

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра **ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ**

Направление подготовки **03.03.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **БАКАЛАВРИАТ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Воинцев Вадим Александрович

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы: Исследование параметров высокочастотного плазменного эмиттера нагревного инжектора атомарного пучка и измерение параметров пучка

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

ученая степень, звание

должность, место работы

...../
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Научный руководитель

к.ф.-м.н.

ИЯФ СО РАН

Шиховцев И. В. /.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 2020

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Описание и принцип работы атомарного инжектора	5
Глава 2. Исследование ВЧ плазменного эмиттера.....	8
2.1 Описание плазменного эмиттера.....	8
2.2. Измерение распределения плотности плазмы.....	10
2.2.1. Описание установки.....	10
2.2.2. Методика измерений ионного тока насыщения и получение распределения по радиусу и азимуту эмиттера.....	12
2.2.3. Анализ распределения плотности плазмы.....	13
2.3. Нахождение оптимального давления	14
Глава 3. Основные параметры атомарного пучка	16
3.1. Фокусное расстояние, профили и угловая расходимость пучка.....	16
3.1.1. Зависимость размера пучка от фокусного расстояния и угловой расходимости.....	16
3.1.2. Измерения профиля пучка.....	17
3.1.3. Расчет угловой расходимости и фокусного расстояния	21
3.2. Массовый состав пучка	22
3.2.1. Процессы, влияющие на состав пучка	22
3.2.2. Использование смещенных линий спектра пучка для расчета массового состава.....	23
3.2.2. Анализ спектра и массового состава пучка	25
Заключение	27
Список литературы	28

Введение

Современные инжекторы нейтралов используют для нагрева и диагностики термоядерной плазмы, в терапии рака, инъекции частиц в ускорители и многих других разделов науки и техники. В Институте ядерной физики им.Г.И.Будкера СО РАН уже много лет разрабатываются инжекторы нейтралов для диагностики и нагрева плазмы в термоядерных установках [1]. В последнее время ведется разработка инжекторов для нагрева плазмы в токамаках TCV (Швейцария) и ST-40 (Англия) с энергией пучка в 55 кэВ и для установки COMPASS-D (Чехия) с энергией в 80 кэВ. Длительность инъекции установок не превышает двух секунд.

Источником плазмы для данных атомарных нагревных инжекторов служит плазменный эмиттер. Плазменным эмиттером является высокочастотный (ВЧ) газовый разряд (в водороде или дейтерии [2]), из которого при помощи конструкции из электронооптических электродов (ионно-оптической системы) вытягиваются и ускоряются атомарные (в основном протоны или дейтоны) и различные молекулярные положительные ионы.

Важным параметром плазменных эмиттеров является распределение плотности ионного тока на границе с ионно-оптической системой (ИОС), знание которого необходимо для правильного моделирования и изготовления ИОС. Неоднородность распределения не должна превышать 20%. Плотность плазмы в основном зависит от размеров и формы самого эмиттера, давления и вида напускаемого в эмиттер газа [3], а также магнитного поля, создаваемого магнитопроводом, установленного в эмиттере для повышения эффективности генерации плазмы.

Конфигурация магнитного поля зависит от количества и расположения установленных в магнитопроводе постоянных магнитов. Удаление части магнитов из магнитопровода приводит к улучшению проникновения магнитного поля в плазму, но при этом вызывает увеличения неоднородности магнитного поля.

Одной из основных целей в данной работе было изучение плазменного эмиттера: исследование влияния изменения конфигурация магнитного поля на азимутальное распределение плотности плазмы и нахождения оптимального давления напускаемого газа.

Также в данной работе была поставлена задача провести эксперименты на нагревном инжекторе с плазменным эмиттером, имеющим такую же магнитную конфигурацию, по созданию атомарного пучка и исследованию его основных параметров: тока пучка, распределения и размера пучка на выходе инжектора, фокусного расстояния, массового состава и угловой расходимости.

Глава 1. Описание и принцип работы атомарного инжектора

Основными компонентами инжектора нейтральных частиц (Рис.1) являются: ионный источник, нейтрализатор с диафрагмой, отклоняющий магнит, приемник ионов и калориметр.

