_2}^{T_1} c_n dT,$$

где  $m_n$  – масса теплозащитного экрана,  $c_n$  – удельная теплоемкость материала теплозащитного экрана,  $q_x$  – теплота испарения хладагента. Интегральная зависимость обусловлена непостоянством  $c_n$  в широком диапазоне температур.

При практических расчетах можно использовать среднее значение удельной теплоемкости, тогда формула расхода хладагента примет вид:

$$G_x = \frac{m_{п}}{q_x} c_n (T_1 - T_2).$$

Принимая  $c_n = 0,10$  Дж/(г·К) (таблица 3-9 [71]) и  $q_x = 200$  Дж/г (таблица 3-10 [71]), при массе теплозащитного экрана 85,5 кг, получим  $G_x \approx 9$  кг. Таким образом, для охлаждения двух теплозащитных экранов крионасоса до рабочей температуры потребуется 18 кг жидкого азота.

### 3.3.2 Конструкция крионасоса

По результатам расчетов были определены размеры основных элементов крионасоса. Насос имеет две криоконденсационные панели, помещенные в теплозащитные экраны, которые охлаждаются двумя криокулерами, работающими на основе замкнутого газового цикла Гиффорда–Мак-Магона. Охлаждение теплозащитных экранов обеспечивается жидким азотом, который подается по трубкам из азотного бака. Подобная компоновка позволяет максимально отодвинуть панели от области транспортировки пучка и дает возможность размещения между

ними элементов пучкового тракта и узлов инжектора, которые находятся в вакуумной камере. Общий вид крионасоса приведен на рисунке 3.8. На рисунке 3.9 приведена фотография крионасоса в вакуумной камере.

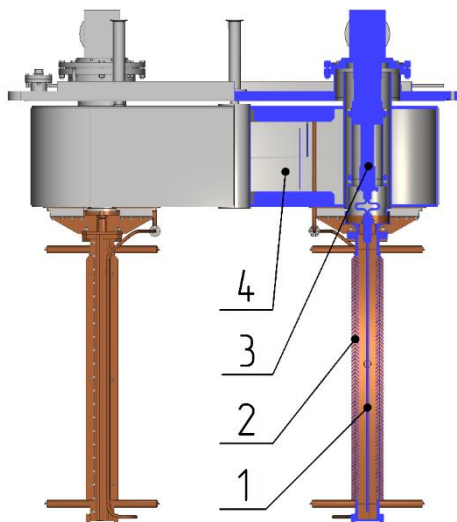


Рисунок 3.8 – Крионасос. Основные элементы: 1 – криоконденсационная панель, 2 – теплозащитный шевронный экран, 3 - криокулер, 4 – азотный бак

Расчетная площадь криоконденсационной поверхности насоса, которая необходима для откачки основного газового потока, составила  $\sim 1,1 \text{ м}^2$ . Для того, чтобы обеспечить откачку второстепенных газовых потоков, необходимо иметь некоторый запас по скорости откачки. Для этого суммарная площадь откачки насоса была увеличена до  $1,66 \text{ м}^2$ , при этом площадь одной панели составила  $0,83 \text{ м}^2$ . Криопанели насоса изготовлены из листовой бескислородной меди толщиной 6 мм и имеют полированные рабочие поверхности. Каждая криопанель соединяется

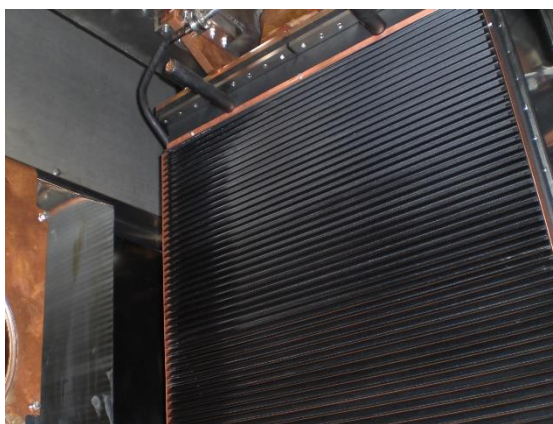


Рисунок 3.9 – Крионасос в вакуумной камере

своим теплопроводом непосредственно с головкой криокулера и фиксируется внутри теплозащитного экрана при помощи специальных растяжек. Подобный способ крепления позволяет зафиксировать ее на равных расстояниях относительно стенок экрана. Для поддержания рабочей температуры криопанелей применены криокулеры Sumitomo SRDK-415D с компрессором типа F50H, который обеспечивает холодопроизводительность 1,5 Вт при 4,2 К и имеет некоторый запас по мощности. Общий вид криопанели с элементами подвеса приведен на рисунке 3.10.

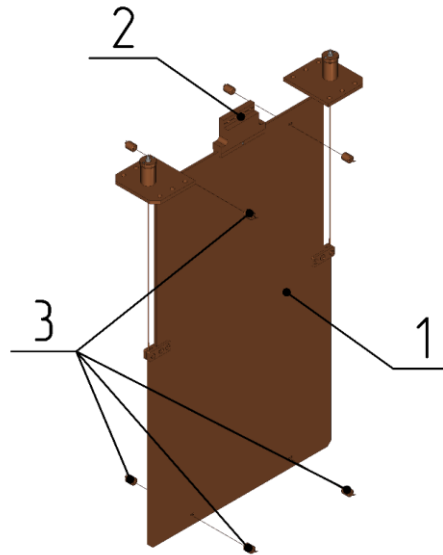


Рисунок 3.10 – Подвеска криопанели. Основные элементы: 1 – криоконденсационная панель, 2 – теплопровод, 3 – растяжки

В программном комплексе ANSYS было смоделировано тепловое состояние выбранной конструкции криопанели с учетом воздействия на нее расчетных тепловых нагрузок. На рисунке 3.11 представлены граничные условия задачи и температурное поле криопанели.

Теплозащитный экран представляет собой сборку из двух коробов, соединяемых между собой резьбовыми элементами. Проводимость газа обеспечивается наличием шевронов, которые формируют стенку короба. Рабочее температурное состояние теплозащитного экрана поддерживается за счет питания жидким азотом из бака, который находится под фланцем крионасоса. Его емкость составляет 200 л. Заполнение резервуара жидким азотом производится в автоматическом режиме два раза в сутки. Система заправки жидким азотом является неотъемлемой частью системы криогенной откачки инжектора и поставляется Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Общий вид теплозащитного экрана приведен на рисунке 3.12.

В программном комплексе ANSYS было проведено моделирование теплового состояния теплозащитного экрана с учетом воздействия на нее расчетных тепловых нагрузок. На рисунке 3.13 представлены граничные условия задачи и температурное поле теплозащитного экрана.

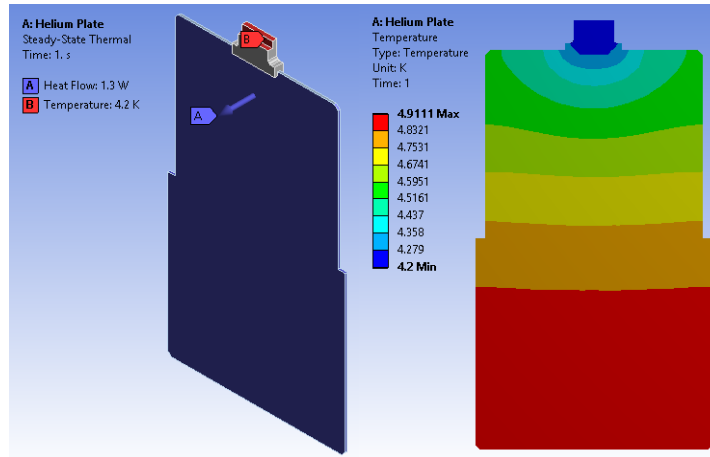


Рисунок 3.11 – Тепловой расчет криопанели: слева – граничные условия задачи; справа – температурное поле криопанели

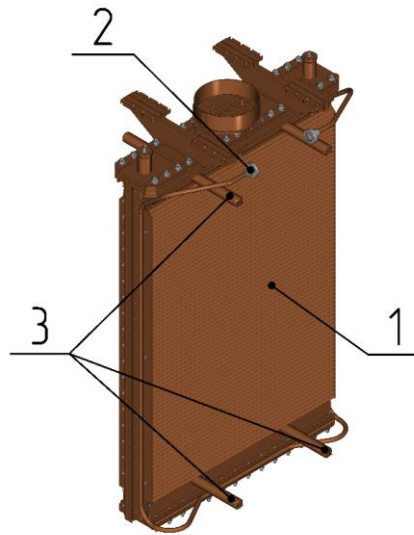


Рисунок 3.12 – Теплозащитный экран: 1 – шевронная стенка, 2 – трубка питания жидким азотом, 3 – элементы подвеса криопанели

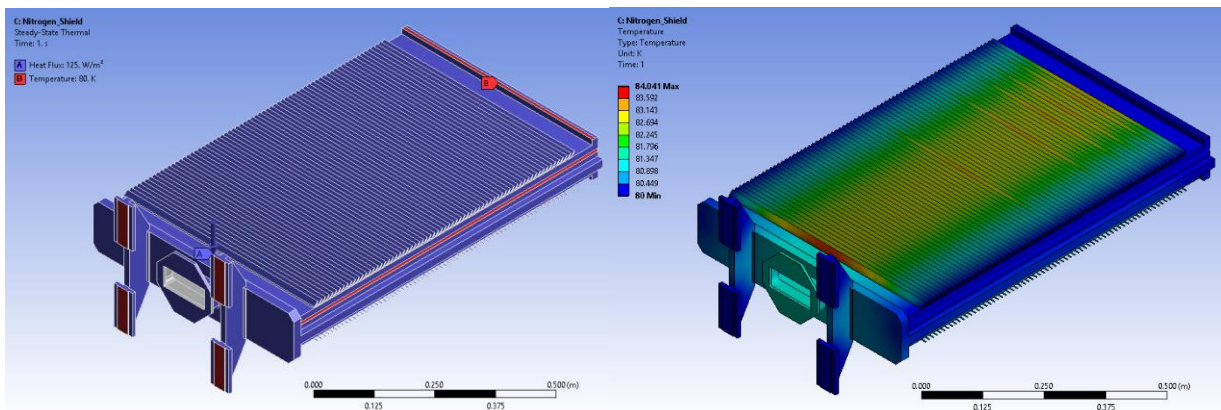


Рисунок 3.13 – Тепловой расчет экрана: слева – граничные условия задачи (красным выделены зоны с температурой 80 К, синим – поверхность воспринимающая общий падающий тепловой поток с плотностью 125 В/м<sup>2</sup>); справа – температурное поле теплового экрана (максимум – 84 К, минимум – 80 К)



### 3.4 Экранирование крионасосов

Расход жидкого азота величиной 9,8 л/ч является достаточно большим, что при длительных экспериментах ведет к большому суммарному объему, который в суточной потребности исчисляется величиной 236 литров. Расчетный суточный расход азота был определен при расчете с использованием упрощенной модели. В расчетную область входили только чистые поверхности стенок вакуумной камеры, без учета элементов, находящихся внутри, причем падение теплового излучения на поверхность азотных экранов приходилось по нормали. В реальных условиях тепловой поток на азотные экраны будет несколько выше. Это объясняется тем, что внутри вакуумной камеры расположены элементы пучкового тракта и поверхности вакуумной камеры, тепловые потоки с которых также вносят свой вклад в суммарную нагрузку на азотные экраны, что сказывается на расходе хладагента. Снижение величины суммарного теплового потока со стенок вакуумной камеры и поверхностей ребер жесткости удалось достигнуть путем установки внутрь вакуумной камеры защитных тепловых экранов. Каждый экран конструктивно представляет собой трехслойную панель, которая размещена на металлической рамке. Слои панели выполнены из листа стали марки 304L и зафиксированы между собой при помощи керамических втулок. Фрагмент сечения панели приведен на рисунке 3.14.

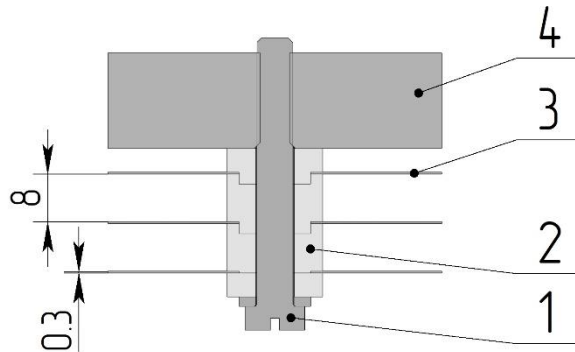


Рисунок 3.14 – Сечение защитного теплового экрана: 1 – стяжной винт, 2 – керамическая втулка, 3 – тонколистовая сталь марки 304L, 4 – рамка

Стальные листы толщиной 0,3 мм, расположены относительно друг друга на расстоянии 8 мм. Листы должны иметь зеркальную поверхность со степенью черноты,  $\varepsilon_s \ll 1$ . Это необходимо для достижения максимальной эффективности экранирования, которая достигается при экранировании тела, степень черноты которого  $\varepsilon_t \approx 1(0,9)$ . При таком сочетании степеней черноты экранирующего и экранируемого тел можно добиться снижения теплового потока

в десятки раз. В этом можно убедиться из формулы эффективности экранирования для плоского случая:

$$\eta = 1 - (1 + n \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{np}})^{-1}, \quad (3.2)$$

где  $n$  – количество экранов,  $\varepsilon_i$  – степень черноты экранов,  $\varepsilon_{np}$  – приведенная степень черноты.

Поскольку азотные экраны расположены внутри вакуумной камеры, то можно рассмотреть случай излучения между телами, когда одно расположено внутри другого. Излучение  $E_{1\varnothing}$  первого тела, в нашем случае стенок камеры, будет состоять из двух величин – это собственный поток  $E_1$  и отраженный поток:

$$E_{1\varnothing} = E_1 + (1 - A_1)\varphi E_{2\varnothing}.$$

Излучение  $E_{2\varnothing}$  второго тела, в нашем случае стенок азотного экрана, будет состоять из трех величин – это собственный поток  $E_2$  и два отраженных потока:

$$E_{2\varnothing} = E_2 + (1 - A_2)E_{1\varnothing} + (1 - A_2)(1 - )\varphi E_{2\varnothing}.$$

Величина  $\varphi$ , определяющая отношение площадей тел:

$$\varphi = F_1 / F_2.$$

Итак, тепловой поток между этими телами равен:

$$Q = \varepsilon_{np} \sigma F_1 (T_1^4 - T_2^4),$$

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \varphi (\frac{1}{\varepsilon_2} - 1)}.$$

Если же мы рассматриваем общий случай межповерхностного излучения, то тепловой поток будет равен:

$$Q = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_s} (T_1^4 - T_2^4) \psi,$$

где  $\varepsilon_s$  – степень черноты абсолютно черного тела,  $\psi$  – величина углового коэффициента излучения, который вычисляется по формуле:

$$\psi = \int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2)}{\pi r^2}.$$

Интегралы, входящие в выражение, достаточно сложно вычисляются даже для простейших случаев. Именно по этой причине расчет радиационного излучения целесообразно производит с помощью компьютерных программ, которые позволяют это сделать.

На рисунке 3.15 приведено расположение радиационных экранов внутри вакуумной камеры. Экраны перекрывают большую часть внутренней поверхности стенок вакуумной камеры за исключением тех мест, где требуются соответствующие вырезы для элементов и узлов инжектора.

Эффективность экранирования оценивается как отношение теплового потока в случае применения экранирования к теплового потока без экранирования:

$$\eta = (Q_{12} - Q_3) / Q_{12}.$$

Для определения величины теплового потока  $Q_3$ , непопадающего на тело в результате экранирования, необходимо определить  $\eta$  – эффективность экранирования из выражения (3.2). Поскольку теплозащитные экраны насосов и азотный бак имеют различные степени черноты поверхностей, то эффективность экранирования для них определим по-отдельности.

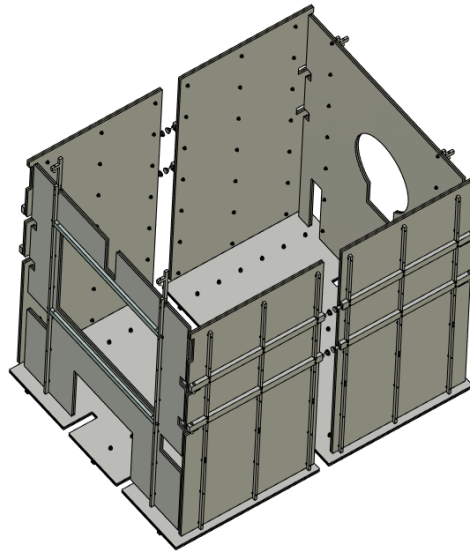


Рисунок 3.15 – Экраны внутри вакуумной камеры

Для одного теплозащитного (шевронного) экрана, если степень черноты экрана (полированная сталь марки 304 L)  $\varepsilon_3 = 0,3$ , приведенная степень черноты, при  $\varphi = F_1 / F_2 = 1$ ,  $\varepsilon_{np} = 0,294$ , то  $\eta = 0,67$ . Тогда количество тепла непопадающего на тело в результате экранирования, при  $Q_{12} = 155$  Вт,  $Q_3 = 51,1$  Вт, для двух теплозащитных экранов 102,2 Вт соответственно.

Для азотного бака, если его степени черноты (полированная сталь марки 304 L)  $\varepsilon_3 = 0,3$ , приведенная степень черноты, при  $\varphi = F_1 / F_2 = 1$ ,  $\varepsilon_{np} = 0,178$ , то  $\eta = 0,835$ . Тогда количество тепла, не попадающего на тело в результате экранирования, при  $Q_{12} = 154$  Вт,  $Q_3 = 25,4$  Вт соответственно.

Таким образом, для одного крионасоса будем суммарно иметь снижение нагрузки на азотный бак в 127,6 Вт. В соответствии со значением количества испаряющегося азота на 1 Вт тепловой нагрузки – 0,021 л/ч, получим снижение расхода жидкого азота 2,68 л/ч.

Расчетная величина расхода жидкого азота была определена как 9,8 л/ч. Полученная величина снижения нагрузки на азотный бак в результате экранирования находится в хорошем согласовании с экспериментальными данными, расход азота в которых определяется как 7,5–8,5 л/ч. Экспериментальная величина снижения нагрузки на азотный бак соответствует значениям 1,3–2,3 л/ч. Существенно снизить расход жидкого азота позволит чернение азотного бака и экранирование его собственной системой экранов.

