

*На правах рукописи*

**ЛИСТОПАД Александр Алексеевич**

**ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ АТОМАРНЫЙ ИНЖЕКТОР  
С МНОГОЦЕЛЕВОЙ СИСТЕМОЙ  
ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА**

**01.04.08 – физика плазмы**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**НОВОСИБИРСК – 2012**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и в Институте физики плазмы Исследовательского центра Юлих (Германия).

#### НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ:

- ДАВЫДЕНКО  
Владимир Иванович – доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.
- Ульрих Замм – профессор, доктор физики,  
Исследовательский центр Юлих, Германия.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

- ПОЛОСАТКИН  
Сергей Викторович – кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск,  
старший научный сотрудник.
- АФАНАСЬЕВ  
Валерий Иванович – доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-  
Петербург, ведущий научный сотрудник.
- ВЕДУЩАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ – Институт физики токамаков  
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.  
в «\_\_\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института  
ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

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

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

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

Для активной корпускулярной диагностики и нагрева плазмы в установках с магнитным удержанием широко используются пучки быстрых частиц. Пучки быстрых атомов для нагрева плазмы позволяют производить некоторые диагностические эксперименты, но использование специализированных узких слабонерасходящихся диагностических пучков является более предпочтительным.

В Институте ядерной физики разработана серия диагностических инжекторов, предназначенных для активной корпускулярной диагностики плазмы в открытых ловушках и токамаках средних размеров, которые позволяют получать слабонерасходящиеся пучки быстрых атомов водорода, дейтерия, гелия с энергией в диапазоне 10 – 60 кэВ, эквивалентным током 1 – 10 А и длительностью импульса до 10 с.

В 1998 г. для спектроскопии перезарядки ионов примесей плазмы (CXRS) на токамаке TEXTOR (научно-исследовательский центр «Юлих», Германия) был разработан диагностический инжектор RUDI (Russian Diagnostic Injector). Разрешающая способность CXRS измерений и уровень диагностического сигнала напрямую связаны с угловой расходимостью и плотностью частиц диагностического пучка, соответственно. В связи с этим, принципиально важной является задача обеспечения высоких показателей таких параметров пучка, как его полное энергосодержание, плотность в области мишени, малая расходимость, высокое содержание компоненты с полной энергией. Кроме того, важным является вопрос диагностики и контроля данных параметров.

Диссертация была подготовлена в Институте ядерной физики совместно с Институтом физики плазмы Исследовательского центра Юлих (Германия). Вклад обоих институтов в выполнении данной работы был соразмерным и равноценным. В Институте ядерной физики была проведена разработка многоцелевой ИОС инжектора и дугового источника плазмы, производство нового дугового генератора было выполнено на экспериментальном производстве ИЯФ. Щелевые электроды были изготовлены в Германии по конструкторской документации, составленной в НКО ИЯФ. Оптические диагностики были подготовлены и запущены в Институте физики плазмы в Юлихе. Испытания модернизированного инжектора и оптические исследования пучка были проведены в Юлихе в реальных рабочих условиях токамака TEXTOR. На заключительном этапе была проведена серия измерений температуры и вращения плазмы с помощью CXRS диагностики при обновленной конфигурации пучка RUDI.

## **Цель диссертационной работы**

Целью данной работы является исследование и повышение параметров ионного источника диагностического инжектора атомов водорода RUDI. В 2008 г. было принято решение об очередной модернизации инжектора. Прежде всего, она подразумевала разработку многоцелевой ионно-оптической системы для увеличения полного тока пучка и снижения угловой расходимости (предыдущая версия ИОС имела круглые ячейки с гексагональной структурой, и была рассчитана на ток пучка 2 А). Данный вопрос включал в себя компьютерное моделирование формирования пучка с помощью щелевой элементарной ячейки, тепловые расчеты вариантов геометрии расположения ячеек, производство новой ионно-оптической системы.

Модернизация инжектора, помимо этого, предполагала проектирование нового разрядного элемента источника плазмы с увеличенным тепловым пределом, для обеспечения полной длительности импульса до 8 с, что соответствует максимальному времени работы токамака TEXTOR.