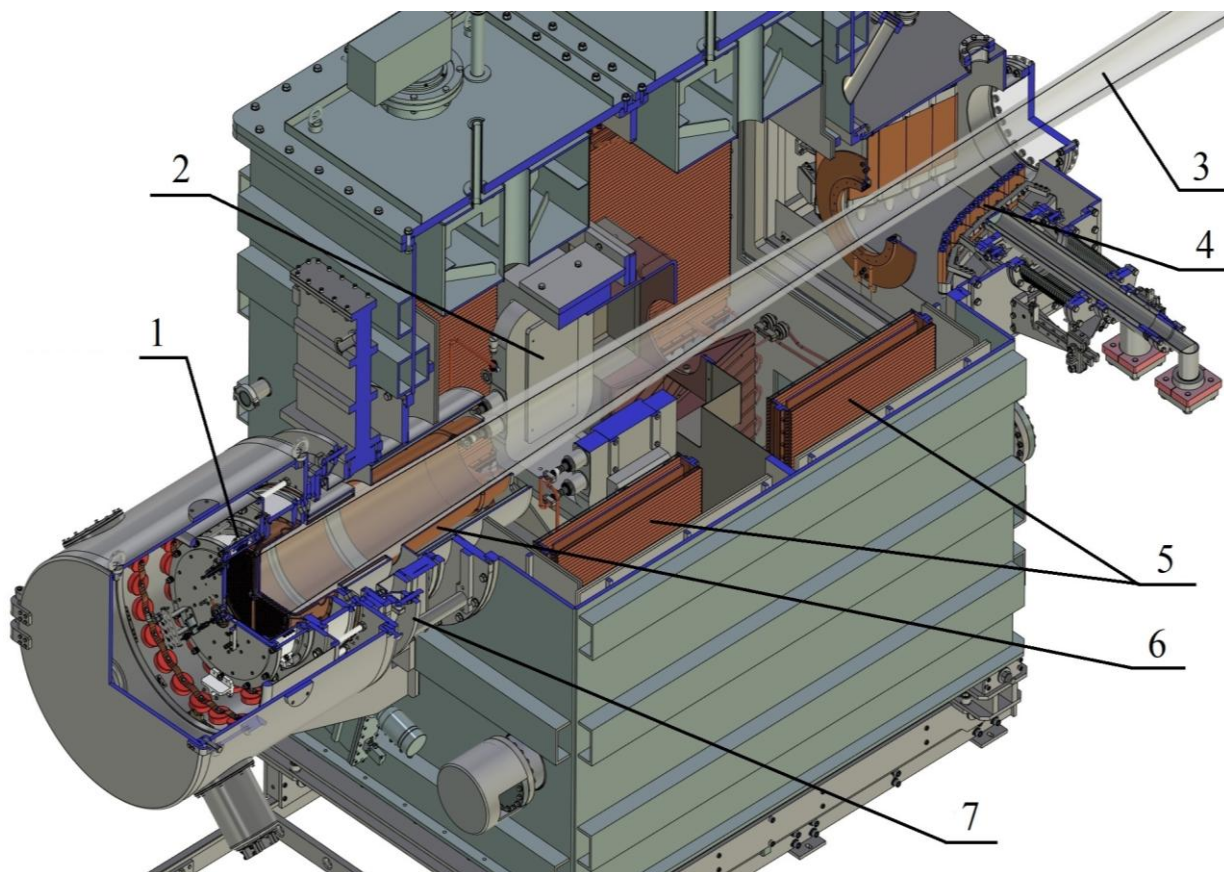


Рис.1 Общая схема атомарного инжектора: 1 – ВЧ – плазменный эмиттер, 2 – отклоняющий магнит, 3 – атомарный пучок, 4 – калориметр, 5 – криопанели, 6 – нейтрализатор, 7 – юстированное устройство.

Формирование пучка нейтральных частиц в инжекторе начинается с ионизации рабочего газа (водорода или дейтерия) и формирования плазмы в эмиттере. Положительно заряженные частицы вытягиваются из эмиттера и ускоряются при помощи ИОС - системы из нескольких медных электродов с щелевыми или круглыми отверстиями (Рис.2). В данной работе измерения проводились с ИОС, имеющей круглые отверстия.

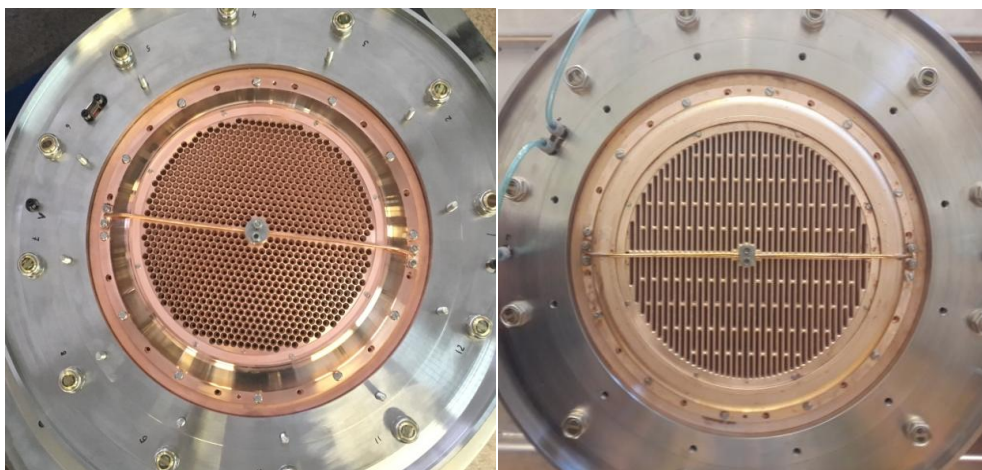


Рис.2 Первые сетки ИОС с круглыми (слева) и с щелевыми (справа) отверстиями.