## Глава 4 Элементы пучкового тракта инжектора

В составе инжектора содержится ряд элементов и систем, которые необходимы для того, чтобы преобразовать первичный ионный пучок в пучок быстрых атомов и отделить его от неперезарядившихся ионов. К ним относятся: система перезарядки (нейтрализации) первичного ионного пучка и система сепарации атомарного пучка от остаточных ионов.

### 4.1 Система перезарядки первичного ионного пучка

Для получения пучка быстрых атомов в инжекторе реализована схема перезарядки положительных ионов на собственном газе. Данная система наиболее проста в технологическом плане и используется в большинстве современных инжекторов. Перезарядный канал примыкает непосредственно к ионно-оптической системе, так что весь неионизованный газ, вытекающий из источника, образует перезарядную мишень. Схема с перезарядкой положительных ионов изотопов водорода на собственном газе получила широкое распространение для пучков с энергией частиц до 100–120 кэВ. Толщина мишени перезарядной газовой мишени определяется как:

$$\pi = \int_0^l n(x) dx \equiv \langle nl \rangle,$$

где  $n(x)$  – концентрация газа в мишени,  $l$  – длина мишени.

В случае пучка дейтронов, для обеспечения выхода фракций  $D^0$  и  $D^+$ , близкого к равновесному необходимо создать интегральную толщину мишени на уровне  $(0,5-1,0) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . В разрядной камере ионного источника вместе с атомарными ионами  $D_1^+$  образуются молекулярные ионы  $D_2^+$  и  $D_3^+$ , которые также входят в состав формируемого пучка. В мишени наряду с перезарядкой ионов  $D_1^+$  идут процессы диссоциации молекулярных ионов, которые приводят к появлению в нейтральном пучке молекул дейтерия  $D_2^0$  с энергией  $2E_0/3$  и атомов с энергиями  $E_0/2$  и  $E_0/3$  ( $E_0$  – основная энергия, приобретаемая ионами в ускоряющем зазоре источника). Соотношение между компонентами определяет условия захвата пучка, инжектируемого в термоядерную установку, и в конечном счете вносимую в плазму мощность.

На рисунке 4.1, для наглядности, приведен результат численного моделирования разделения пучка на атомарный и ионные пучки после поворотного магнита с помощью кода COMSOL [72]. Цветная цифровая шкала – это энергия частиц, кэВ, сетка диаграммы в миллиметрах. Диаграмма показывает, что фракционный состав пучка представлен атомарной

составляющей, тремя фракциями положительных ионов и фракцией отрицательных частиц (восходящая траектория). Положительные ионы представлены тремя видами энергий – 10, 15 и 30 кэВ, что соответствует частицам с энергиями  $E_0/3$ ,  $E_0/2$  и  $E_0$ .

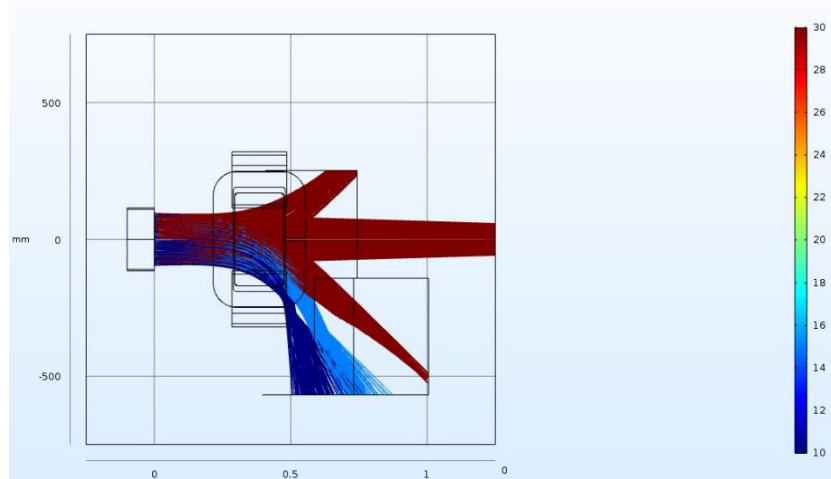


Рисунок 4.1 – Фракционный состав пучка после нейтрализации на равновесной газовой мишени

Перезарядка первичного ионного пучка в атомарный начинается непосредственно сразу после ионно-оптической системы. В этой части канала газовая мишень формируется из атомов дейтерия, которые вытекают из камеры источника плазмы. Если этого количества газа недостаточно для того, чтобы сформировать мишень, которая способна обеспечить равновесный выход атомов, в канале предусмотрен клапан для дополнительного напуска газа.

Эффективность перезарядки для полной энергии дейтериевого пучка составляет около 84%. Для пучков с энергиями 15 и 10 кэВ эффективность нейтрализации составляет 87% и 88,5% соответственно.

#### 4.1.1 Оценки газовых условий в пучковом тракте инжектора

Пучковый тракт инжектора представляет собой сочетание чередующихся патрубков, вакуумных объемов и диафрагм. Чтобы оценить давление газа на оси пучка проведено численное моделирование газовых условий с учетом конструктивных особенностей пучкового тракта. Для этого была создана расчетная модель, в которую были введены все основные элементы тракта. Вакуумная система инжектора быстрых атомов моделировалась как прямоугольная камера, которая разделена на две равные половины перегородкой с диафрагмой, и интегрированными в нее (камеру) приемниками ионов, источником ионов и нейтрализатором, криопанелями,

размещенными попарно в каждой секции камеры, поворотным магнитом и калориметром. На рисунке 4.2 приведена расчетная модель вакуумной системы инжектора.

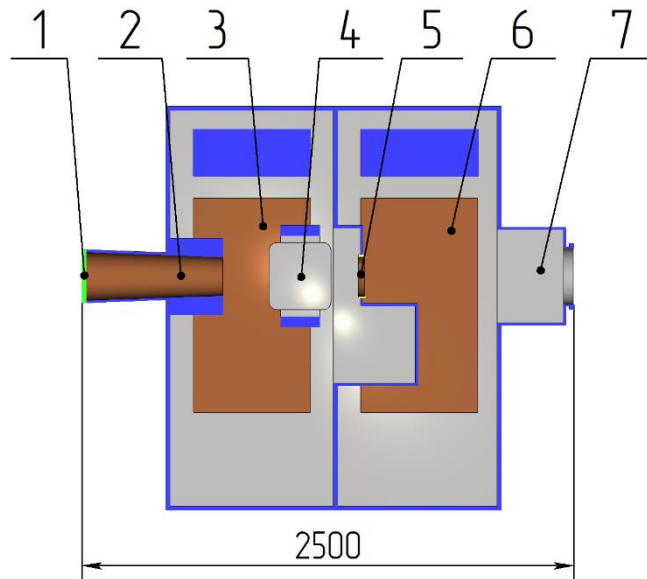


Рисунок 4.2 – Расчетная модель вакуумной системы инжектора атомов: 1 – источник ионов, 2 – нейтрализатор, 3, 6 – откачные панели крионасосов, 4 – поворотный магнит, 5 – диафрагма, 7 – вакуумная камера калориметра

Моделирование проводилось при помощи метода пробных частиц в программе CreatVac, разработанной в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН [73]. Данная программа позволяет рассматривать свободное движение частиц, имеющих начальную скорость и начальное расположение на источнике, заданные генератором случайных чисел. При попадании на стенки камеры генерируется новая траектория с направлением, вероятность которого пропорциональна косинусу угла к нормали к этой поверхности. В случае, если поверхность имеет коэффициент сорбции, отличный от нуля, частица может поглотиться этой поверхностью. С помощью данного кода было рассчитано давление на оси пучка и вычислена толщина газовой мишени.

Для обеспечения 45 А тока ионного пучка из источника ионов необходим поток молекул  $D_2 \sim 20$  л·Торр/с. Проводимость конического нейтрализатора, с входным диаметром  $D_1=25$  см, выходным диаметром  $D_2=20$  см и длиной  $L=70$  см, равна

$$G = 315 * \frac{2 \cdot D_1^2 \cdot D_2^2}{(D_1 + D_2) \cdot L} = 5000 \text{ л/с.}$$

Давление дейтерия на входе нейтрализатора составляет  $Q/G = 4 \cdot 10^{-3}$  Торр. Среднее давление в нейтрализаторе составляет около  $2 \cdot 10^{-3}$  Торр, что соответствует плотности дейтерия  $0,64 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> при температуре 300 К. Принимая сечение захвата дейтроном электрона  $\sigma = 7,5 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>, что соответствует сечению захвата протоном электрона с энергией 15 кэВ,

толщина мишени составит  $\sigma_{nl}=3,36$ . Это значение является достаточным, чтобы обеспечить эффективную нейтрализацию дейтериевого пучка с энергией 30 кэВ, и поэтому дополнительный напуск газа в канал нейтрализации не требуется.

Из расчетов следует, что давление перед диафрагмой равно  $3,6 \cdot 10^{-4}$  Торр при расходе газа 20 л·Торр/с. Расход газа через диафрагму составляет 1,8 л·Торр/с, а давление за диафрагмой равно  $1,2 \cdot 10^{-5}$  Торр. Потери мощности из-за реионизации нейтрального пучка можно оценить, как 2% и 0,3% для объемов до и за диафрагмой соответственно.

С помощью кода, CreatVac [73] было рассчитано стационарное давление в вакуумной камере инжектора (за поворотным магнитом), которое равно  $\sim 3 \cdot 10^{-5}$  Торр (рисунок 4.3).

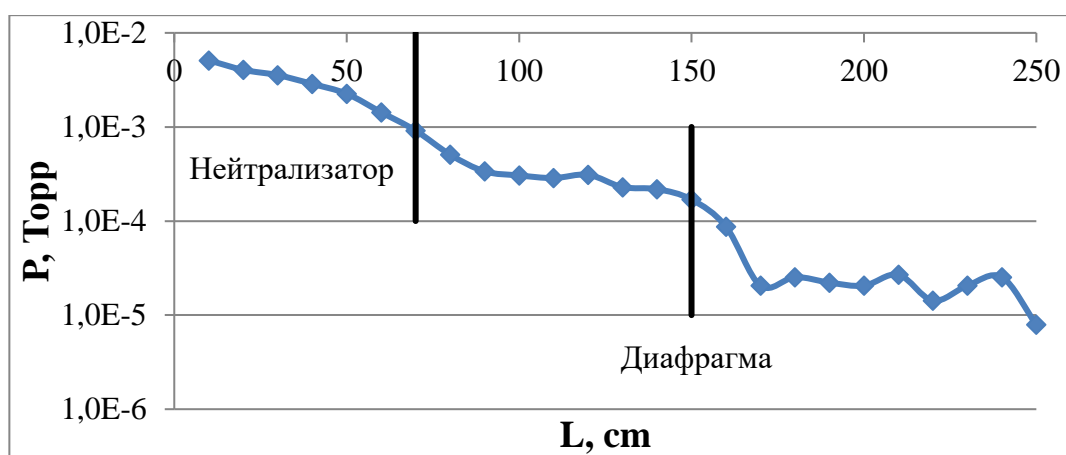


Рисунок 4.3 – Давление газа в пучковом тракте инжектора быстрых атомов

Плотность частиц в этой зоне тракта  $n \approx 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Сечение перезарядки составляет  $\sim 1,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ . Таким образом, можно оценить общие ионизационные потери пучка атомов на длине 160 см как  $n\sigma_{i1}l \approx 2,5 \cdot 10^{-2}$ , или 2,5%. Расчетное давление на выходе из пучкового тракта инжектора на расстоянии 250 см от ИОС равно  $\sim 3,7 \cdot 10^{-6}$  Торр. Расчетный поток газа из инжектора оценивается величиной  $\sim 0,2 \text{ л} \cdot \text{Торр/с}$ .

#### 4.1.2 Конструкция канала перезарядки

Канал перезарядки первичного ионного пучка имеет протяженность 700 мм. Для минимизации осевого размера инжектора была принята конструкция составного канала нейтрализации. Это решение позволило получить компоновку, при которой стало возможным длинную часть нейтрализатора максимально вдвинуть внутрь вакуумной камеры, тем самым сократив осевой размер инжектора. В разрыве между частями канала был установлен шибер



из магнитной стали, для снижения влияние магнитного поля на процесс перезарядки. Общий вид канала перезарядки с элементами подвеса приведен на рисунке 4.4.

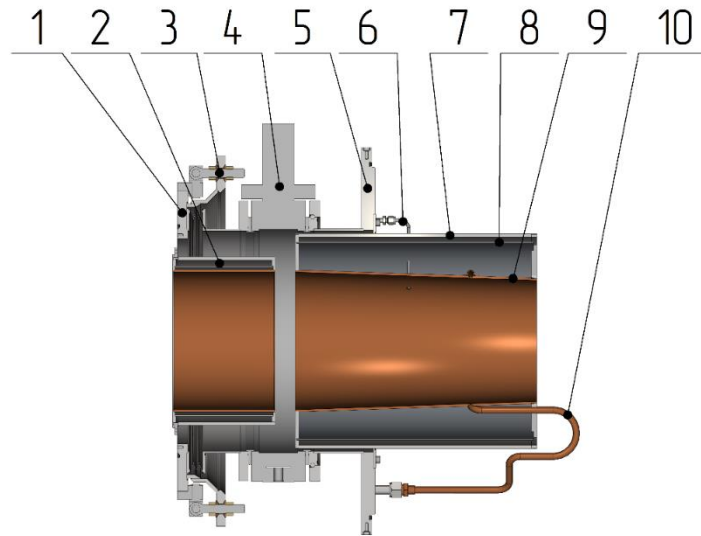


Рисунок 4.4 – Канал перезарядки (нейтрализатор). Основные элементы: 1 – фланец изоляторного узла, 2 – короткая часть канала перезарядки, 3 – узел подвеса, 4 – шиббер, 5 – опорный фланец, 6 – трубка напуска мишенного газа, 7 – наружный магнитный экран, 8 – пермалловый экран, 9 – тепловой экран, 10 – трубка охлаждения

Каждая из частей канала перезарядки представляет собой внутренний медный трубопровод, формирующий его внутренний объем, защищенный магнитным экраном. В короткой части внутренний трубопровод имеет цилиндрическую форму. Длинная часть нейтрализатора имеет коническую форму. Такая форма позволяет снизить поток газа из источника ионов в вакуумную камеру за счет снижения газовой проводимости. Толщина внутренних медных трубопроводов составляет 5 мм.

Для увеличения эффективности экранирования внутреннего объема канала перезарядки применены двухслойные магнитные экраны. Эффективность экранирования двухслойного цилиндрического экрана, имеющего отношение толщины к радиусу  $\frac{d_i}{r_1} \ll 1$ , для каждого из цилиндров, определяется как [74]:

$$\mathcal{E}_{12} = 1 + \frac{1}{2}\mu_1 \cdot \frac{d_1}{r_1} + \frac{1}{2}\mu_2 \frac{d_2}{r_2} + \frac{1}{4} \frac{\mu_1 \mu_2 d_1 d_2}{r_1 r_2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2}\right),$$

где  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – относительные магнитные проницаемости материалов экранов,  $d_1$  и  $d_2$  – толщины экранов,  $r_1$  и  $r_2$  соответственно их внутренние радиусы. Внутренний цилиндр экрана изготовлен из пермаллоя толщиной 2 мм и имеет внутренний радиус 0,18 м. Его относительная магнитная проницаемость равна 20000 единиц. Наружный цилиндр экрана изготовлен из углеродистой стали марки 10 толщиной 6 мм. Он имеет внутренний радиус 0,19 м и относительную магнитную

проницаемость материала 1000 ед. Подставляя значения в формулу для эффективности экранирования двухслойного экрана, получим значение  $\mathcal{E}_{12} \approx 830$  раз. Напомним, что эффективностью экранирования является отношение действующих значений напряженности магнитного поля в данной точке при отсутствии экрана к напряженности магнитного поля в той же точке при наличии экрана. При внешнем магнитном поле 500 Гс двухслойный экран обеспечивает снижение поля до величины  $\sim 0,6$  Гс.

На рисунке 4.5 приведены результаты расчета магнитного поля в нейтрализаторе, защищенного двухслойным экраном, выполненного с помощью кода COMSOL [72]. Минимальное расчетное значение поля составило 3 Гс. Эта величина хоть и отличается от значений аналитической в 5 раз в большую сторону, но не оказывает существенного увеличения разброса по поперечным скоростям образующихся нейтральных частиц, поскольку величина ларморовского радиуса, для поля с таким значением магнитной индукции, более 80 метров.

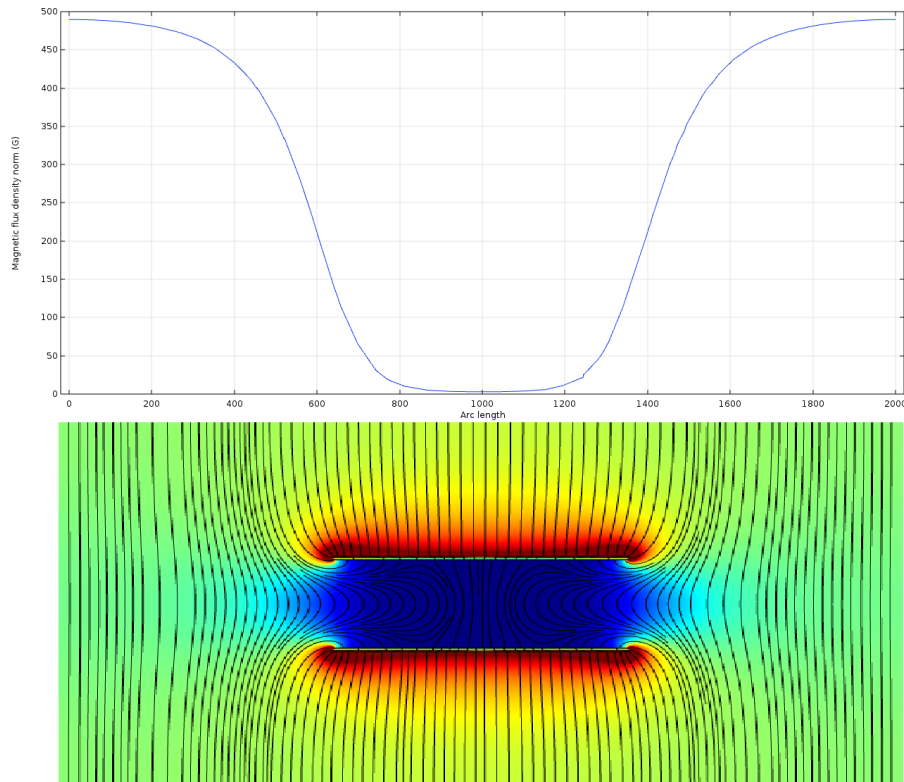


Рисунок 4.5 – Магнитное поле внутри нейтрализатора, защищенного магнитным экраном

Конический трубопровод, в длинной части канала перезарядки, имеет навитую трубку охлаждения, через которую прокачивается вода. Обе части перезарядного канала максимально придвинуты друг к другу на расстояние, которое позволяет проходить затвору шибера. Полная длина зазора между частями канала составляет около 50 мм. Напомним, что суммарная протяженность канала перезарядки равна 700 мм. Короткая часть нейтрализатора имеет протяженность 200 мм и внутренний диаметр цилиндра 250 мм. Длинная часть канала

перезарядки представляет усеченный конус высотой 450 мм с основаниями 250 мм, в его начале, и 200 мм в конце. Для дополнительного напуска мишенного газа, в длинной части канала перезарядки предусмотрена трубка, оснащенная клапаном, по которой осуществляется подача атомарного газа (дейтерий, водород), формирующего перезарядную мишень. Газ подается через отверстие, которое расположено на расстоянии 425 мм от начала канала перезарядки. Длинная часть нейтрализатора крепится к фланцу диаметром 630 мм. На этом фланце расположены патрубок для соединения с шибером DN400 HVA и разъемы для подключения водяного охлаждения и напуска газа.