Создание новых диагностик для исследования непосредственно параметров нейтральных пучков также является одной из важных проблем в области плазменных экспериментов. В связи с этим, параллельно с модернизацией источника RUDI была поставлена задача расширить спектр используемого диагностического оборудования для измерения параметров пучка за счет использования оптических диагностик.

## **Личный вклад автора**

Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является основным и определяющим. Им осуществлен анализ геометрии щелевых электродов и проведены компьютерные расчеты их термомеханических деформаций. При его непосредственном участии было выполнено производство, сборка и настройка щелевой ионно-оптической системы инжектора RUDI. Автором был проанализирован дуговой генератор RUDI и проведены термомеханические компьютерные расчеты, на основе которых был создан дуговой генератор с увеличенным временем работы. Автор провел несколько серий исследований пучка с помощью оптических спектральных диагностик, спроектированных им лично. Кроме того, автор принимал самое активное участие в плазменных измерениях на установке TEXTOR при помощи модернизированного пучка RUDI.

## **Научная новизна**

1. Впервые была создана многощелевая фокусирующая ионно-оптическая система со сферической поверхностью ускоряющих электродов. Достигнутое значение угловой расходимости пучка вдоль щелей составило  $0.35^\circ$ .

2. Применение в генераторе плазмы дугового канала с улучшенным теплосъемом обеспечило увеличение длительности разряда до 8 с.

3. Достигнуто повышение уровня диагностического сигнала CXRS более чем в 2 раза. При измерениях ионной температуры плазмы на токамаке TEXTOR и скорости ее вращения временное разрешение составило  $\sim 1$  с (ранее нижний предел составлял 2 – 4 с).

4. Выполнены оптические измерения угловой расходимости компонент пучка в двух направлениях при наблюдении из одной точки.

### **Научная и практическая ценность**

Научная ценность результатов работы состоит в новых возможностях по диагностике плазмы, развитию исследований по УТС и других направлений, использующих атомарные и ионные пучки:

1. Многощелевая ионная оптика будет реализована в следующих проектируемых в ИЯФ инжекторах нейтральных пучков: большой диагностический инжектор RUDI-X для стелларатора Wendelstein-7X, нагревной и диагностический пучки для токамака TCV и других.

2. Дуговой генератор модернизированного источника RUDI является прототипом квазистационарного источника для работы в непрерывном режиме 100 с и более, что актуально в настоящее время, когда строятся установки с многосекундным режимом работы и существует спрос на инжекторы подобной длительности.

3. В новом спектральном диагностическом комплексе пучка RUDI реализована идея универсальной бесконтактной диагностики, с возможностью наблюдения эволюции его основных параметров, что является важным для исследования мощных квазистационарных пучков.

4. В результате экспериментальных исследований на токамаке TEXTOR с модернизированным инжектором RUDI получены уточненные результаты по переносу примесей в плазме.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Разработана многощелевая система формирования пучка с геометрической фокусировкой.
2. Создан дуговой генератор плазмы с увеличенным временем работы (близким к стационарному режиму).
3. Применено спектроскопическое диагностическое оборудование для мониторинга основных параметров атомарного пучка.
4. Значительно увеличен сигнал комплекса CXRS и расширены его диагностические возможности.

## **Апробация работы**

Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно представлялись и докладывались на Международных конференциях по физике (Москва, 2008; Грайфсвальд, Германия, 2009), Международных конференциях по ионным источникам (Гатлинбург, США, 2009; Джардини, Италия, 2011), Международной конференции по открытым магнитным системам для удержания плазмы (Новосибирск, 2010), Международной летней школе по физике плазмы (Хербемонт, Бельгия, 2009), Международному совещанию по установкам для исследования взаимодействия плазмы с поверхностью (Юлих, Германия, 2011).

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, разбитых на параграфы, и заключения. Текст диссертации содержит 115 страниц, 91 рисунок и 7 таблиц. В конце диссертации приведен список литературы из 34 названий.

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** представлен краткий экскурс о роли атомарных пучков в экспериментах по управляемому термоядерному синтезу, указана актуальность использования специализированных диагностических пучков для исследования плазмы, поставлена задача модернизации инжектора RUDI для активной корпускулярной диагностики плазмы на токамаке TEXTOR; сформулированы основные цели диссертационной работы и приведено краткое по главам изложение основных результатов работы.