#### **4.2 Система сепарации атомарного пучка**

После прохождения через нейтрализатор, первичный ионный пучок имеет в составе различные зарядовые и массовые фракции. В таком пучке наряду с нейтралами содержатся три сорта положительных ионов и отрицательно заряженные частицы. Система сепарации атомарного пучка позволяет отделить атомарный пучок от ионных примесей и утилизировать их. Системы сепарации пучка состоит из отклоняющего магнита и приемников отклоненных пучков. В конструкцию системы интегрирована диафрагма, которая позволяет придать пучку требуемую форму и снизить поток газа во вторую половину вакуумной камеры. Выведение остаточных ионов из пучка осуществляется путем воздействия на них магнитного поля, которое создается поворотным магнитом. Отклоняющий (поворотный) магнит, направляет ионы в места расположения приемников и обеспечивает некоторую дефокусировку их потоков, что позволяет снизить плотность мощности на принимающих пластинах. Частицы, покинувшие пучок, поглощаются приемниками. Общий вид системы сепарации приведен на рисунке 4.6.

Конструирование системы сепарации требует комплексного подхода. Необходимым является не только разработка элементов системы с требуемыми параметрами и их согласование между собой, но и правильное расположение их в пучковом тракте инжектора. Элементы системы сепарации должны быть расположены в вакуумной камере таким образом, чтобы исключить их неблагоприятное влияние на элементы других систем. Например, поверхности приемников, подверженные значительному нагреву, не должны облучать элементы крионасосов, которые находятся при криогенных температурах; магнитное поле магнита не должно оказывать влияния на процесс перезарядки ионов. В отличие от приемников ионов магнит является более сложным устройством и на стадии проектирования его конструкция претерпевает большее количество вносимых изменений. Поэтому, после каждого изменения в конструкции, необходимо проводить численное моделирование прохождения пучка через магнит, оценивать,

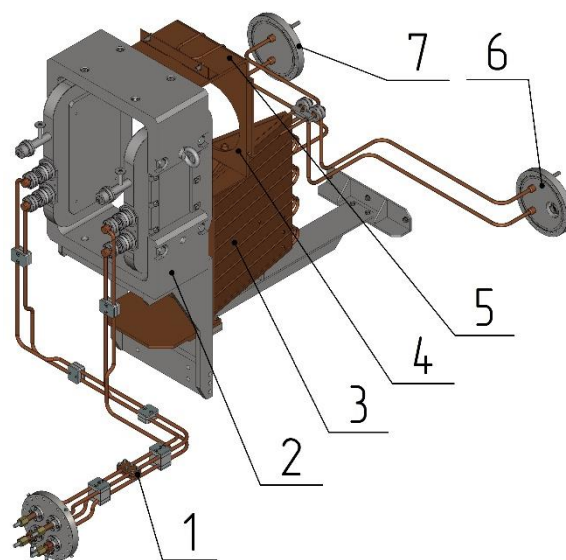


Рисунок 4.6 – Система сепарации атомарного пучка: 1 – система питания поворотного магнита, 2 – поворотный магнит, 3 – приемник положительных ионов, 4 – диафрагма, 5 – приемник отрицательных ионов, 6 – фланец вводов диафрагмы, 7 – фланец вводов приемника положительных ионов

как это повлияло на траектории частиц и вносить соответствующие правки в конструкции приемников. Геометрические размеры и параметры магнита определяют траектории выводимых из пучка частиц и плотность мощности, которую они создают, что в свою очередь определяет конструктивные особенности приемников и их положение.

Элементы рассматриваемой системы сепарации расположены в обеих половинах вакуумной камеры. Поворотный магнит устанавливали на перегородке в первой половине вакуумной камеры и связан выводами на передней стенке по которым подводятся электрическое питание и вода. Приемники с диафрагмой расположены во второй половине вакуумного объема. Подвод к ним охлаждающей жидкости (воды) осуществляется с задней стенки вакуумной камеры.

#### 4.2.1 Поворотный магнит

Поворотный магнит является обязательным элементом пучкового тракта инжектора. Его назначение заключается в создании магнитного поля, при взаимодействии с которым заряженные частицы отклоняются от первоначального направления движения, заданного ионно-оптической системой и покидают пучок. Если направление магнитной индукции перпендикулярно вектору скорости движения заряженной частицы, то траекторией ее движения является окружность. Радиус этой окружности зависит от импульса частицы, ее заряда, величины магнитного поля и определяется как:

$$r = \frac{mV}{qB}.$$

Исходя из этого, можно подобрать значение магнитной индукции и ширины полюсов поворотного магнита таким образом, чтобы получить нужное направление движения заряженных частиц, выводимых из пучка. Радиус поворота частицы выбирается из конструктивных соображений. Поскольку после перезарядного канала в пучке, кроме нейтралов, содержатся положительные ионы с энергиями  $E_0$ ,  $E_0/2$ ,  $E_0/3$  и фракция отрицательных частиц, то при расчете магнита приходится учитывать направления движений всех частиц одновременно. Каждой фракции соответствует свой радиус траектории и направление движения после выхода из магнита. Для определения предварительных размеров магнита и требуемой магнитной индукции, за основу был принят радиус частиц с полной энергией. Для определения разлета остальных частиц проводилось численное моделирование прохождения пучка через магнит.

В пучковом тракте система сепарации располагается между откачными панелями криогенных насосов, поэтому единственно возможным является отклонение частиц в вертикальной плоскости. Так как отклоняемые частицы представлены четырьмя видами, каждый из которых обладает своей энергией, их вылет из поворотного магнита происходит в большом диапазоне углов. В этом случае оптимальной будет двухполюсная схема поворотного магнита. Подобная конфигурация позволяет использовать свободное пространство вблизи магнитопроводов для размещения элементов приемников. Конструкция магнита представляет собой диполь с замкнутым магнитопроводом. Он содержит расположенные симметрично относительно медианной плоскости полюсные наконечники, на которых размещены обмотки (катушки) возбуждения, охваченные магнитопроводами. Соединенные винтами полюсные наконечники и магнитопроводы образуют замкнутую магнитную систему. Вертикальный размер апертуры магнита составляет 380 мм, горизонтальный – 250 мм, при эффективной длине магнита 200 мм.

После определения предварительных размеров магнита и его основных параметров ( $B$ ,  $r$ ) необходимо рассчитать напряженность магнитного поля и требуемых для ее создания токовых обмоток и постоянных магнитов. Магнитная индукция и напряженность магнитного поля связаны зависимостью  $B = \mu\mu_0 H$ , где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды,  $\mu_0$  – магнитная постоянная. Для создания требуемой напряженности магнитного поля необходимо использовать уравнение Максвелла в интегральной форме с учетом наличия ярма (катушка имеет число витков  $\omega$  с током  $I$ ):

$$\oint H dl = I \omega.$$

Количество витков катушки и пропускаемый по ней ток являются определяющими параметрами. При выборе этих величин необходимо добиться оптимума по току в обмотке и числу ее витков. Большие значения тока ведут к ухудшению эксплуатационных свойств и снижению надежности, за счет больших тепловыделений во время работы. Это существенно усложняет системы электрического питания и охлаждения катушки. При увеличении количества витков катушки возникают технологические трудности и растут габаритные размеры устройства.

Не менее важной является задача по получению обмоточных данных, в числе которых диаметр проводника  $d$ , число витков катушки  $\omega$  и сопротивление обмотки  $R$ , которые при заданном токе обеспечивают необходимую намагничивающую силу. Величина намагничивающей силы, которую можно получить при заданном режиме работы и допустимой температуре нагрева, зависит от того, насколько эффективно используется объем катушки, то есть насколько он заполнен материалом – обмоточным проводником. Эффективность использования пространства, занимаемого катушкой, оценивается с помощью коэффициента заполнения. Коэффициентом заполнения катушки  $f_k$  называется отношение площади сечения суммарного пространства, занимаемого проводником катушки и относительными размерами ее наружной изоляции, ко всей площади окна катушки. Столь же значимым параметром оценки эффективности заполнения катушки является коэффициент укладки  $f_y$ , который учитывает плотность укладки обмотки в процессе ее намотки и представляет собой отношение места, теоретически занимаемого витками при идеальной рядовой намотке, к месту, требующемуся для укладки такого же количества витков. При этом температура обмотки не должна превышать допустимую для нее температуру нагрева. Для обмотки с пропиткой компаундом, которую имеют катушки магнита эта величина составляет – 90 °С.

Высота полюса магнита определяет область, где будет размещена обмотка с изоляцией – окно катушки. В принятой конструктивной схеме магнита нужное число витков набиралось за счет увеличения числа слоев. При выбранной схеме намотки и требуемой изоляции в окно катушки удалось уложить 30 витков. При этом коэффициент заполнения катушки составил  $f_k = 0,31$ . Столь низкое значение этого параметра намотки связано с низкой плотностью укладки проводника. Коэффициент укладки проводника для при такой плотности составил  $f_y = 0,62$ .

Для создания требуемой величины напряженности магнитного поля необходимо обеспечить значение магнитодвижущей силы 14000 А\*витков. На практике следует иметь некоторый запас по ампер-виткам сверх расчетного значения в 5–10%. Также стоит учесть, что максимальная энергия частиц инжектора – 35 кэВ, поэтому следует иметь запас по магнитной индукции в 10%. С учетом этих обстоятельств требуемое значение магнитодвижущей силы составило 16000 А\*витков. Эта величина будет распределена между двумя катушками. Обмотки катушек магнита работают при постоянном токе и включаются последовательно. Обмотка

с 30 витками из медной трубки диаметром 6 мм, состоит из двух секций. При полученных размерах полюсов магнита суммарная протяженность обмоток составила 75,2 метра, а расчетный ток в них – 267 А. Мощность, выделяющаяся в обмотках катушек, равна 5774,4 Вт. При массе проводника обмотки 10,5 кг нагрев за импульс 6 с составляет ~9 градусов. В расчете нагрева обмотки взят полный импульс, который включает в себя включение за 2 с до пучка, импульс пучка 2 с, затухание 2 с.

Для проверки выбора схемы магнита и обмоточных данных катушек использовался код COMSOL [72]. Для расчета была использована модель, построенная по размерам, полученным в предварительных оценках. На полюсах магнита моделировались катушки с числом витков и током, которые были получены по результатам расчетов. Результаты расчетов приведены на рисунках 4.7-4.9.

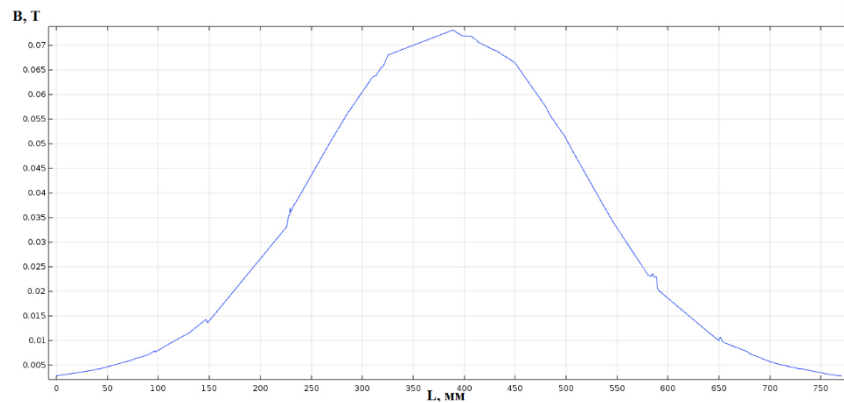


Рисунок 4.7 – Распределение поля в зазоре магнита

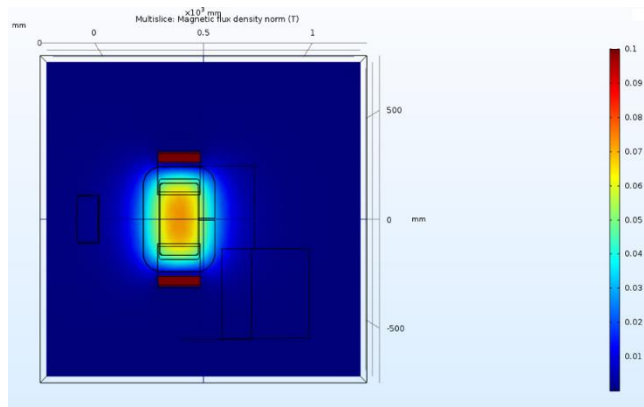


Рисунок 4.8 – Поле в центральном сечении магнита

Поворотный магнит располагается в вакуумной камере инжектора. Это накладывает на элементы его конструкции требования, которые предъявляются к элементам вакуумных систем. Поверхности, обращенные в вакуум, должны иметь требуемую чистоту поверхности и быть обезгажены. Общий вид магнита приведен на рисунке 4.10.

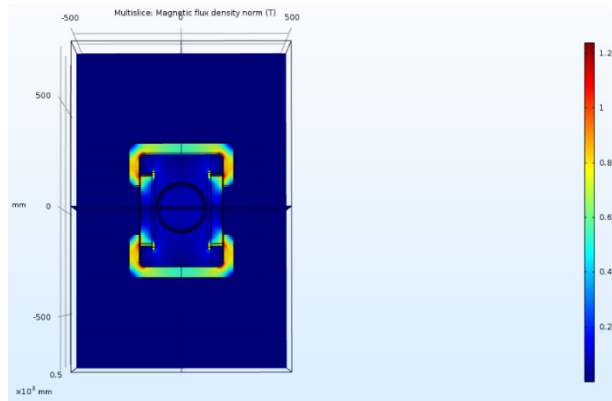


Рисунок 4.9 – Поле в магнитопроводе

Наиболее трудоемкими и сложными в создании являются катушки. При незначительных затратах времени на определение электрических параметров и обмоточных данных катушек, на их изготовление затрачивается около 80% всего производственного времени.

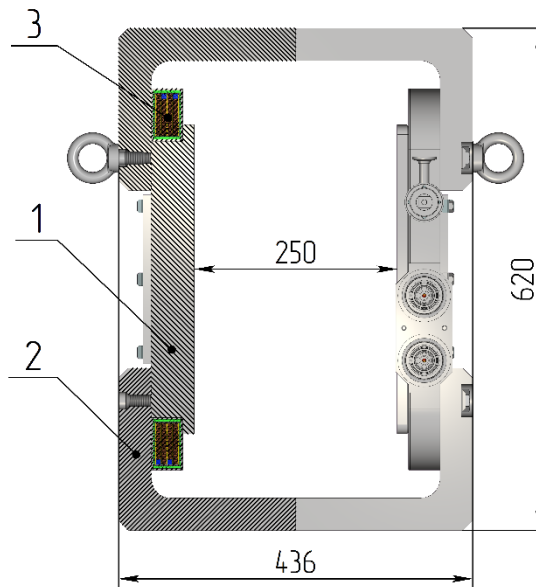


Рисунок 4.10 – Поворотный магнит. Основные элементы: 1 – полюс, 2 – магнитопровод, 3 – катушка

Важным требованием для катушек магнита является расположение выводов обмотки на одном торце. Это позволяет упростить коммутацию обмоток, облегчить сборку и подключение магнита к системам электропитания и водоснабжения. Для этого необходимо начинать намотку катушки с центральной части нижнего слоя. Поскольку обмотка набирается за счет слоев, то при намотке цельным проводником это неизбежно приведет к большому количеству межслойных переходов. Чтобы избежать этого, реализована сборная конструкция из двух секций. Данный способ позволяет получить обмотку требуемой геометрии с минимальным количеством переходов. Каждая секция представляет собой обмотку, которая



состоит из двух рядов и восьми слоев. Секции соединяются между собой муфтой при помощи вакуумной пайки. Схема пайки секций приведена на рисунке 4.11.

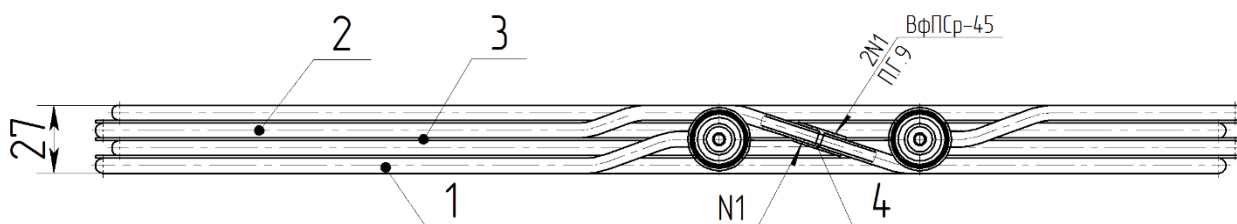


Рисунок 4.11 – Пайка секций: 1, 2 – секции, 3 – промежуточная пластина, 4 – муфта

Данная конструкция имеет преимущество с технологической точки зрения – при намотке проводника и не требует сложной технологической оснастки. После пайки секций к концам получившейся обмотки припаивались наконечники из нержавеющей стали. При помощи наконечников катушки подключаются к электропитанию и водоснабжению. Общий вид обмотки без изоляции приведен на рисунке 4.12.

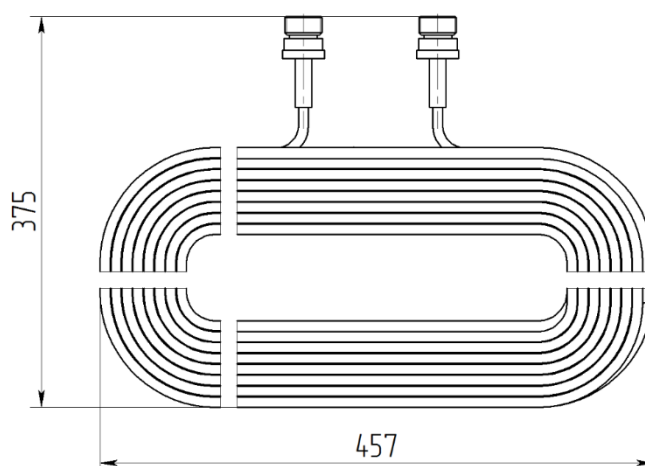


Рисунок 4.12 – Обмотка катушки в сборе

После сборки обмотка проводилась гидравлические испытания, в ходе которых проверялась ее герметичность. Для этого она подключалась к водяной системе в которой поднималось давление до 10 атм. и выдерживалось в течение 10 минут. Скорость подъема давления воды в системе была равна 2 атм./мин. Здесь же был проверен расчетный расход воды через трубку и сравнен с расчетным (50 г/с).

После гидравлических испытаний обмотки приступали к ее изоляции. Межслоевая и межвитковая изоляции укладывались таким образом, что для каждого витка катушки формировался отдельный изоляционный короб. В качестве изолирующих элементов использовались пластины из стеклотекстолита. Пустоты, которые образовывались в результате

межслоевых переходов обмотки, заполнялись специальными стеклотекстолитовыми вставками, формы которых максимально соответствовала формам пустот. После укладки обмотки в изоляцию и заполнения технологических пустот, на полученную конструкцию накладывался бандаж. Бандажирование выполнялось стеклолентой в три слоя с перекрытием на полширины ленты. Вводы катушка обкладывались специальными изолирующими элементами и также бандажировались. На вводы накручивались специальные пробки, для защиты водяного канала от попадания загрязнений и катушка передавалась на участок пропитки.

Качество пропитки катушки определяет ее электрическую прочность. Пропитка катушки производилась в специальном автоклаве по методу “Монолит”, который состоит из следующей последовательности.

Катушку помещали в резиновый мешок автоклава и откачивали на вакуум. После удаления всех воздушных пузырей из полости откачки, туда, подавали эпоксидный компаунд горячего отверждения, который имел температуру 120 °С. Подача компаунда вели до полного заполнения полости. После этого мешок с обмоткой помещали в резервуар с горячей водой и начинали поднимать давление до 40 атм. Время воздействия избыточного давления составляло 2–3 минуты, после чего давление сбрасывали, но высокую температуру продолжали поддерживать. После минутной паузы давление опять увеличивали до верхнего значения, выдерживали интервал и снова сбрасывали. Таким образом повторялось до трех – пяти циклов. Количество циклов определяется конструктивными особенностями катушки. Подобное циклическое воздействие давления необходимо для того чтобы максимально заполнить эпоксидным компаундом все пустоты. После завершения пропитки катушка подвергалась механической обработке. Здесь получали все необходимые размеры для ее укладки в металлический короб. Вид сечения катушки после пропитки и механической обработки приведен на рисунке 4.13.

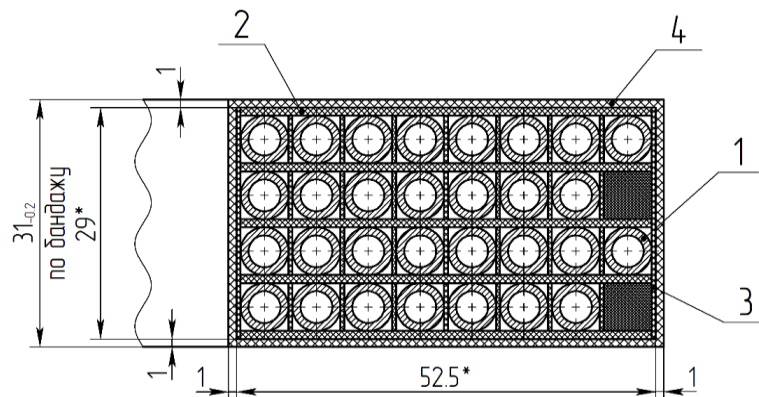


Рисунок 4.13 – Сечение катушки после пропитки и механической обработки: 1 – обмотка, 2 – пластина верхняя, 3 – пластина боковая, 4 – бандаж из стеклоленты

Стоит отметить, что после завершения пропитки катушка снова проходила электрические и гидравлические испытания. Электроиспытания обеспечивают проверку катушки на отсутствие межвитковых замыканий путем подачи 0,35 В на каждый виток. Эту проверку необходимо выполнять до и после пропитки.

Последним этапом изготовления катушки является ее заделка в вакуумно-плотном корпусе. Корпус катушки – это сварная пластинчатая конструкция из стали марки 12Х18Н10Т. Корпус оснащен сильфонными компенсаторами и клапаном. Компенсаторы обеспечивают поглощение деформаций, возникающих при тепловом расширении обмотки. Клапан предназначен для откачки корпуса на вакуум. Катушка готовая к установке на магнит приведена рисунке 4.14.

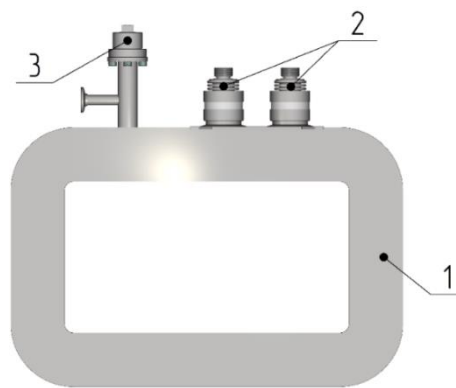


Рисунок 4.14 – Катушка в сборе: 1 – катушка в корпусе из нержавеющей стали, 2 – выводы катушки с сильфонными компенсаторами, 3 – клапан откачки

Питание катушки осуществляется через специальную систему вводов, обеспечивающих подвод электрического питания и охлаждающей жидкости одновременно. Их соединение обеспечивается фланцевым соединением. Уплотнение (герметизация) границы раздела сред вода – вакуум осуществляется при помощи уплотнителя из вакуумной резины. Подключение поворотного магнита к системе питания показано на рисунке 4.15.

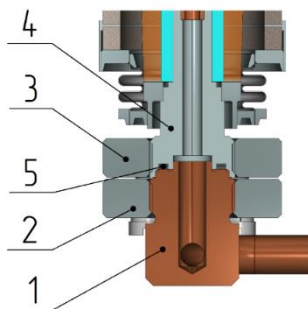


Рисунок 4.15 – Подключение магнита к системе питания: 1 – ввод, 2 – фланец ввода, 3 – фланец наконечника катушки, 4 – наконечник, 5 – уплотнитель

Элементы магнитной системы поворотного магнита изготовлены из электротехнической стали общей массой 147 кг. Обмотки катушек магнита выполнены из медной трубки для возможности снятия тепловой нагрузки дистиллятом. Габаритные размеры магнита 432 x 436 x 620 мм. Вес магнита составляет 176 кг.

На рисунке 4.16 приведена фотография поворотного магнита в вакуумной камере инжектора. В пучковом тракте поворотный магнит располагается сразу за нейтрализатором. Его удаленность от среза канала должна составлять не меньше, чем межполюсное расстояние магнита. Это позволяет исключить влияние поля магнита на процесс перезарядки ионов.

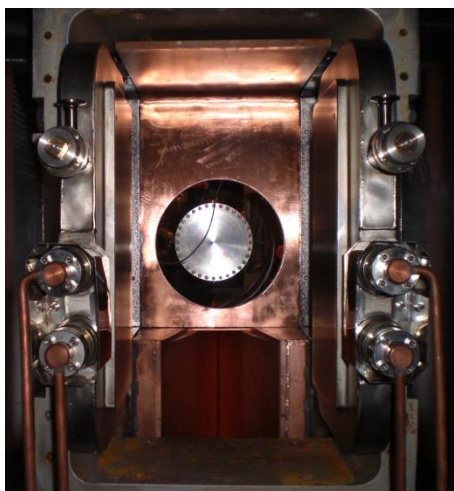


Рисунок 4.16 – Фотография поворотного магнита. Направление по ходу движения пучка. За магнитом видны диафрагма и приемники неперезарядившихся ионов

Непосредственная близость магнита к теплозащитным азотным экранам крионасоса, обязывает поддерживать постоянную циркуляцию охлаждающей жидкости в контуре охлаждения катушек. Чтобы избежать замерзания воды в каналах, необходимо прокачивать воду через катушки даже при отключенном электрическом питании магнита.

#### 4.2.2 Приемники неперезарядившихся ионов

В нейтрализаторе, при номинальной энергии 30 кэВ, около 16% ионов первичного пучка не перезаряжается в атомы. В составе этих частиц содержатся положительные ионы с энергиями  $E_0$ ,  $E_0/2$ ,  $E_0/3$  и фракция отрицательных частиц. Суммарная мощность ионных пучков, которую необходимо принять и отвести из вакуумной камеры, оценивается величиной в 216 кВт. Максимальную нагрузку на приемники оказывают частицы с полной энергией  $E_0$ . Компактность

конструкции инжектора не позволяет расположить поворотный магнит таким образом, чтобы добиться нужной дефокусировки частиц с полной энергией. Поэтому, падая на поверхность приемника, они хоть и образуют зоны с различными значениями плотности мощности, но максимум имеет достаточно высокое значение. Для получения более компактной и менее сложной конструкции, было решено отказаться от отдельных приемников для каждой фракции в пользу одного устройства, способного перехватить все пучки. Устройство состоит из двух составных частей – общего приемника положительных ионов и приемника отрицательных частиц, объединенного с диафрагмой, каждый из которых имеет свой контур охлаждения. Системы охлаждения приемников обеспечивают интенсивность теплообмена, необходимую для поддержания допустимого теплового состояния устройства при максимальном значении плотности мощности.

Для расчета системы охлаждения является необходимым определение наиболее теплонапряженных зон приемника ионов и определение плотности мощности в них. По результатам предварительных расчетов траекторий отклоненных частиц были определены габаритные размеры приемников и их расположение в вакуумной камере. По этим данным были созданы расчетные модели приемников ионов и добавлены в расчетную модель отклонения частиц магнитом. Повторный расчет позволил определить зоны падения фракций ионов на пластины приемника и значения плотностей мощностей в них. Результат приведен на рисунке 4.17. Цвет отпечатка соответствует энергии частиц, кэВ. Эти данные определили конструктивные особенности приемников – углы наклона приемных пластин по отношению к направлению падающих частиц и габаритные размеры, а также позволили уточнить требуемую интенсивность теплообмена.

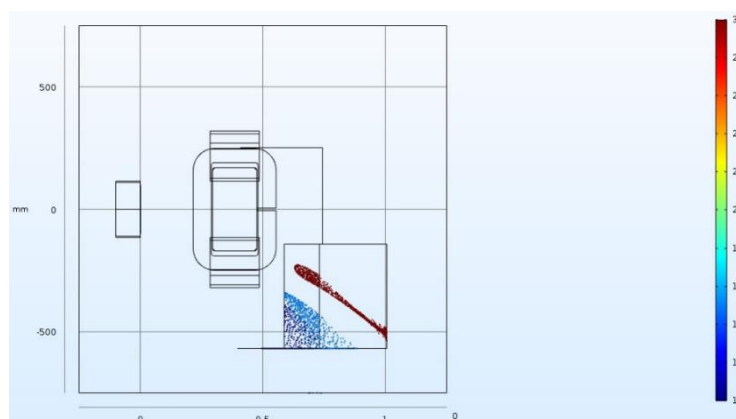


Рисунок 4.17 – Отпечатки фракций отклоненных ионов на приемнике

Предварительный расчет для фракции ионов с полной энергией показал, что, если принять профиль пучка на входе в магнит как гауссов (полуширина на уровне  $1/e$ ) шириной 74 мм, то

максимальная плотностью мощности составит  $3,26 \text{ кВт/см}^2$ . Обеспечение теплоотвода с поверхности приемников при столь высокой удельной тепловой нагрузке само по себе является весьма сложной задачей. Поэтому в данном случае плотности мощностей потоков, падающих на поверхности приемников, были снижены путем расположения поглощающих поверхностей под более острыми углами по отношению к набегающим потокам частиц. Для заданной геометрии приемные пластины были расположены таким образом, что при угле падения пучка в  $100^\circ$ , плотность мощности на пластинах, для фракции с энергией 30 кэВ, максимально составляла  $1,1 \text{ кВт/см}^2$ . Для отвода тепла приемные пластины имеют каналы, в которые впаяны трубки, по которым прокачивается охлаждающая жидкость. Такие же трубки охлаждения предусмотрены в приемнике отрицательных ионов и диафрагме. Приемник отрицательных ионов и диафрагма расположены на одной приемной пластине и имеют общую систему охлаждения. Приемник положительных ионов соединяется с диафрагмой и приемником отрицательных частиц при помощи пластин в единую сборку, общий вид которой приведен на рисунке 4.18.

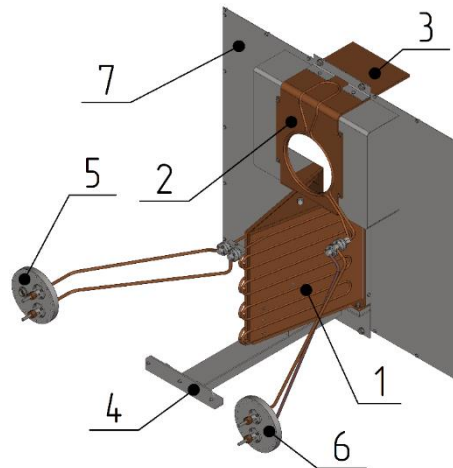


Рисунок 4.18 – Приемники ионов с диафрагмой: 1 – приемник положительных ионов, 2 – диафрагма, 3 – приемник отрицательных ионов, 4 – кронштейн, 5 – фланец вводов приемника положительных ионов, 6 – фланец вводов диафрагмы, 7 – крышка

Диафрагма необходима для того, чтобы придать пучку требуемые геометрические размеры. Она обрезает пучок в размер 220 мм и снижает поток сопутствующего газа во вторую половину вакуумной камеры.

Приемник положительных ионов имеет форму раструба, который принимает частицы с энергиями  $E_0$  и  $E_0/2$ . Частицы с энергиями  $E_0/3$  принимаются дном приемника. Фотографии приемников ионов и диафрагмы приведены на рисунке 4.19.



Рисунок 4.19 – Приемники ионов и диафрагма в вакуумной камере инжектора: Слева – вид со стороны поворотного магнита (по ходу пучка), справа – со стороны калориметра (обратное направление)

Суммарная масса всех принимающих элементов около 120 кг. Питание охлаждающей жидкостью приемников и диафрагмы осуществляется с задней стенки вакуумной камеры. Способ подключения к системе водоснабжения аналогичен подключению поворотного магнита.

## Глава 5 Калориметр

### 5.1 Общие сведения

Калориметр является одним из наиболее сложных элементов пучкового тракта инжектора быстрых атомов. Он служит для поглощения мощности пучка в режиме автономной работы – без инъекции в плазму [75-80]. При работе в таком режиме осуществляется высоковольтная тренировка ИОС ионного источника, измеряется мощность пучка, определяются его профиль и пространственное положение относительно оси пучкового тракта. Таким образом, значительная часть выстрелов инжектора производится в калориметр. Если устройство способно поглощать пучок номинальной мощности за импульс полной длительности, то оно считается полномасштабным. За длительный период развития атомарной инъекции было изготовлено достаточное количество приемников, чтобы их начали разделять по тем или иным характерным особенностям. Например, по способу размещения калориметры делятся на те, которые располагаются внутри вакуумного объема инжектора или имеют собственную вакуумную камеру. По способу перемещения в рабочее положение приемного устройства, калориметры бывают раздвижными, поворотными (поворот вокруг фиксированной оси), погружными, неподвижными, которые при необходимости устанавливаются в пучковом тракте, а затем по мере необходимости демонтируются.

Приемная часть калориметра, как правило, выполнена в виде системы трубопроводов или пластин, внутри которых находятся каналы охлаждения. В качестве теплоносителя, для охлаждения приемных элементов калориметра, в большинстве конструкций, используется вода, хотя не исключается применение других жидкостей или газов.

С ростом мощностей инжектируемых пучков быстрых атомов растут и требования к калориметрам. При увеличении мощности инъекции возрастает один из важнейших параметров, который определяет конструкцию калориметра – плотность мощности на приемных элементах. В современных инъекционных системах она достигает значения десятков кВт/см<sup>2</sup>. Не менее важным показателем режима работы калориметра является интенсивность теплообмена между приемными элементами и охлаждающей жидкостью, которая характеризуется коэффициентом теплоотдачи. Этот параметр является функцией нескольких переменных и сильно зависит от динамических характеристик теплоносителя, которые определяются архитектурой водяной магистрали. Главной задачей по увеличению энергоэффективности приемных устройств калориметров является интенсификация теплообмена [81]. Среди многообразия способов воздействия на поток, с целью повышения интенсивности теплообмена,



широкое распространение получили пассивные методы интенсификации, которые подразумевают установку в каналах охлаждения различных устройств, изменяющих характеристики течения теплоносителя. Эффективным способом увеличения интенсивности теплообмена является введение в канал охлаждения специального элемента – интенсификатора теплообмена, приведенного на рисунке 5.1.

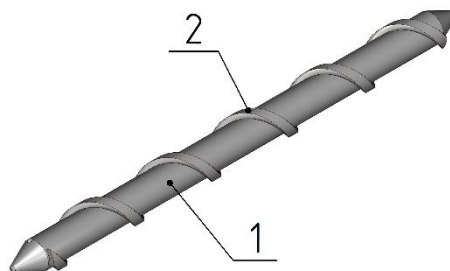


Рисунок 5.1 – Конструкция завихрителя (интенсификатора): 1 – стержень, 2 – навивка из проволоки

Установка этих деталей внутри канала, обеспечивает закручивание потока, направляя его по винтовой траектории. Воздействие на поток подобным образом, позволяет достигнуть значительного увеличения интенсивности теплообмена между стенкой канала и теплоносителем.