**В первой главе** приведено описание диагностического инжектора RUDI. Представлен плазменный генератор с компактным разрядом на основе полого накаливаемого катода, в сравнении с предшествующей версией источника на базе высокочастотного разряда. Показана ионно-оптическая система.

Инжектор RUDI (Russian Diagnostic Injector) был создан для активной корпускулярной диагностики CXRS на токамаке TEXTOR. В соответствии с требованиями диагностического комплекса инжектор был спроектирован для создания пучка атомов водорода энергией 50 кэВ и эквивалентным током нейтралов около 1 А. Пучок быстрых атомов инжектируется в плазму радиально в экваториальной плоскости. Ниже приведены основные параметры диагностического водородного пучка RUDI (в скобках указаны параметры после последней модернизации):

- Энергия частиц 50 кэВ;
- Ток ионного пучка 2 (3) А;
- Ток пучка 50 кэВ атомов 1.1 (1.5) А;
- Длительность импульса 4 с (8 с) с модуляцией 50%/50%;
- Фокусное расстояние 4 м;

- Диаметр пучка  $1/e$  (в фокусе) 80 мм (50 × 90 мм);
- Угловая расходимость  $\pm 0.55^\circ$  ( $0.35^\circ \times 0.6^\circ$ ).

Первоначально, для генерации плазмы в нем использовался источник с высокочастотным разрядом. В ходе модернизации в 2006 г. он был замещен дуговым генератором с накаливаемым катодом, что позволило существенно улучшить массовый состав водородного пучка (содержание атомарных ионов с полной энергией с (60 – 70%) до (80 – 85%)), а также исключить влияние ВЧ помех на оборудование, используемое на токамаке.

Схема ионного источника приведена на рис. 1. Он состоит из дугового генератора плазмы, расширительной камеры с магнитной стенкой, и системы формирования пучка.

Все основные элементы источника имеют активное водяное охлаждение. Применение дугового генератора обеспечивает высокое содержание (до 80 – 85%) атомарных ионов  $H^+$  в производимой плазме, что является важным фактором для CXRS диагностики, поскольку уровень диагностического сигнала определяется содержанием в пучке фракции ионов с полной энергией.

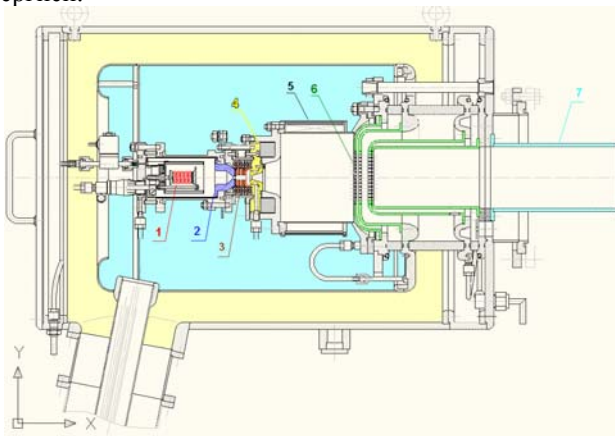


Рис. 1. Схема ионного источника RUDI.

1 – термокатод, 2 – плавающий электрод, 3 – дуговой канал, 4 – анод, 5 – расширительная камера с магнитной стенкой, 6 – ионно-оптическая система, 7 – нейтрализатор.

Для ускорения и формирования диагностического пучка RUDI используется четырехэлектродная ионно-оптическая система. В данной сеточной системе реализован принцип геометрической фокусировки, то есть полный пучок формируется из множества направленных в точку фокуса элементарных пучков. По этой причине рабочие поверхности сеток имеют сферическую форму с радиусом кривизны, определяющим фокусное расстояние, которое в данном случае составляет 4 м.

Помимо этого, в главу включено краткое описание систем питания инжектора, рассмотрены основные элементы инжекторного объема.