Длительность импульса инъекции в больших исследовательских установках достигает значений нескольких секунд и более, так что условия поглощения пучка калориметром, при столь продолжительных импульсах, близки к стационарным. Все эти факторы ведут к значительному нагреву принимающих элементов, которые нуждаются в интенсивном охлаждении. Поэтому, в процессе проектирования подобных устройств после того, как определены предварительные размеры элементов приемника, является важным создание промежуточных моделей и проверка их работоспособности. Это позволяет смоделировать условия реальной работы устройств близкие к реальным и воспроизвести процессы, протекающие в ходе их эксплуатации с учетом действующих нагрузок на элементы. По результатам моделирования выявляются неблагоприятные факторы и проводятся мероприятия по устранению или снижению их влияния. В конструкциях современных приемников, для увеличения интенсивности теплообмена, водяные магистрали приобретают настолько сложную архитектуру, что определение параметров течения теплоносителя в них, без специальных расчетных программ, не представляется возможным. По этой причине, особую важность в создании калориметров представляют расчеты движения теплоносителя в системе с учетом всех характерных особенностей водяного тракта. Эти виды расчетов позволяют определить не только динамические характеристики потока на всей протяженности магистрали, но и связанные с ним условия теплообмена в зоне интенсивного поглощения пучка приемным элементом. Необходимо смоделировать, а потом оптимизировать

течение теплоносителя таким образом, чтобы устранить как можно большее количество местных сопротивлений движению потока (резких скачков сечения, поворотов, закруток потока, зон обратного тока), что позволит избежать больших расходов теплоносителя и повышенных нагрузок на систему подачи. При этом важно обеспечить требуемую интенсивность теплообмена между приемным элементом и теплоносителем, которая исключает возможность возникновения местных локальных перегревов и, как следствие, срывов теплосъема и разрушения элементов приемного устройства калориметра.

Для рассматриваемого инжектора пучка с мощностью более 1 МВт и длительность импульса 2 с, разработан и изготовлен водоохлаждаемый калориметр [28]. В конструкции данного устройства раздвижной приемник пучка формируется вертикальными пластинами, в каналы которых введены интенсификаторы теплообмена. Установленные завихрители потока жидкости формируют кольцевые каналы, в которых возрастает интенсивность теплообмена за счет того, что появляется вращение потока. Коллекторы подачи и слива воды построены по схеме труба-в-трубе, что позволило добиться большей компактности и использовать их для ввода движения в вакуум. Благодаря принятым техническим решениям удалось достигнуть хорошей энергоэффективности устройства при сравнительно небольших габаритных размерах и массовом расходе теплоносителя. В этой главе будет представлена конструкция основных элементов калориметра, приведены результаты моделирования течения теплоносителя и теплообмена, а также некоторые экспериментальные данные.

## **5.2 Расчеты плотности мощности на приемных пластинах калориметра**

По мере удаления от ионно-оптической системы, сформированный ионный пучок, первоначально имевший плоскую форму, приобретает гауссов профиль. Как известно, в таких пучках плотность мощности имеет неравномерное распределение по сечению, а в частности убывает от центра к периферии. Поэтому, перед началом разработки калориметра, является необходимым расчет распределения плотности мощности по сечению пучка в нужных точках пучкового тракта. Это дает возможность численно оценить ожидаемую плотность мощности на приемных пластинах, определить предварительную конструктивную схему устройства и необходимый расход воды.

В начальном варианте расположение пластин приемного устройства калориметра было принято, как представлено на рисунке 5.2. Для тепловых расчетов калориметра необходимо определить плотность потока мощности пучка атомов по нормали к поверхности приемных пластин.

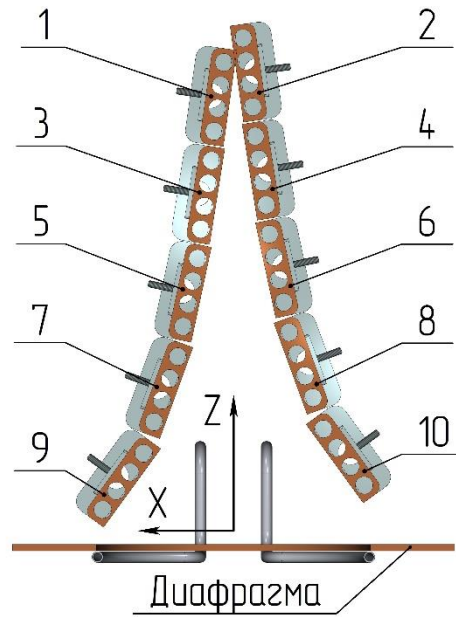


Рисунок 5.2 – Начальное расположение пластин приемника калориметра: пластины 1-10 расположены вертикально. В нижней части чертежа находится диафрагма калориметра. Нейтральный пучок распространяется вдоль оси  $z$ . Координатная плоскость  $x$ - $z$  горизонтальна в системе токамака, ось  $y$  направлена вертикально вверх. Показаны номера пластин калориметра

Для расчета распределения фокусные расстояния ионно-оптической системы инжектора и угловые расходимости поперек и вдоль щелевых отверстий были приняты в соответствие с результатами экспериментальных измерений ширины и высоты пучка на уровне  $1/e$  на двух расстояниях от ионно-оптической системы на инжекторном стенде в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН [41]. Полученные значения этих величин затем были проверены, путем проведения оптических измерений распределения температуры поверхности плоской вольфрамовой пластины в инжекционном тракте токамака TCV, нагреваемой нейтральным пучком. Мощность пучка атомов дейтерия, ускоренного ионно-оптической системой инжектора, после перезарядки ионного пучка составляет около 1,3 МВт. Ионно-оптическая система состоит из электродов, имеющих сферическую эмиссионную область диаметром 250 мм, которая заполнена щелевыми отверстиями. Фокусное расстояние и угловая расходимость поперек щели (по горизонтали в системе токамака):  $F_x = 376$  см,  $\alpha_x = 24,4$  мрад, а вдоль ячейки (по вертикали)  $F_y = 398$  см,  $\alpha_y = 10,3$  мрад.

Плотность потока мощности пучка имеет максимум на оси и с удалением от нее спадает. С помощью кода [82] рассчитывалась плотность мощности  $P(x, y, z)$  в заданной плоскости, перпендикулярной пучку, а также по нормали к пластинам калориметра. Распределение плотности мощности в пучке перед диафрагмой показано на рисунке 5.3. Максимальное значение плотности мощности непосредственно перед диафрагмой калориметра ( $z = 225,4$  см)

на оси пучка  $P_{\text{dia}} = 11,56 \text{ кВт/см}^2$ . Плотность мощности на пластине калориметра (задняя левая) в точке  $z = 225,4 + 44,0 = 269,4 \text{ см}$ ,  $x = 0,3 \text{ см}$ ,  $y = 0$ ,  $P_{\text{cal}} = 13,52 \text{ кВт/см}^2$ . Плотность мощности по нормали к поверхности пластины:  $P_{\text{normal}} = P_{\text{cal}} \cdot \sin\theta = 13,52 \cdot 0,14 = 1,88 \text{ кВт/см}^2$ .

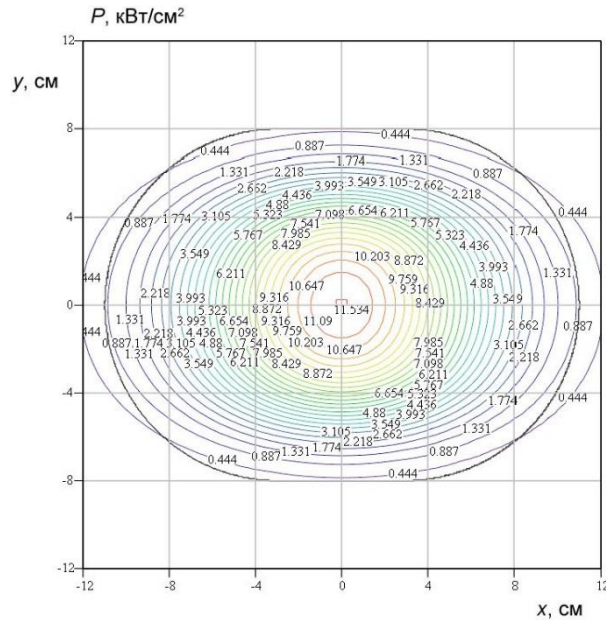


Рисунок 5.3 – Распределение плотности мощности в пучке перед диафрагмой

С учетом погрешности  $\pm 2\%$ , с которой известна начальная мощность нейтрального пучка, получаем оценку нормальной плотности мощности:  $P_{\text{normal}} = 1,88 \pm 0,04 \text{ кВт/см}^2$ . Аналогичным способом были определены плотности мощности для расчетных точек. Данные расчетов приведены в таблице 5.1.

Характерный размер, на котором изменяется плотность мощности пучка вдоль пластины, много больше толщины пластины, поэтому задачу теплопроводности в первом приближении можно считать одномерной, т.е. можно пренебречь потоком тепла вдоль пластины по сравнению с потоком от поверхности пластины к зоне охлаждения. Тогда температура на любой глубине внутри пластины калориметра определяется балансом между локальной плотностью мощности нагрева на поверхности пластины и потоком тепла к зоне, охлаждаемой жидкостью. Поэтому изменение температуры термпар  $\Delta T = T - T_0$  должно быть пропорционально локальной нормальной плотности мощности нейтрального пучка  $\Delta T \propto P_n$ .

На рисунке 5.4 показано распределение вычисленной нормальной плотности мощности в области расположения верхнего ряда термпар на каждой пластине калориметра. Следует учитывать, что не вся мощность пучка, падающая на пластину калориметра, полностью поглощается. Часть энергии исходных атомов дейтерия уносится ими из-за отражения атомов от пластины. Также энергия атомов пучка частично расходуется на распыление материала

пластины [83, 84]. Доля отраженной энергии и доля энергии на распыление материала зависят от массы и энергии налетающих частиц, от угла падения и от материала поверхности. В нашем

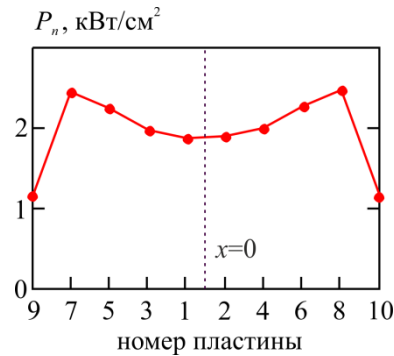


Рисунок 5.4 – Расчетная нормальная плотность мощности на пластинах (см. последнюю строку таблицы 5.1)

Таблица 5.1 – Координаты термопар калориметра\*

<i>Верхние термопары, y = +30 мм</i>										
Параметр	Левое крыло калориметра					Правое крыло калориметра				
Номер пластины	9	7	5	3	1	2	4	6	8	10
Номер термопары	05	06	07	08	10	20	18	17	16	15
Угол между пластиной и плоскостью y-z, град	36	20	12	9	8	8	9	12	20	36
Плотность мощности, кВт/см <sup>2</sup> (расчет)	1,97	7,17	10,82	12,67	13,50	13,56	12,74	10,90	7,23	1,99
Нормальная плотность мощности P <sub>n</sub> , кВт/см <sup>2</sup> (расчет)	1,16	2,45	2,25	1,98	1,88	1,89	1,99	2,27	2,47	1,17
<i>Нижние термопары, y = -30 мм</i>										
Параметр	Левое крыло калориметра					Правое крыло калориметра				
Номер пластины	9	7	5	3	1	2	4	6	8	10
Номер термопары	01	02	03	04	09	19	14	13	12	11
Угол между пластиной и плоскостью y-z, град	36	20	12	9	8	8	9	12	20	36
Плотность мощности, кВт/см <sup>2</sup> (расчет)	1,97	7,17	10,82	12,67	13,50	13,56	12,74	10,90	7,23	1,99
Нормальная плотность мощности P <sub>n</sub> , кВт/см <sup>2</sup> (расчет)	1,16	2,45	2,25	1,98	1,88	1,89	1,99	2,27	2,47	1,17
*Координата Z отсчитывается от диафрагмы на входе калориметра (z = 225,4 см от электродов ионно-оптической системы) в направлении распространения пучка, координата x отсчитывается от вертикальной плоскости симметрии пучка, координата y – расстояние от горизонтальной плоскости симметрии пучка и пластин калориметра: +30 мм и -30 мм.										

случае атомы дейтерия имеют энергию 27 кэВ, а угол падения атомов на пластины калориметра (угол от нормали к поверхности) составляет от 54° для крайних пластин до 82° для центральных пластин. Долю отраженной энергии можно оценить из численных расчетов по коду TRIM [83, 84]. Коэффициент отражения энергии (отношение средней энергии отраженных под любыми углами атомов к энергии исходных атомов) минимален при нормальном падении и монотонно растет с ростом угла падения. При фиксированном угле падения коэффициент отражения энергии атомов дейтерия от меди монотонно снижается с энергией в диапазоне

от 300 эВ до 160 кэВ. При падении пучка с энергией  $\sim 30$  кэВ под углом  $54^\circ$  к нормали (крайние пластины) отражается примерно 2% падающей энергии, а при падении под углом  $82^\circ$  (центральные пластины) отражается около 20% падающей энергии. Поэтому отражение энергии при больших углах падения может приводить к заметному отличию реальной нормальной плотности мощности от расчетной.

Другой канал потерь энергии состоит в распылении (англ. sputtering) материала пластины. Однако в случае легких атомов пучка энергия, уносимая распыленными атомами мишени, гораздо меньше энергии, уносимой отраженными атомами пучка. Из расчетных данных [83] для энергий атомов дейтерия до 10 кэВ следует, что выход атомов меди и уносимая ими энергия достигают максимума при энергии атомов дейтерия несколько кэВ и уменьшаются при дальнейшем росте энергии. Поэтому для оценки сверху можно взять энергию 3 кэВ. Хотя выход атомов меди, растущий с углом падения, составляет до 30% при углах падения около  $80^\circ$ , энергия, уносимая этими атомами, мала и не превышает 0,3% от падающей энергии. Поэтому потерями энергии на распыление меди с пластин калориметра можно пренебречь.

Итак, если для крайних пластин поглощенная мощность почти равна падающей мощности пучка, то для центральных пластин локальная поглощенная мощность может составлять менее 80% от падающей мощности при учете однократного отражения исходных частиц пучка. Для полного учета влияния этого эффекта на теплосъем необходимо рассматривать поглощение отраженных частиц соседними участками поверхности калориметра.

### 5.3 Теплогидравлические расчеты калориметра

В программный комплекс ANSYS интегрирован расчетный модуль Fluent, позволяющий решать задачи различных видов течений и теплообмена. Расчет течений дает возможность определения не только динамических характеристик теплоносителя в системе, но и позволяет устанавливать их особенности, характерные для конкретной архитектуры магистрали. Расчет сопряженного теплообмена позволяет моделирование процесса поглощения пучка пластиной, охлаждаемой водой. Одной из главных задач данного моделирование является оценка эффективности работы завихрителей, устанавливаемых в каналах пластины. Для этого в T-Flex CAD, были созданы твердотельные модели реальных теплообменников калориметра с различными завихрителями и импортированы для расчета во Fluent. Внутреннее пространство импортированной модели твердого тела, программой определяется как жидкость. Рассчитываемая модель сопряженного теплообмена содержит два домена – Solid (твердое тело) и Fluid (жидкость). Твердому телу назначаются нужный материал и зоны приложения тепловой

мощности, а для жидкости определяются вход и выход. На входе теплоносителя задаются параметры его течения – скорость или массовый расход. Стоит отметить, что в данном виде расчета нет возможности учесть мощность, уносимую отраженными частицами от поверхности приемника и мощность, затрачиваемую на распыление материала. Вся прикладываемая к поверхности мощность является поглощенной.

Расчет сопряженного теплообмена выполняется для единичного теплообменника, на том основании, что расчет поглощения пучка всем приемником требует создания сложных моделей и высокопроизводительной вычислительной техники. Чтобы задать динамические характеристики потока на входе в теплообменник, каждый из которых находится, примерно, в середине водяной магистрали, требуется рассчитать параметры по всей длине водяного тракта. Для этого выполняется гидродинамический расчет гидравлической системы калориметра протяженность которой определяется местами его подключения к системе водоснабжения. Модель внутреннего пространства системы, заполняемого жидкостью, также была создана и импортирована в расчетный модуль. Для нее были определены вход и выход жидкости. В качестве исходного расчетного параметра было принято давление потока на входе в систему, которое может обеспечить существующая в инфраструктуре токамака система водоснабжения. Величина давления составила 6 атм. Были найдены скорости движения потока во всех зонах, определен расход жидкости через систему, выявлены места обратного тока теплоносителя и закруток потока, а также застойные зоны.

По полученным данным были проведены возможные конструктивные улучшения магистрали – оптимизация. При давлении 6 атм. на входе в систему массовый расход жидкости составил 600 кг/мин. На рисунке 5.5 показаны рассчитанные скорости движения потока в векторной форме для всей магистрали. Средняя скорость жидкости на входе в приемную пластину ~ 7 м/с, скорость течения в винтовом канал, в среднем, ~ 12 м/с.

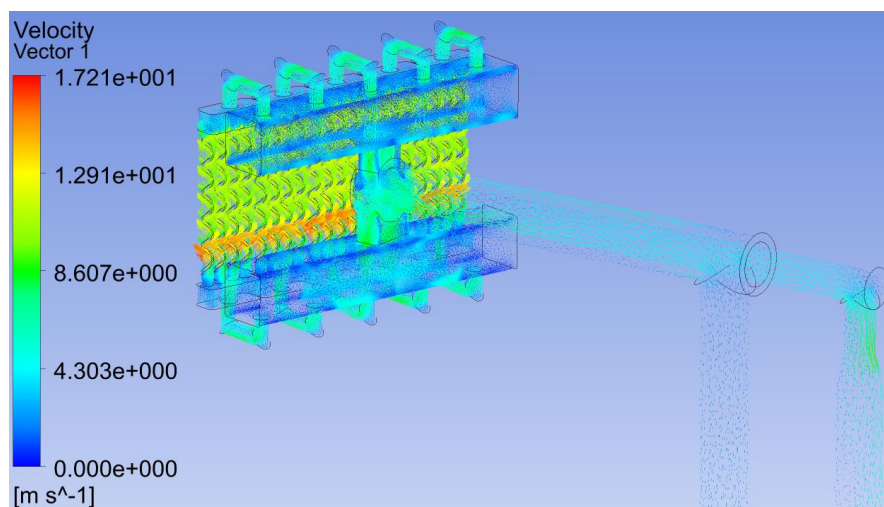


Рисунок 5.5 – Векторы скоростей потока жидкости в водяной магистрали калориметра

Падение давления воды в системе показано на рисунке 5.6. Шкала отображает избыточное давление относительно атмосферного. Давление воды на входе составляет 591 кПа (5,9 атм.), а на выходе давление падает – 124 кПа (1,2 атм.).

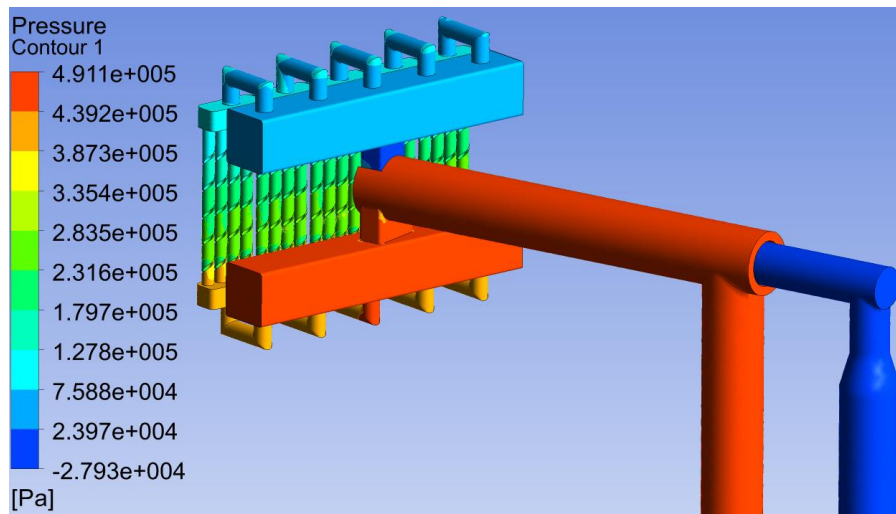


Рисунок 5.6 – Падение давления воды в водяной магистрали калориметра

Сопряженный теплообмен проводился для теплообменника, обозначенного на рисунке 5.2 цифрой 1. Скорость потока на входе в теплообменник, полученная в предыдущем расчете, составила  $V = 7$  м/с, а падающая (поглощаемая) на пластину плотность мощности была задана в соответствии с расчетным распределением. Согласно расчетам распределения плотности мощности, нагрузка на пластину от центра к ее краям убывает. Для упрощения поверхность пластины была разделена на четыре зоны приложения тепловой мощности. Распределение нагрузки на поверхности пластины показано на рисунке 5.7.

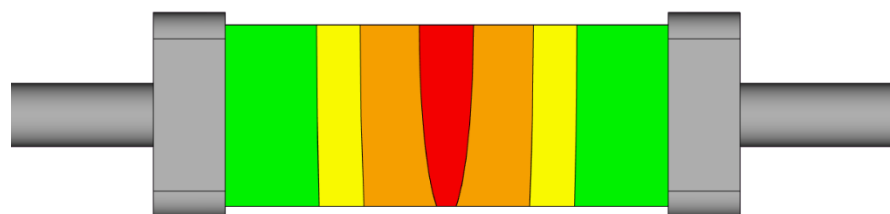


Рисунок 5.7 – Распределение плотности мощности пучка на пластине

Красная зона соответствует максимальному значению плотности мощности  $1,88 \pm 0,04$  кВт/см<sup>2</sup>, коричневая –  $1,30 \pm 0,04$  кВт/см<sup>2</sup>, желтая –  $0,88 \pm 0,04$  кВт/см<sup>2</sup> и зеленая –  $0,35 \pm 0,04$  кВт/см<sup>2</sup>.



Приведенные на рисунке 5.8 результаты расчета показывают, что максимальная температура приемной пластины достигла значения 487 °С, нагрев воды в каналах пластины составил в среднем 32 °С, а средний коэффициент теплоотдачи воды вблизи поверхности каналов охлаждения в среднем  $8 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>·°С.

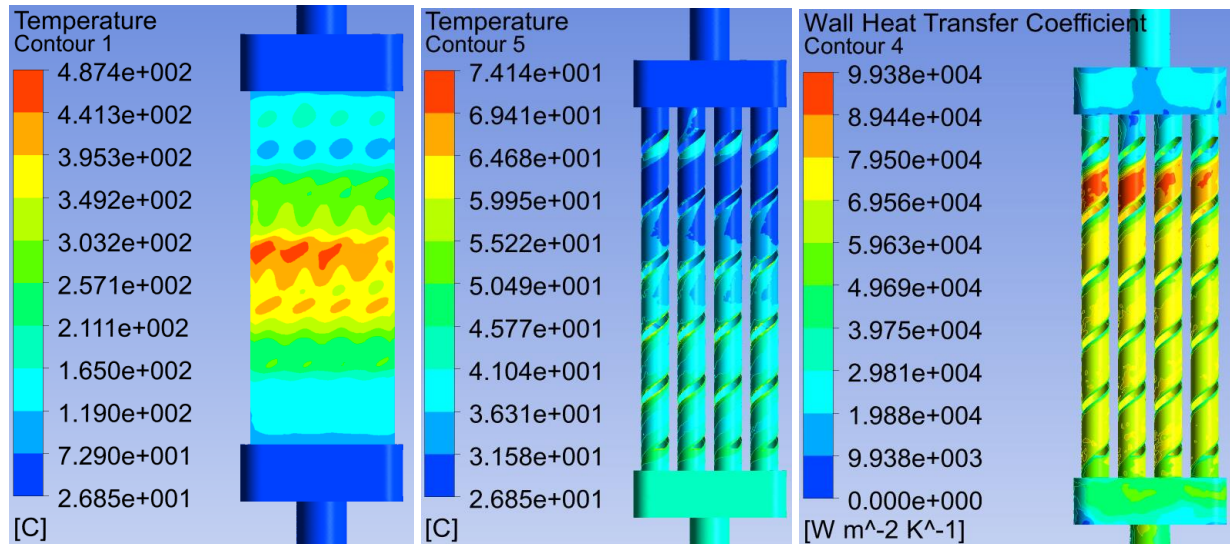


Рисунок 5.8 – Результаты расчета сопряженного теплообмена за импульс 2 с: слева – нагрев приемной пластины; в центре – нагрев воды в каналах пластины; справа – нагрев воды в теплообменнике. Коэффициент теплоотдачи вблизи поверхности канала. Направление движение теплоносителя сверху вниз

Расчетный массовый расход воды для данного температурного режима составил 2,0 кг/с на один теплообменник. Таким образом, секундный и минутный расходы на одну приемную панель – 10 кг/с и 600 кг/мин соответственно. Приведенные расчетные данные были получены при установке завихрителей с геометрией, приведенной на рисунке 5.1.

Для оценки скорости нагрева приемной пластины теплообменника был выполнен расчет для различных длительностей приложения нагрузки с временным интервалом 50 мс. На рисунке 5.9 представлена полученная зависимость максимальной температуры поверхности пластины теплообменника от времени. Данная оценка позволила определить момент наступления теплового режима близкого к стационарному. Температуру нагрева, от начальной до значения 408 °С, пластина приобретает за первые 500 мс. Далее, за следующие 1000 мс идет монотонное увеличение с приращением в интервале на 80 °С. После 1500 мс температура устанавливается на уровне 480–485 °С.

Нетрудно заметить, что 80% от величины нагрева пластина приобретает в первой четверти импульса. Именно в этот промежуток время развивается большая часть деформаций. Несмотря на то, что зона сильного разогрева пластины находится на глубине 2–4 мм от поверхности, приемная пластина достаточно хорошо прогревается по глубине. На том основании, что тепловое

расширение происходит во всех направлениях, пластина испытывает достаточно сложное нагружение – пространственный изгиб. При этом виде нагружения на пластину действуют

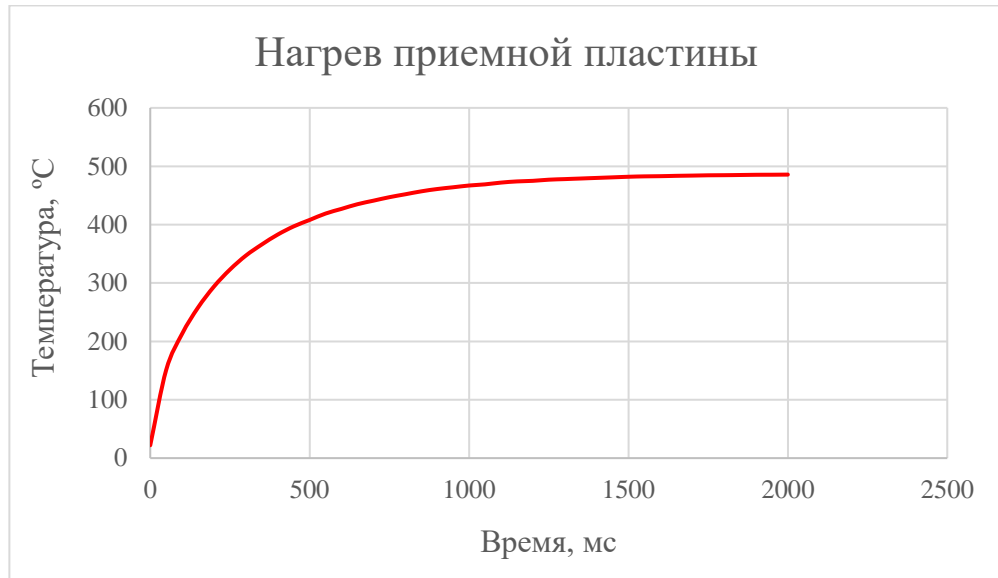


Рисунок 5.9 – Изменение температуры приемной пластины в зависимости от времени

только изгибающие моменты, приложенные в перпендикулярных плоскостях. Установленные внутри каналов завихрители, с одной стороны помогают противостоять этому виду нагружения, но в тоже время, оказывают давление на расширяющийся материал поверхности каналов. Поэтому, важной необходимостью является наличие термдеформационных зазоров между этими элементами.

Для сравнения приведем данные о расходе воды на калориметрах некоторых инжекторов мегаваттного диапазона. В работе [85] для инжектора типа PINI на токамаке TEXTOR использовался калориметр падением давления 10 атм. и массовым расходом воды около 2000 л/мин. В работе [86] для инжектора мощностью 3 МВт на установке METF приведены данные о величине падения давления воды (11,5 атм.) и полном массовом расходе воды (около 2500 л/мин). В работе [87] применен калориметр для инжектора мощностью 1 МВт и длительностью 1 с массовым расходом 300 л/мин. Калориметр на токамаке НИЦ «Курчатовский институт» для инжектора мощностью 3,7 МВт в атомах, описанный в работе [88], требовал массового расхода 30 л/с при падении давления 8 атм.

При работе инжектора атомов на токамаке TCV, были получены данные температур с термодатчиками приемных пластин калориметра. Измерения проводились при мощности нейтрального пучка 1,3 МВт и длительности импульса 500 мс., при этом параметры потока имели следующие значения: расход воды в пересчете на одну панель – 420 л/мин., давление потока

на входе – 3,3 атм. В таблице 5.2 приведены данные температур на термопарах по уровням (верх – низ) и сторонам (лево – право).

Таблица 5.2 – Значения температур на термопарах

	Верхние термопары, $y = +30$ мм									
	Левое крыло калориметра					Правое крыло калориметра				
Номер термопары	9В	7В	5В	3В	1В	2В	4В	6В	8В	10В
Угол поворота, °	36	20	12	9	8	8	9	12	20	36
Измеренная температура, °С	84/90	120/122	63/62	100/98	100/98	102/83	109/108	47/46	148/145	103/109
	Нижние термопары, $y = -30$ мм									
	Левое крыло калориметра					Правое крыло калориметра				
Номер термопары	9Н	7Н	5Н	3Н	1Н	2Н	4Н	6Н	8Н	10Н
Угол поворота, °	36	20	12	9	8	8	9	12	20	36
Измеренная температура, °С	87/90	127/129	59/58	92/94	92/94	107/104	93/98	68/67	131/132	93/91

Для сравнения во Fluent был выполнен расчет для давления на входе воды в систему 3,3 атм. при длительности импульса 500 мс. Температура пластины в зоне термопары составил 136 °С, что на 36 градусов выше температуры, измеренной в эксперименте. Расчетный массовый расход воды составил 421 кг/мин.

#### 5.4 Конструкция калориметра

В конструкции калориметра реализована модульная схема с несущей вакуумной камерой и оппозитным раздвижным приемником пучка. Конструкция калориметра состоит из трех основных узлов: вакуумной камеры, оснащенной прицельным устройством, правой и левой приемных панелей. Приемные панели располагаются на боковых стенках напротив друг друга. Они не имеют между собой механической связи и перемещаются в рабочее положение независимо. Смыкаясь на оси пучкового тракта, они образуют V-образный приемник, обеспечивающий полное перекрытие атомарного пучка. Общий вид устройства показан на рисунке 5.10. Калориметр крепится консольно к задней стенке вакуумной камеры и замыкает вакуумный объем инжектора. Стыковка инжектора с соединительным узлом токамака

осуществляется через круглый фланец, который расположен на выходе из калориметра. Калориметр оснащен портами для контроля вакуума и оптического наблюдения.

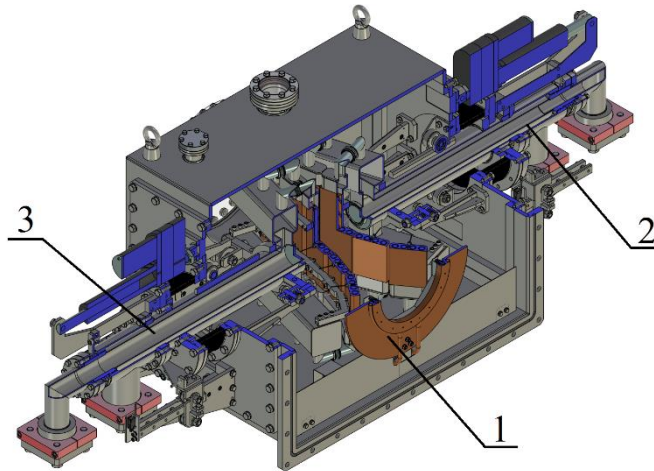


Рисунок 5.10 – Общий вид калориметра. Основные элементы: 1 – вакуумная камера с прицельным устройством (диафрагмой), 2 – узел правой приемной панели, 3 – узел левой приемной панели

Вакуумная камера калориметра имеет прямоугольную форму и представляет собой сварную конструкцию из листового металла. Поскольку она является несущим элементом, то поверхности, на которых устанавливается узлы калориметра, обладают достаточной точностью позиционирования и чистотой поверхности для обеспечения герметичности вакуумных соединений. Для того, чтобы обеспечить данные требования обработка канавок под уплотнители, и планировка поверхностей фланцев осуществлялась после завершения сварочных работ. Для крепления приемных панелей на боковых стенках камеры располагаются два прямоугольных фланца с размерами 408 x 420 мм, а при помощи заднего прямоугольного фланца, имеющего размеры 556 x 770 мм, осуществляется крепление калориметра к вакуумной камере инжектора. Круглый фланец для соединения с патрубком соединительного узла токамака имеет размерность стандарта CF-250. Общий вид вакуумной камеры с прицельным устройством показан на рисунке 5.11.

Прицельное устройство представляет собой конструкцию, состоящую из спаянных между собой круглого диска и эллиптической диафрагмы. Для определения пространственного положения пучка применены вторично-эмиссионные датчики, расположенные по периметру диафрагмы. Для отведения тепловой мощности, которая выделяется в результате бомбардировки частицами, прицельное устройство оснащено активным водяным охлаждением. Теплоотвод обеспечивается медной трубкой, которая охватывает диафрагму. Ввод охлаждающей жидкости осуществляется с нижней стенки вакуумной камеры.

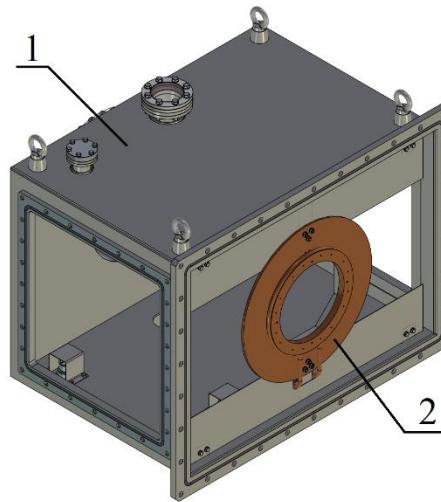


Рисунок 5.11 – Общий вид вакуумной камеры с прицельным устройством. Основные элементы: 1 – вакуумная камера, 2 – прицельное устройство

Каждая приемная панель состоит из пяти одинаковых теплообменников и конструктивно связанных с ними элементов, обеспечивающих их ориентацию относительно оси пучка, перемещение в рабочее положение и снабжение охлаждающей жидкостью. Связующую роль между ними выполняет коллектор. На нем располагаются теплообменники и с его помощью осуществляется ввод движения и подача жидкости. Перемещение панели происходит за счет электропривода, расположенного на фланце в атмосфере. Для этого коллектор связан с фланцем пластинчатым сильфоном. Общий вид узла приемной панели показан на рисунке 5.12.

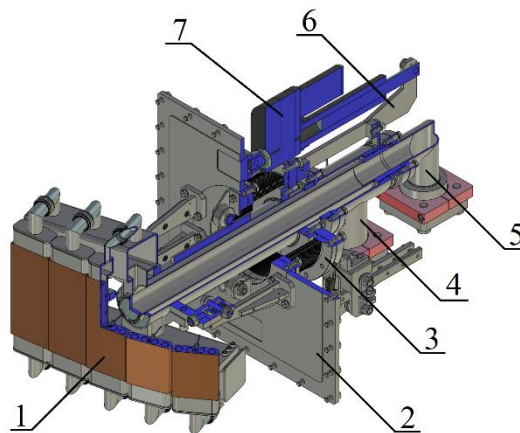


Рисунок 5.12 – Общий вид узла приемной панели. Основные элементы: 1 – приемная панель, 2 – опорный фланец, 3 – сильфонный узел (развязка вакуум-атмосфера), 4 – патрубок подачи воды, 5 – патрубок слива воды, 6 – толкатель, 7 – электропривод

Сам коллектор через систему подвеса крепится к опорному фланцу, который является границей раздела между вакуумом и атмосферой. Стоит отметить, чтобы гарантировать устойчивое положение приемной панели, ее необходимо было обеспечить достаточной опорной базой. По этой причине, элементы системы подвеса коллектора были размещены и в атмосфере, и

в вакууме. Для ограничения перемещений коллектора в вертикальной плоскости, в вакуумной части коллектор фиксируется направляющими роликами. Ролики, расположенные на опоре коллектора, опираются на кронштейны, обеспечивая фиксацию в горизонтальной плоскости. В атмосфере узел крепится к направляющей каретки. Все опорные элементы коллектора имеют подшипники качения. Схема подвеса коллектора показана на рисунке 5.13.