**Вторая глава** посвящена созданию оптических диагностик пучка. В рамках модернизации инжектора, для измерения и контроля стабильности ключевых параметров пучка в течение выстрела была разработана система оптических диагностик, включающая в себя:

- многоканальный спектрометр, предназначенный для измерения профилей всех компонент пучка, а также определения массового состава на основе анализа смещенных  $H_{\alpha}$  линий;
- спектрометр высокого разрешения для мониторинга поперечных скоростей в пучке по уширениям  $H_{\alpha}$  пиков;
- CCD камера для сканирования оптического профиля пучка с высоким пространственным и временным разрешением.

Для покомпонентного сканирования профиля пучка RUDI был разработан многоканальный спектрометр. Принцип его измерения основывается на Доплеровском смещении спектральных линий соответствующих фракций пучка. В данном случае рассматривается линия излучения водорода  $H_{\alpha}$  ( $\lambda = 656.3$  нм).

В соответствии с требованиями диагностики, при помощи программы ZEMAX-2004 была спроектирована оптическая система эндоскопа, располагаемого внутри инжекторного объема с достаточно близким расположением входной апертуры к оси наблюдаемого пучка, с целью собрать максимум излучаемого света (рис. 2).

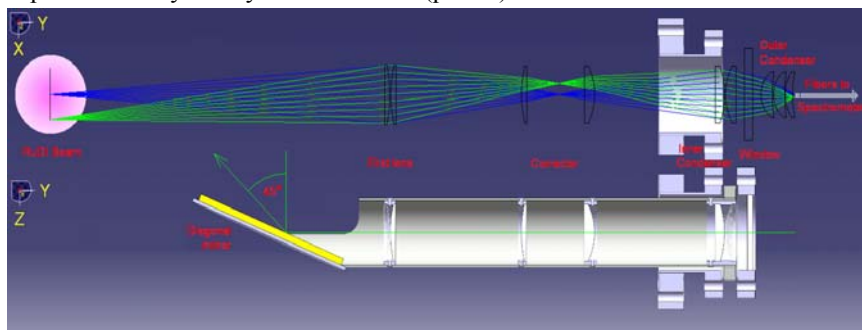


Рис. 2. Оптическая схема эндоскопа.

В качестве приемника использована двумерная CCD матрица. В данном устройстве была реализована возможность отслеживания эволюции массового состава и профиля пучка на протяжении всей длительности импульса. Типичный многоканальный спектр пучка приведен на рис. 3.

Разработанная диагностика распределения поперечных скоростей в пучке RUDI через уширения спектральных линий компонент имеет угол



наблюдения  $5 - 10^\circ$ , и установлена на расстоянии 1.7 м от ионно-оптической системы. Подобные измерения предъявляют жесткие требования к спектраль-

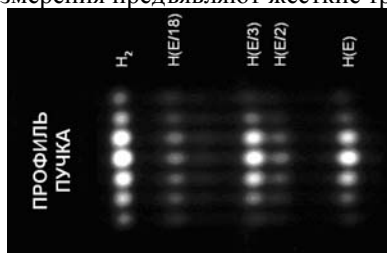


Рис. 3. Исходное изображение профиля спектра пучка RUDI.

ному разрешению диагностического оборудования. Оценки показали, что для измерения угловой расходимости пучка с разрешением  $0.1^\circ$ , требуется спектрометр с разрешением порядка  $\lambda/\delta\lambda \sim 50000$ . Пример измерений уширенных спектральных линий пучка, показан на рис. 4. На основе данного спектра расходимость быстрой компоненты составила  $\sim 0.8^\circ$ .



Рис. 4. Уширение линий, измеренное с разрешением  $\lambda/\delta\lambda = 60000$  для 50 кВ, 2.5 А пучка.

Использование многоканального измерителя спектральных профилей пучка в паре с диагностикой уширения спектральных линий компонент пучка на основе спектрометра высокого разрешения позволило наладить покомпонентные измерения угловой расходимости пучка в двух направлениях при наблюдении из одной точки.

В дополнение к спектральным диагностикам, на инжекторе была использована цифровая CCD камера Allied Vision Tec PIKE 100 для сканирования оптического профиля пучка с высоким пространственным и временным разрешением. Камера установлена в 1.7 м от ИОС.