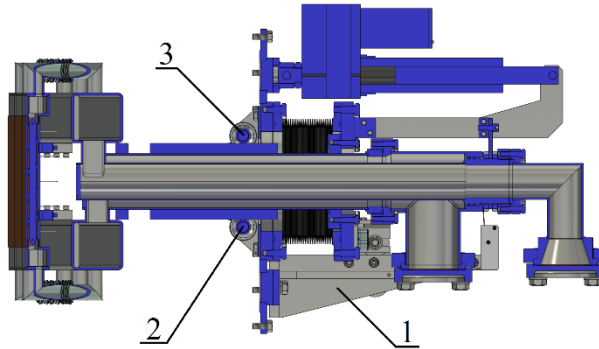


Рисунок 5.13 – Система подвеса коллектора: 1 – направляющая каретка (атмосфера), 2 – направляющий ролик, 3 – кронштейн

Система подачи и слива охлаждающей жидкости построена по схеме труба-в-трубе. Она представляет собой сварную конструкцию, в которой труба меньшего диаметра 64 мм расположена внутри трубы большего диаметра 90 мм. По трубе большего диаметра осуществляется подача воды, а по трубе меньшего диаметра – ее слив. На конце каждой из труб приварены соединительные элементы, которые обеспечивают стыковку с напорной и сливной магистралями.

Теплообменники приемных панелей крепятся к коллектору через опорные скобы. Способ крепления каждого теплообменника к скобам предусматривает некоторую возможность подстройки по углу и обеспечивает небольшое перемещение вдоль опорной плоскости. Питание теплообменников водой осуществляется через патрубки с сильфонными компенсаторами. Наличие компенсаторов дает возможность поглощать термодформации приемной пластины в процессе нагрева пучком. Общий вид приемной панели показан на рисунке 5.14.

V-образная форма приемника, которая образуется после смыкания приемных панелей позволяет получить наименьший размер вдоль оси пучка [64]. Поскольку максимум плотности мощности находится в центре пучка и по мере продвижения к периферии сечения спадает, то теплообменники имеют различные углы поворота по отношению к оси пучкового тракта. Подобный способ позволяет снизить плотность мощности на пластинах и сократить осевой размер калориметра. Углы поворота теплообменников по отношению к оси движения пучка частиц показаны на рисунке 5.15.

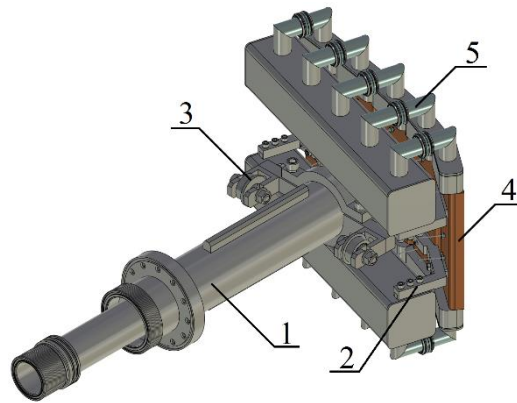


Рисунок 5.14 – Приемная панель калориметра. Основные элементы: 1 – водяной коллектор, 2 – опорная скоба, 3 – опора, 4 – теплообменник, 5 – соединительный патрубок

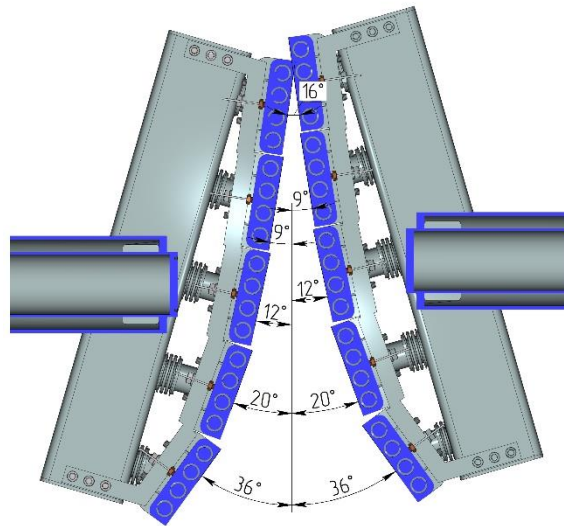


Рисунок 5.15 – Углы поворота теплообменников

Конструктивно все теплообменники одинаковы, но для смыкания панелей без зазора и обеспечения гарантированного перекрытия пучка, с грани первого теплообменника (рисунок 5.2), узла левой приемной панели, снята фаска. Приемным элементом теплообменника является медная пластина толщиной 22 мм с четырьмя каналами охлаждения. В каждом канале установлен завихритель потока, представляющий собой стержень со сплошной винтовой поверхностью вдоль его оси (рисунок 5.16). Данный тип не является достаточно эффективным с точки зрения максимально возможной интенсификации теплообмена [82], поскольку перекрывает канал полностью, формируя винтовой канал щелевого профиля. Вместе с тем, эта конфигурация имеет ряд преимуществ с точки зрения технологии изготовления и массового расхода воды.

Для измерения температуры нагрева пластин, а также определения профиля пучка на каждой из

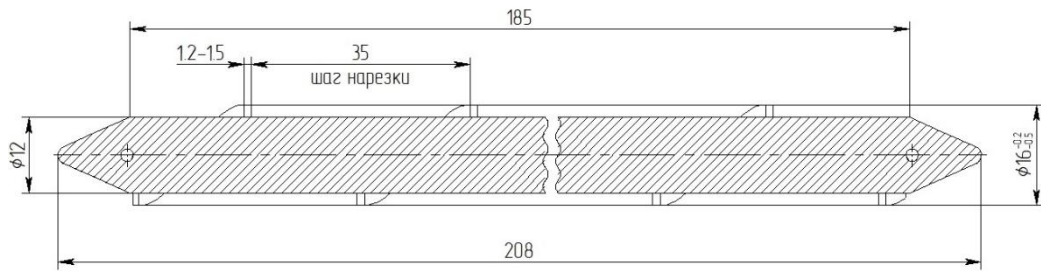


Рисунок 5.16 – Конструкция и основные размеры завихрителя

них установлены по две термопары серии ТХК-01. Конец термопары находится на расстоянии 2 мм от приемной поверхности пластины и заделан в нее с применением индий-галлий-оловянной эвтектики, которая находится в жидком состоянии при температуре 5–10 °С. Такая заделка обеспечивает надежный тепловой контакт термопары с приемной пластиной панели. Конструкция теплообменника показана на рисунке 5.17. Пластины теплообменников с расположенными в них

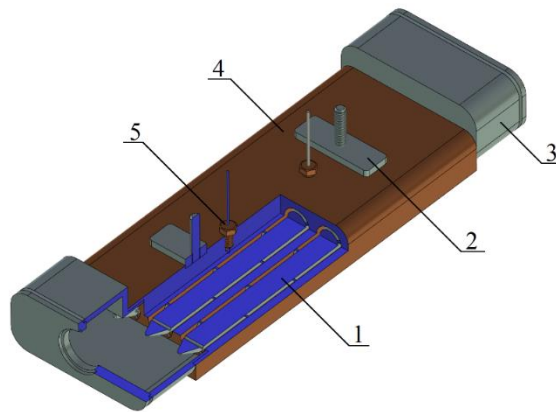


Рисунок 5.17 – Конструкция теплообменника калориметра. Основные элементы: 1 – завихритель (интенсификатор теплообмена), 2 – опорная пластина, 3 – крышка-ресивер, 4 – приемная пластина, 5 – термопара

завихрителями достаточно чувствительны к деформациям, в частности, изгибу, который возникает в следствие теплового расширения металла. Значительные перемещения могут привести к разрушению элементов калориметра.

На рисунке 5.18 приведена фотография калориметра, описанного в данной главе.

Инжектор атомов работает на токамаке TCV в Лозанне с 2015 года. За это время в калориметр было произведено порядка 1000 выстрелов при разных мощностях пучка и длительностях импульса. За время эксплуатации калориметр не потребовал никаких сервисных работ и замены каких-либо деталей. Сухая масса изделия 350 кг, при внутреннем объеме, занимаемым водой – 0,015 м<sup>3</sup>.



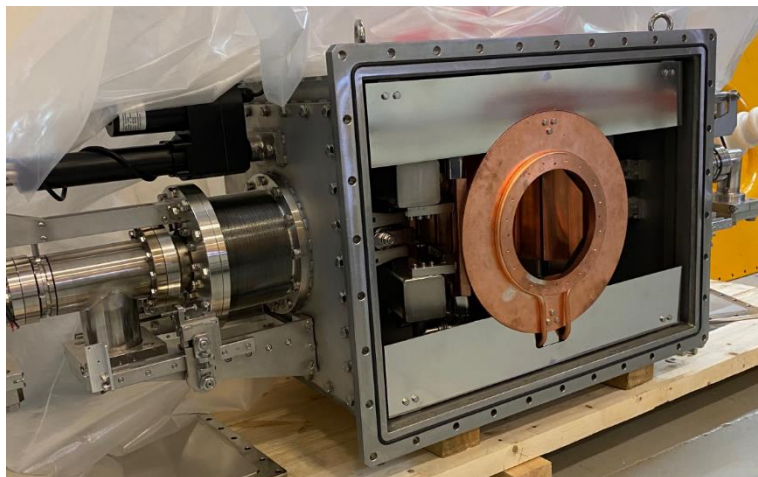


Рисунок 5.18 – Фотография калориметра

В конструкции калориметра был применен ряд технических решений, которые позволили достигнуть определенных преимуществ. Применение в качестве приемных элементов пластин с каналами обеспечило простоту изготовления приемных панелей. Установка завихрителей потока в каналы теплообменников позволила достигнуть высокой энергоэффективности, что позволило снизить расход теплоносителя. Применение коллекторов, построенных по схеме труба-в-трубе, которые обеспечили водоснабжение и ввод движения в вакуум, позволило существенно упростить конструкцию калориметра и снизить его размеры. Модульный принцип конструкции обеспечил удобство сборки, настройки и обслуживания калориметра.

## Заключение

Главным итогом проделанной работы явилась разработка и создание инжектора быстрых атомов с мощностью 1 МВт, длительностью 2 с и его интеграция в инфраструктуру токамака TCV. 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 работы, следующие:

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.

В разработке и создании инжектора быстрых атомов применена методика программного моделирования для систем инжектора. Благодаря подробному моделированию и анализу удалось обойтись без дорогостоящих и длительных циклов разработки типа “проектирование – изготовление – испытание” и существенно сократить срок создания инжектора.

Созданный нагревной атомарный инжектор с мощностью пучка 1 МВт и длительностью 2 с успешно используется для нагрева плазмы в токамаке TCV, расположенного в Федеральной политехнической школе Лозанны Швейцарского центра плазмы (см. приложения А и Б).

В заключение автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Давыденко В.И., д.ф.-м.н. Иванову А.А., под руководством которого начинал свою работу, д.ф.-м.н. Багрянскому П.А., заведующему НКО, к.т.н. Шиянкову С.В., нач. КБ плазменных лабораторий Горбовскому А.И., инженеру-электронику Капитонову В.А., к.ф.-м.н. Ахметову Т.Д., к.ф.-м.н. Емелеву И.С., н.с. Брулю А.В. за постоянный интерес к работе, большую помощь и полезные обсуждения, Карпушову А.Н. и команде токамака TCV за полученные данные в ходе экспериментов с использованием атомарной инжекции.

Автор благодарит коллективы лаборатории 9-0, Научно-конструкторского отдела и Экспериментального производства Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

за совместную работу по созданию инжектора быстрых атомов для токамака TCV. Отдельную сердечную благодарность автор выражает Макаровой Софье Николаевне за информационное обеспечение подготовки диссертационных документов.

## Список литературы

1. Дегтярев, К. Ключевые тенденции потребления энергии в XXI веке. / К. Дегтярев. – Текст : электронный // Энергетическая политика. – 2021. – № 5 (159). – С. 54–63. – URL: [https://doi.org/10.46920/2409-5516\\_2021\\_5159\\_54](https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_5159_54) (дата обращения: 17.01.2023).
2. Energy Production and Consumption : [сайт]. – URL: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption> (дата обращения: 17.01.2023). – Текст : электронный.
3. Дегтярев, К. С. Динамика мирового энергопотребления в XX-XXI вв. и прогноз до 2100 года / К. С. Дегтярев. – Текст : электронный // Окружающая среда и энерговедение. – 2020. – № 2. – С. 35–48. – URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3930342> (дата обращения: 17.01.2023).
4. Соловьев, А. А. Возобновляемая энергетика геосфер: новые идеи и перспективные методы исследований / А. А. Соловьев. – Текст : электронный // Окружающая среда и энерговедение. – 2020. – № 2. – С. 6–9. – URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3930264> (дата обращения: 17.01.2023).
5. Соловьёв, А. А. Атомная и возобновляемая энергетика как факторы снижения экологических рисков и роста эколого-экономической эффективности энергетике / А. А. Соловьёв, К. С. Дегтярёв. – Текст : электронный // Энергетическая политика. – 2017. – № 2. – С. 60–71. – URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_30488035\\_55576455.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_30488035_55576455.pdf) (дата обращения: 17.01.2023).
6. Попель, О. С. Возобновляемые источники энергии: роль и место в современной и перспективной энергетике / О. С. Попель. – Текст : электронный // Российский химический журнал. – 2008. – Т. 52, № 6. – С. 95–106. – URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_13617920\\_44226205.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_13617920_44226205.pdf) (дата обращения: 17.01.2023).
7. Бушуев, В. В. Энергетика России (избранные статьи, доклады, презентации 2014-2018 гг.). Том 4. На пути к новой энергетической цивилизации. – Москва : ИЦ «Энергия», 2018. – 740 с. – ISBN 978-5-98908-479-1. – Текст : непосредственный.
8. Арцимович, Л. А. О перспективах исследований по проблеме управляемого ядерного синтеза / Л. А. Арцимович. – Текст : электронный // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 91, вып. 3. – С. 365–379. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/1967/3/a/> (дата обращения: 17.01.2023).
9. Велихов, Е. П. Перспективы термоядерных исследований / Е. П. Велихов, В. И. Ильгисонис. – Текст : электронный // Вестник Российской академии наук. – 2021. – Т. 91, № 5. – С. 470–478. – URL: <https://doi.org/10.31857/S0869587321050248> (дата обращения: 17.01.2023).
10. Арцимович, Л. А. Управляемые термоядерные реакции / Л. А. Арцимович. – Москва : Физматгиз, 1961. – 468 с. – Текст : непосредственный.

11. Головин, И. Н. Состояние и перспективы управляемого термоядерного синтеза / И. Н. Головин, Б. Б. Кадомцев. – Текст : электронный // Атомная энергия. – 1996. – Т. 81, вып. 5. – С. 364–372. – URL: <http://ap.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4585/4425> (дата обращения: 17.01.2023).
12. Готт, Ю. В. На пути к энергетике будущего : учебное пособие / Ю. В. Готт, В. А. Курнаев. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2017. – 292 с. – ISBN 978-5-7262-2296-7. – Текст : непосредственный.
13. Генерация безындукционных токов путем инжекции пучка атомов в сферическом токамаке ГЛОБУС-М / П. Б. Щёголев, В. Б. Минаев, Н. Н. Бахарев [и др.]. – Текст : электронный // Физика плазмы. – 2019. – Т. 45, № 3. – С. 213–225. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0367292119020082> (дата обращения: 17.01.2023).
14. Кирнева, Н. А. Современные исследования на установках «Токамак» : учебное пособие / Н. А. Кирнева. – Москва : МИФИ, 2008. – 188 с. – ISBN 978-5-7262-1077-3. – Текст : непосредственный.
15. Давыденко, В. И. Концептуальный проект диагностического инжектора пучка атомов водорода для токамака TRT / В. И. Давыденко, А. А. Иванов, Н. В. Ступишин. – Текст : электронный // Физика плазмы. – 2022. – Т. 48, № 8. – С. 694–699. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49344415> (дата обращения: 17.01.2023).
16. Возможная схема инжектора атомарного пучка для нагрева плазмы и генерации тока в токамаке TRT / Ю. И. Бельченко, А. В. Бурдаков, В. И. Давыденко [и др.]. – Текст : электронный // Физика плазмы. – 2021. – Т. 47, № 11. – С. 1031–1037. – URL: <https://doi.org/10.31857/S0367292121110135> (дата обращения: 17.01.2023).
17. Design of the ITER Neutral Beam injectors / R. S. Hemsworth, J.-H. Feist, M. Hanada [et al.]. – Текст : электронный // AIP Conference Proceedings. – 1996. – Vol. 380, nr 1. – P. 504–517. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.51269>. – Дата публикации: 10.07.1996.
18. Neutral beam heating applications and development / M. M. Menon. – Текст : электронный // Proceedings of the IEEE. – 1981. – Vol. 69, nr 8. – P. 1012–1029. – URL: <https://doi.org/10.1109/PROC.1981.12112> (дата обращения: 17.01.2023).
19. Design of Neutral Beam-Line of EAST / C. Hu, L. Liang, Y. Xie [et al.]. – Текст : электронный // Plasma Science and Technology. – 2011. – Vol. 13, nr 5. – P. 541. – URL: <https://doi.org/10.1088/1009-0630/13/5/06> (дата обращения: 17.01.2023).
20. Design of neutral beam injection system for KSTAR tokamak / D. H. Chang, S. R. In, K. W. Lee [et al.]. – Текст : электронный // Fusion Engineering and Design. – 2011. – Vol. 86, nr 2–3. – P. 244–252. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.01.056>. – Дата публикации: 05.02.2011.

21. Conceptual Design of the Beamline for the DTT Neutral Beam Injector following a Double Beam Source Design Approach / P. Agostinetti, E. Benedetti, T. Bolzonella [et al.]. – Текст : электронный // Plasma and Fusion Research. – 2021. – Vol. 16. – P. 2405080. – URL: <https://doi.org/10.1585/pfr.16.2405080>. – Дата публикации: 18.06.2021.
22. Engineering design of the double neutral beam injection system for MAST Upgrade / T. Barrett, C. Jones, P. Blatchford [et al.]. – Текст : электронный // Fusion Engineering and Design. – 2011. – Vol. 86, nr 6–8. – P. 789–792. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.01.020>. – Дата публикации: 16.02.2011.
23. Neutral beam heating on the TCV tokamak / A. N. Karpushov, R. Chavan, S. Coda [et al.]. – Текст : электронный // Fusion Engineering and Design. – 2017. – Vol. 123. – P. 468–472. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.02.076>. – Дата публикации: 27.02.2017.
24. Beam duct for the 1 MW neutral beam heating injector on TCV / M. Toussaint, S. Coda, F. Dolizy [et al.]. – Текст : электронный // Fusion Engineering and Design. – 2017. – Vol. 123. – P. 421–425. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.03.044>. – Дата публикации: 21.03.2017.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. ANSYS Workbench : [сайт]. – URL: <https://www.ansys.com> (дата обращения: 18.01.2021). – Текст : электронный.
30. T-Flex CAD : [сайт]. – URL: <http://www.tfex.ru> (дата обращения: 17.01.2023). – Текст : электронный.

31. Pitts, R. A. The design of central column protection tiles for the TCV tokamak / R. A. Pitts, R. Chavan, J.-M. Moret. – Текст : электронный // Nuclear Fusion. – 1999. – Vol. 39, nr 10. – P. 1433. – URL: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/abd2c6>. – Дата публикации: 01.10.1999.
32. A scoping study of the application of neutral beam heating on the TCV tokamak / A. N. Karpushov, B. P. Duval, R. Chavan [et al.]. – Текст : электронный // Fusion Engineering and Design. – 2011. – Vol. 86, nr 6–8. – P. 868–871. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.02.077>. – Дата публикации: 17.03.2011.
33. Габович, М. Д. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей / М. Д. Габович, Н. В. Плешивцев, Н. Н. Семашко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 248 с. – Текст : непосредственный.
34. Инжекторы быстрых атомов водорода / Н. Н. Семашко, А. Н. Владимиров, В. В. Кузнецов [и др.]. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 167 с. – Текст : непосредственный.
35. Форрестер, А. Т. Интенсивные ионные пучки / А. Т. Форрестер ; перевод с английского под ред. Н. Н. Семашко. – Москва : Мир, 1992. – 353 с. – Текст : непосредственный.
36. Форвакуумные плазменные источники электронов / В. А. Бурдовицин, А. С. Климов, А. В. Медовник [и др.]. – Томск : Том. ун-та, 2014. – 288 с. – ISBN 978-5-7511-2269-0. – Текст : непосредственный.
37. Окс, Е. М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применение : монография / Е. М. Окс. – Томск : Изд-во науч.-техн. лит., 2005. – 212 с. – Текст : непосредственный.
38. 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.
39. Корнилов, С. Ю. Получение остросфокусированных пучков в электронных пушках с плазменным катодом / С. Ю. Корнилов, И. В. Осипов, Н. Г. Ремпе. – Текст : электронный // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 3. – С. 104–109. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_12136570\\_26083657.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12136570_26083657.pdf) (дата обращения: 17.01.2023).
40. Particle Beam GUN Simulation : [сайт]. – URL: <https://www.far-tech.com/pbguns> (дата обращения: 17.01.2023). – Текст : электронный.
41. Update of ion-optical system of neutral beam of Tokamak à Configuration Variable / A. V. Sorokin, T. D. Akhmetov, A. V. Brul [et al.]. – Текст : электронный // Review of Scientific Instruments. – 2020. – Vol. 91, nr 1. – P. 013323. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.5128569>. – Дата публикации: 22.01.2020.

42. Electron backstream to the source plasma region in an ion source / Y. Ohara, M. Akiba, Y. Arakawa [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Applied Physics. – 1980. – Vol. 51, nr 7. – P. 3614–3621. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.328141>. – Дата публикации: 01.07.1980.
43. Николаев, А. К. Хромовые бронзы / А. К. Николаев, А. И. Новиков, В. М. Розенберг. – Москва : Металлургия, 1983. – 177 с. – Текст : непосредственный.
44. Марочник сталей и сплавов : [сайт]. – URL: <http://www.splav-kharkov.com/> (дата обращения: 17.01.2023). – Текст : электронный.
45. Манко, Г. Г. Пайка и припои / Г. Г. Манко ; перевод с английского М. Б. Тапельзона. – Москва : Машиностроение, 1968. – 323 с. – Текст : непосредственный.
46. Рот, А. Вакуумные уплотнения / А. Рот. – Москва : Энергия, 1971. – 464 с. – Текст : непосредственный.
47. Николаев, А. К. Сплавы для электродов контактной сварки / А. К. Николаев, В. М. Розенберг. – Москва : Металлургия, 1978. – 95 с. – Текст : непосредственный.
48. Медь. Латунь. Бронза : учебное пособие / под общ. ред. Ю. Н. Райкова. – Москва : Ин-т цветметобработка, 2006. – 550 с. – Текст : непосредственный.
49. Ящерицын, П. И. Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении / П. И. Ящерицын. – Минск : Вышэйшая школа, 1974. – 607 с. – Текст : непосредственный.
50. Горанский, Г. К. Расчет режимов резания при помощи электронно-вычислительных машин / Г. К. Горанский. – Минск : Госиздат БССР, 1963. – 192 с. – Текст : непосредственный.
51. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – Москва : Машиностроение, 1981. – 279 с. – Текст : непосредственный.
52. Подураев, В. Н. Физико-химические методы обработки / В. Н. Подураев, В. С. Камалов. – Москва : Машиностроение, 1973. – 344 с. – Текст : непосредственный.
53. Research and development progress of radio frequency ion source for neutral beam injector at ASIPP / Y. Xie, C. Hu, J. Wei [et al.]. – Текст : электронный // Review of Scientific Instruments. – 2019. – Vol. 90, nr 11. – P. 113319. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.5128258>. – Дата публикации: 21.11.2019.
54. Towards large and powerful radio frequency driven negative ion sources for fusion / B. Heinemann, U. Fantz, W. Kraus [et al.]. – Текст : электронный // New Journal of Physics. – 2017. – Vol. 19. – P. 015001. – URL: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/aa520c>. – Дата публикации: 06.01.2017.
55. Development of megawatt radiofrequency ion source for the neutral beam injector on HL-2A tokamak / G. J. Lei, L. W. Yan, D. P. Liu [et al.]. – Текст : электронный // Nuclear Fusion. – 2021. – Vol. 61, nr 3. – P. 036019. – URL: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/abd2c6>. – Дата публикации: 15.02.2021.



56. Overview of the RF source development programme at IPP Garching / E. Speth, H. D. Falter, P. Franzen [et al.]. – Текст : электронный // Nuclear Fusion. – 2006. – Vol. 46, nr 6. – P. S220–S238. – URL: <https://doi.org/10.1088/0029-5515/46/6/S03>. – Дата публикации: 22.05.2006.
57. Structure design and analysis of RF ion source for negative ion source test facility / Y. Gu, Y. Xie, J. Wei [et al.]. – Текст : электронный // Review of Scientific Instruments. – 2019. – Vol. 90, nr 11. – P. 113315. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.5128253>. – Дата публикации: 15.11.2019.
58. Исследование высокочастотного генератора плазмы с многосекундной длительностью работы / В. А. Воинцев, Д. Ю. Гаврисенко, А. А. Кондаков [и др.]. – Текст : электронный // Сибирский физический журнал. – 2022. – Т. 17, № 3. – С. 5–11. – URL: <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2022-17-3-5-11> (дата обращения: 17.01.2023).
59. Разработка и испытания высокочастотного драйвера перезарядного источника отрицательных ионов водорода / К. И. Анисеева, В. А. Воинцев, Д. Ю. Гаврисенко [и др.]. – Текст : электронный // Сибирский физический журнал. – 2023. – Т. 18, № 2. – С. 36–45. – URL: <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2023-18-2-36-45> (дата обращения: 17.01.2024).
60. Final design of the beam source for the MITICA injector / D. Marcuzzi, P. Agostinetti, M. D. Palma [et al.]. – Текст : электронный // Review of Scientific Instruments. – 2016. – Vol. 87, nr 2. – P. 02B309. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.4932615>. – Дата публикации: 12.10.2015.
61. Achievement of 1000 s plasma generation of RF source for neutral beam injector / C. Hu, Y. Xie, Y. Xu [et al.]. – Текст : электронный // Plasma Science and Technology. – 2019. – Vol. 21, nr 2. – P. 022001. – URL: <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aaf1e0>. – Дата публикации: 11.01.2019.
62. Периферийная мультипольная магнитная стенка для многоамперного источника ионов / П. П. Дейчули, А. А. Иванов, С. А. Корепанов [и др.]. – Текст : электронный // Сборник тезисов по материалам XXVIII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, 19–23 февраля 2001 года). – Москва, 2001. – С. 244. – URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/33/005/33005985.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/005/33005985.pdf) (дата обращения: 17.01.2023).
63. Плазменный эмиттер на основе высокочастотного разряда / А. А. Иванов, И. В. Шиховцев, А. А. Подыминогин [и др.]. – (Препринт ИЯФ 2001-40). – Новосибирск : ИЯФ СО РАН, 2001. – 19 с. – Текст : непосредственный.
64. Исследования по физике и технике ионных и атомарных пучков в ИЯФ СО РАН / Ю. И. Бельченко, В. И. Давыденко, П. П. Дейчули [и др.]. – Текст : электронный // Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188, вып. 6. – С. 595–650. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2018/6/b/> (дата обращения: 17.01.2023).

65. Томас, К. И. Технология сварочного производства: учебное пособие / К. И. Томас, Д. П. Ильященко. – Томск : ТПУ, 2011. – 247 с. – ISBN 978-5-98298-818-8. – Текст : непосредственный.
66. Лупачёв, В. Г. Общая технология сварочного производства / В. Г. Лупачёв. – Минск : Вышэйшая школа, 2011. – 287 с. – ISBN 978-985-06-2034-7. – Текст : непосредственный.
67. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин. – Москва : Металлургия, 1983. – 359 с. – Текст : непосредственный.
68. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – Москва : Металлургия, 1986. – 480 с. – Текст : непосредственный.
69. Термическая обработка в машиностроении : справочник / под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. – Москва : Машиностроение, 1980. – 783 с. – Текст : непосредственный.
70. Бернштейн, М. Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов : [в 2 томах] / М. Л. Бернштейн. – Москва : Металлургия, 1968. – Текст : непосредственный.
71. Минайчев, В. Е. Вакуумные крионасосы / В. Е. Минайчев. – Москва : Энергия, 1976. – 151 с. – Текст : непосредственный.
72. COMSOL Multiphysics : [сайт]. – URL: <https://www.comsol.ru> (дата обращения: 18.01.2021). – Текст : электронный.
73. Моделирование нестационарного профиля нейтрального газа в инжекторе атомов водорода методом стохастической динамики / А. С. Кривенко, В. И. Давыденко, А. А. Иванов, А. Н. Драничников. – (Препринт ИЯФ 2000-70). – Новосибирск : ИЯФ СО РАН, 2000. – 12 с. – Текст : электронный. – URL: <https://inspirehep.net/files/ebb00468d6a9d6b2d6487881ab7ed2df> (дата обращения: 17.01.2023).
74. Аполлонский, С. М. Справочник по расчету электромагнитных экранов / С. М. Аполлонский. – Ленинград : Энергоатомиздат : Ленинградское отделение, 1988. – 223 с. – ISBN 5-283-04390-8. – Текст : непосредственный.
75. Development of fast response calorimeter for neutral beam shine-through measurement on CHS / M. Osakabe, Y. Takeiri, T. Takanashi [et al.]. – Текст : электронный // Review of Scientific Instruments. – 2001. – Vol. 72, nr 1. – P. 586–589. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.1324740>. – Дата публикации: 01.01.2001.
76. Design and R&D for manufacturing the beamline components of MITICA and ITER HNBs / M. D. Palma, E. Sartori, P. Blatchford [et al.]. – Текст : электронный // Fusion Engineering and Design. – 2015. – Vol. 96–97. – P. 557–562. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.06.092>. – Дата публикации: 05.07.2015.
77. Conceptual Design of the Beamline for the DTT Neutral Beam Injector following a Double Beam Source Design Approach / P. Agostinetti, E. Benedetti, T. Bolzonella [et al.]. – Текст : электронный

- // Plasma and Fusion Research. – 2021. – Vol. 16. – P. 2405080. – URL: <https://doi.org/10.1585/pfr.16.2405080>. – Дата публикации: 18.06.2021.
78. Tao, L. Structure Design of Calorimeter of EAST-NBI System Using Thermal Inertia with Cooling Water / L. Tao, C. Hu, Y. Xie. – Текст : электронный // Proceedings of the 20th Pacific Basin Nuclear Conference (Beijing, China, 5–9 April 2016). – Singapore : Springer, 2017. – P. 883–893. – URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2317-0\\_83](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2317-0_83). – Дата публикации: 02.02.2017.
79. Engineering design of the double neutral beam injection system for MAST Upgrade / T. R. Barrett, C. Jones, P. Blatchford [et al.]. – Текст : электронный // Fusion Engineering and Design. – 2011. – Vol. 86, nr 6–8. – P. 789–792. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.01.020>. – Дата публикации: 16.02.2011.
80. Neutral Beam Injection System / G. Duesing, H. Altmann, H. Falter [et al.]. – Текст : электронный // Fusion Technology. – 1987. – Vol. 11, nr 1. – P. 163–202. – URL: <https://doi.org/10.13182/FST87-A25004>. – Дата публикации: 09.05.2017.
81. Митрофанова, О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок : монография / О. В. Митрофанова. – Москва : Физматлит, 2010. – 287 с. – ISBN 978-5-9221-1223-9. – Текст : непосредственный.
82. Akhmetov, T. D. Model of neutral-beam propagation in a duct with scrapers / Akhmetov T. D., Davydenko V. I., Ivanov A. A. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2008. – Vol. 36, nr 4. – P. 1545–1551. – URL: <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.917951>. – Дата публикации: 22.04.2008.
83. Eckstein, W. Reflection (backscattering) / W. Eckstein. – Текст : электронный // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2010. – Vol. 74. – P. 141–148. – URL: <https://doi.org/10.3103/S1062873810020097>. – Дата публикации: 26.03.2010.
84. Eckstein, W. Sputtered Energy Coefficient and Sputtering Yield / W. Eckstein. – Текст : электронный // Max-Planck-Institut für Plasmaphysik : [сайт]. – Garching, 2011. – IPP 17/29. – URL: <https://hdl.handle.net/11858/00-001M-0000-0026-EDB5-6> (дата обращения: 17.01.2023).
85. Neutral injection for TEXTOR / H. Euringer, M. Lochter, U. Pfister, R. Uhlemann. – Текст : электронный // Proceedings of the IEEE Thirteenth Symposium on Fusion Engineering (Knoxville, TN, USA, 2–6 October 1989). – IEEE, 1989. – URL: <https://doi.org/10.1109/FUSION.1989.102384> (дата обращения: 17.01.2023).
86. Compact, inexpensive target design for steady-state heat removal in high-heat-flux fusion applications / S. K. Combs, S. L. Milora, C. A. Foster [et al.]. – Текст : электронный // Review of Scientific Instruments. – 1985. – Vol. 56, nr 8. – P. 1526–1530. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.1138148>. – Дата публикации: 01.08.1985.

87. Characterization of 1 MW, 40 keV, 1 s neutral beam for plasma heating / A. Sorokin, V. Belov, V. Davydenko [et al.]. – Текст : электронный // Review of Scientific Instruments. – 2010. – Vol. 81, nr 2. – P. 02B108. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.3266141>. – Дата публикации: 18.02.2010.
88. Наумов, В. К. Некоторые вопросы обеспечения теплового режима токоприемников мощного инжектора нейтральных атомов / В. К. Наумов, Н. Н. Семашко. – Текст : непосредственный // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 1980. – Вып. 1 (5). – С. 67.

## Приложение А (справочное)

### Акт использования инжектора



School of Basic Sciences  
Swiss Plasma Center

To Whom It May Concern

Lausanne, 28 February 2023

#### ACT OF USE

This document is to confirm that, following the purchase order # 3000082003 dated October 23<sup>rd</sup>, 2013 by EPFL, BINP-Plasma LLC installed a heating injector for the TCV tokamak in 2015.

The injector was designed and manufactured at Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS. After the upgrade of the ion-optical system in 2019, a beam with an energy of 26 keV and a power of more than 1 MW was injected into the tokamak plasma, which meets the technical requirements. The injector is one of the main plasma heating systems in the tokamak. Heating neutral beam used is more than 5'000 TCV plasma discharges in the period of 2016-2022, beam availability exceed 95%.

With the installation of the 1 MW neutral beam, TCV has greatly extended the range of accessible plasma parameters that are highly relevant to tokamak physics and machine operation studies and that will strongly contribute to the ITER and DEMO projects. NB injection on TCV facilitates, H-mode access, changes sawtooth and ELM frequencies provides a significant plasma current drive. The NB enables TCV to access ITER-like  $\beta_N$  values (1.8) and Te/Ti  $\sim 1$ , allowing investigations of innovative plasma features in ITER relevant ELMy H-mode. The advanced Tokamak route was also pursued, with stationary, fully non-inductive discharges sustained by ECCD and NBCD reaching  $\beta_N \sim 1.4-1.7$ . Record ion temperatures of 2.0–2.5 keV and toroidal rotation velocities up to 160 km/s were promptly attained in the first few L-mode discharges with NB injection. Ion temperatures up to 3.5 keV were subsequently achieved in ELMy H-mode.

Mr. Vladislav Amirov, Chief designer, visited Lausanne several times to study in detail the placement of the injector on the TCV tokamak.

Prof. Ambrogio Fasoli  
Professor of Physics  
Director, Swiss Plasma Center

## Приложение Б (справочное)

### Патент на изобретение

**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**



**ПАТЕНТ**  
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ  
№ 2794724

**Ионно-оптическая система источника ионов**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) (RU)*

Авторы: *Амиров Владислав Харисович (RU), Дейчули Петр Петрович (RU), Иванов Александр Александрович (RU), Сорокин Алексей Валерьевич (RU)*

Заявка № 2022125447  
Приоритет изобретения 29 сентября 2022 г.  
Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 24 апреля 2023 г.  
Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 29 сентября 2042 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

Ю. С. Зубов

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 6168000767 4-010044e6d24145d5c17  
Инициалы Зубов Ю.С. Сертификат  
Действителен с 20.03.2022 по 20.03.2025