**Третья глава** описывает ход модернизации инжектора RUDI. Показаны принципы ускорения и формирования пучков быстрых частиц. Описана разработка новой ионно-оптической системы с щелевой геометрией, включающая в себя моделирование формирования пучка и численный анализ деформации электродов на основе компьютерных термомеханических расчетов.

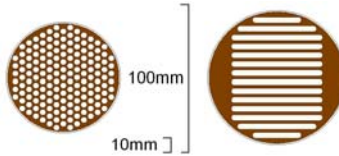


Рис. 5. Сравнение существующей и щелевой геометрии электродов.

Первая версия ионно-оптической системы RUDI (рис. 5), спроектированная с круглыми ячейками диаметром 4мм, была оптимизирована для создания водородного пучка с энергией 50 кэВ и угловой расходимостью  $0.55^\circ$ . Данная величина была обусловлена aberrациями ионной оптики по причине неоднородности электрического поля от центра элементарной апертуры к периферии.

Одним из вариантов формирования пучка с более низкими значениями угловой расходимости является применение щелеобразной геометрии электродов, где угловая расходимость вдоль щелей определяется главным образом поперечной температурой ионов в источнике.

При анализе вариантов щелевой геометрии за основу была взята геометрия круглой элементарной ячейки инжектора RUDI с исходными значениями толщин электродов, фасок и зазоров. Для подтверждения работоспособности щелевой геометрии было проведено трехмерное моделирование формирования пучка одиночной щелевой ячейкой 4мм x 20мм при помощи кода КОBRA-3D, в ходе которого вычислялись значения угловой расходимости как поперек, так и вдоль щели (рис. 6).

Для получения количественной оценки величин тепловых деформаций, на программе ANSYS были проведены тепловые расчеты существующей геометрии ИОС, после чего был проведен анализ возможных вариантов щелевой геометрии.

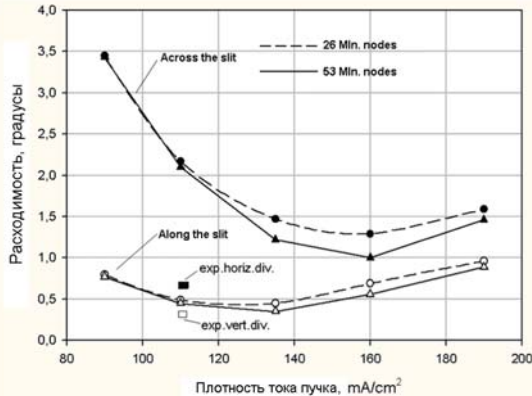


Рис. 6. Согласование трехмерных компьютерных расчетов кода КОBRA-3D с результатами экспериментальных измерений.

Вычисления показали, что оптимальной, в отношении величин продольных и поперечных деформаций, является геометрия с щелями длиной до 60мм, и прозрачностью ~67%.

Геометрия и взаимное расположение электродов ИОС показаны на рис. 7. Согласно результатам тепловых расчетов финальной версии щелевой ИОС, под действием пучка с током 3 А, энергией 50 кэВ и длительностью 8 с, максимальная температура нагрева 287°С достигается на первой сетке, наибольшие деформации вдоль и поперек оси пучка наблюдаются на четвертой сетке и составляют соответственно 0.131 мм и 30.7 мкм.

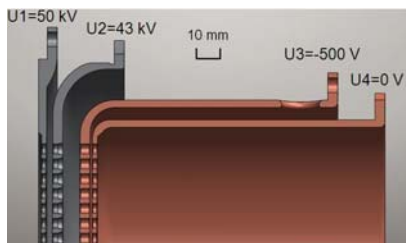


Рис. 7. Расположение электродов 1 – 4 ИОС (слева направо).

В главу включены экспериментальные измерения основных параметров диагностического пучка при помощи созданного оптического оборудования, а также результаты calorimetric measurements. Исследовано поведение пучка при различных настройках дугового генератора, выявлена зависимость расходимости по двум координатам от распределения высоковольтных потенциалов на ускоряющих электродах, проанализирована эволюция параметров пучка в течение импульса.

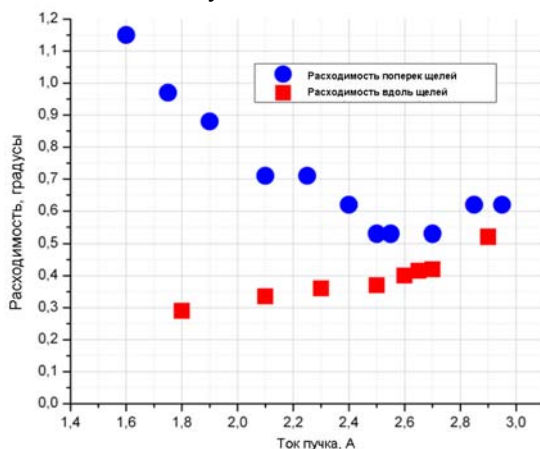


Рис. 8. Сопоставление расходимости пучка вдоль и поперек щелей.

В направлениях вдоль и поперек щелей были измерены спектральные профили пучка, из которых вычислялись значения угловой расходимости для всех его компонент. Помимо этого, в направлении поперек щелей  $H_{\alpha}$  спектр пучка был исследован с высоким ( $\lambda/\delta\lambda = 60000$ ) спектральным разрешением, что на основе анализа уширенных спектральных линий позволило восстановить расходимости компонент пучка из измеренных значений поперечных скоростей в пучке.

В соответствии со свойствами щелевой ионной оптики, угловая расходимость пучка вдоль и поперек щелей имеет различные значения. Это наглядно продемонстрировано на сканах расходимости для 45 кэВ пучка (рис. 8). В направлении вдоль щелей пучок, как ожидалось, имеет пониженный уровень расходимости по сравнению со случаем наблюдения поперек щелей, или с предыдущей версией ИОС RUDI с круглыми отверстиями, поскольку в формирующей структуре вдоль щели практически отсутствуют aberrации, связанные с неоднородностью электрического поля.

Представлены варианты усиленного разрядного канала плазменного источника, для увеличения времени импульса до 8 с (рис. 9). Приведены несколько вариантов его конструкции, разработанные на основе компьютерного моделирования дугового разряда и его влияния на элементы канала.

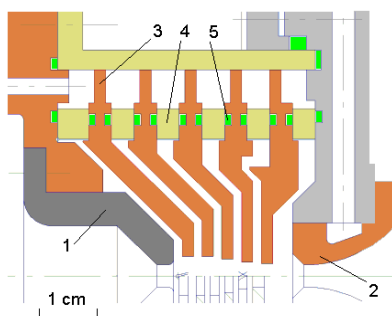


Рис. 9. Разборная версия дугового канала с витоновыми уплотнениями.

1 – катодная вставка, 2 – анод, 3 – диафрагмы, 4 – изоляторы, 5 – уплотнительное кольцо.

С помощью программы ANSYS были проведены тепломеханические вычисления нескольких версий оптимизированного дугового канала с увеличенной теплоемкостью. Помимо усиления диафрагм разрядного канала, были приняты меры по снижению нагрузок на анод, в частности, проведено компьютерное моделирование приложенных на него тепловых нагрузок, а также исследование распределения магнитного поля в его области с помощью программы SAM. Для распределения падающей мощности по внутренней поверхности анода, для нее была выбрана новая форма, повторяющая по форме силовые линии магнитного поля катушки магнитной изоляции.

Кроме того, рассмотрена проблема вакуумных условий в инжекторном объеме и нейтрализации ионов пучка в перезарядной трубе. Для новой геометрии нейтрализатора рассчитан газонапуск, обеспечивающий равновесную плотность мишени.

**Четвертая глава** содержит краткий обзор диагностических методов на основе нейтральных пучков. Приведено описание спектроскопического комплекса CXRS на токамаке TEXTOR, с пояснением его основных диагностических принципов; описаны оптические системы наблюдения. В главу включены примеры CXRS измерений распределения температуры ионной компоненты вдоль малого радиуса токамака, и профили скоростей полоидального вращения плазмы, проведенных в новой конфигурации диагностического инжектора RUDI.

При усреднении по всему 6 с импульсу достигнутая точность измерений ионной температуры плазмы составила около 3 эВ в районе границы со стенкой, скорость вращения плазмы была измерена с точностью 0.5 км/с. Необходимо отметить, что все экспериментальные данные CXRS являются надежным подтверждением теоретических предсказаний и демонстрируют хорошую стабильность измерений даже при усреднении на коротких интервалах (порядка 1 с). Представленные результаты свидетельствуют о более чем двукратном росте диагностического сигнала после проведенной модернизации инжектора.

**В заключении** представлены основные результаты и выводы диссертации.

### **Основные результаты работы**

Основу настоящей диссертации составили разработка щелевой ионно-оптической системы диагностического инжектора RUDI, исследования по продлению времени работы плазменного генератора, создание новых диагностик пучка, выполненные в рамках модернизации инжектора:

1. Рассчитана, изготовлена и испытана фокусирующая ионно-оптическая система с многощелевой геометрией элементарных формирующих ячеек. В результате полный ток ионов увеличен до 3 А, угловая расходимость пучка в направлении вдоль щелей снижена до 0.35°.

2. Разработана и испытана конструкция разрядного канала с увеличенной длительностью импульса до 8 с для обеспечения диагностических измерений плазмы на протяжении всего выстрела токамака TEXTOR.

3. На разработанном спектроскопическом оборудовании проведены измерения угловой расходимости пучка RUDI в двух направлениях и ее временной эволюции, а также массового состава пучка.

4. Увеличение тока пучка и снижение угловой расходимости привели к двукратному росту диагностического сигнала CXRS. Диагностический пучок RUDI в новой конфигурации обеспечивает стабильные измерения скорости

вращения плазмы и ионной температуры на токамаке TEXTOR с временным разрешением порядка 1 с.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

1. А.А. Листопад. «Исследование распространения газовых потоков в инжекторном тракте при импульсном газонапуске». // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов-2008". Секция "Физика": Сборник тезисов. // М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2008, с. 133.
2. A.A. Listopad, J.W. Coenen, B. Schweer, V.I. Davydenko, and A.A. Ivanov. "Diagnostics for optical measurements of RuDI neutral beam parameters". // DPG Frühjahrstagung 2009, Greifswald, Germany. Published online at: <http://www.dpg-verhandlungen.de/2009/greifswald/p3.pdf>
3. A.A. Listopad, J. W. Coenen, V.I. Davydenko, P.P. Deichuli, A.A. Ivanov, V.V. Mishagin, V.Ya. Savkin, W. Schalt, B. Schweer, G.I. Shul'zhenko, N.V. Stupishin, R. Uhlemann. Operation and upgrade of diagnostic neutral beam injector RUDI at TEXTOR tokamak. // Rev. Sci. Instrum., Vol. **81**, Issue 2, 02B104 (Feb, 2010); ISSN: 0034-6748.
4. A. Listopad, V. Davydenko, S. Freutel, A. Ivanov, B. Schweer, M. Zlobinski. Characterization of RUDI neutral beam parameters by optical diagnostics. // Fusion Science & Technology, Vol. **59**, Number 1T, FUSTE8 (2) 1-324 (2011) ISSN: 1536-1055.
5. А.А. Листопад, В.И. Давыденко, А.А. Иванов, В.В. Мишагин, Р. Улеманн, Б. Швееер. Многощелевая четырехэлектродная ионно-оптическая система для формирования диагностического пучка быстрых атомов. // Препринт ИЯФ 2012-6.
6. A. Listopad, J. Coenen, V. Davydenko, A. Ivanov, V. Mishagin, V. Savkin, B. Schweer, G. Shul'zhenko, R. Uhlemann. Use of the focusing multi-slit ion optical system at RUSSIAN Diagnostic Injector (RUDI). // Rev. Sci. Instrum., Vol. **83**, Issue 2, 02B707 (Feb, 2012); ISSN: 1089-7623.

ЛИСТОПАД Александр Алексеевич

**Диагностический атомарный инжектор  
с многоцелевой системой формирования пучка**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 23.04. 2012 г.

Подписано в печать 24.04. 2012 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 0.8 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 9

---

Обработано на РС и отпечатано  
на ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,  
*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*