ИОС может состоять как из 3-х (Рис.3) так и из 4-х электродов. В 3-х электродной системе первый электрод находится под высоким положительным потенциалом, соответствующим энергии пучка [4]. Второй – под небольшим (до нескольких сотен вольт) отрицательным потенциалом для запираания вторичных электронов из нейтрализатора. Третий электрод заземлен.

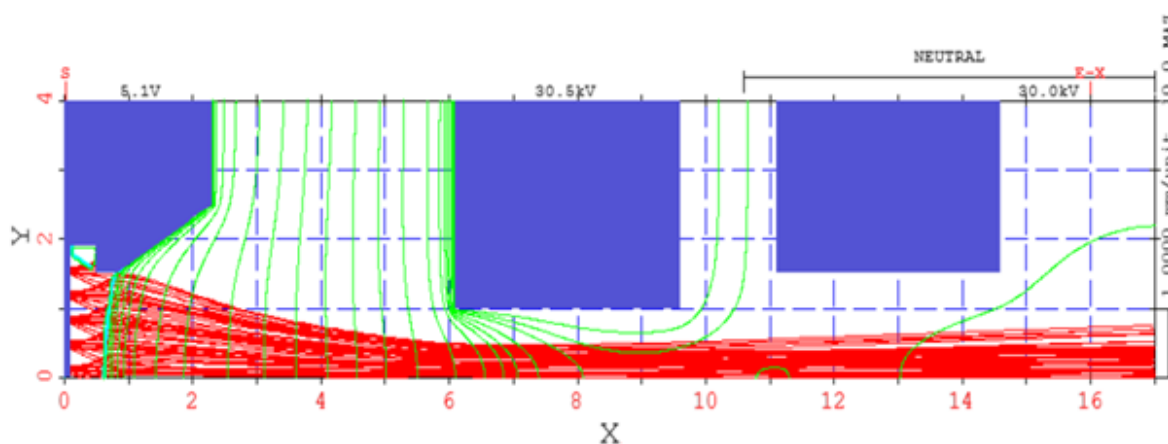


Рис.3 Пример геометрия элементарной ячейки 3-х электродной ИОС. Зеленым цветом обозначены эквипотенциали электрического поля, красным - траектории частиц вытягиваемого пучка.

В 4-х электродной системе между плазменным и запирающим расположен еще один электрод под высоким потенциалом – вытягивающий. Вытягивающий электрод представляет собой фокусирующую линзу, а запирающий - дефокусирующую. С помощью 4-х электродных ИОС можно сформировать атомарные пучки, имеющие угловую расходимость $< 1^\circ$ [5].

Нейтрализатор ионного пучка выполнен в виде газовой мишени из трубы, в которую при помощи импульсного клапана напускается рабочий газ (такой же, как в плазменную камеру). Часть ионов пучка (при энергии пучка в 50 кэВ около половины), проходя через мишень, за счет процессов ионизации, диссоциации, перезарядки нейтрализуется.

Ионы, не прошедшие нейтрализацию, после газовой мишени при помощи магнита отклоняются в приемник ионов, состоящий из двух медных пластин, соединенных в форме буквы V. Атомарные частицы по пучковому тракту дальше инжектируются в экспериментальную установку.

На выходе инжектора установлен калориметр - приемник нейтральных частиц, представляющий собой набор медных пластин с каналами охлаждения. В тестовом режиме принимает пучок на пластины для измерения его профиля. Когда пучок должен пройти в установку, с помощью электропривода крылья калориметра раздвигаются в стороны, тем самым давая пучку пройти сквозь калориметр.

Глава 2. Исследование ВЧ плазменного эмиттера

2.1 Описание плазменного эмиттера

Плазменный эмиттер, исследуемый в данной работе (Рис.4) представляет собой камеру с керамической цилиндрической боковой поверхностью длиной 12 см и диаметром 36 см. Керамика уплотнена на кольцевой фланец, с помощью которого плазменная камера стыкуется с ионно-оптической системой.

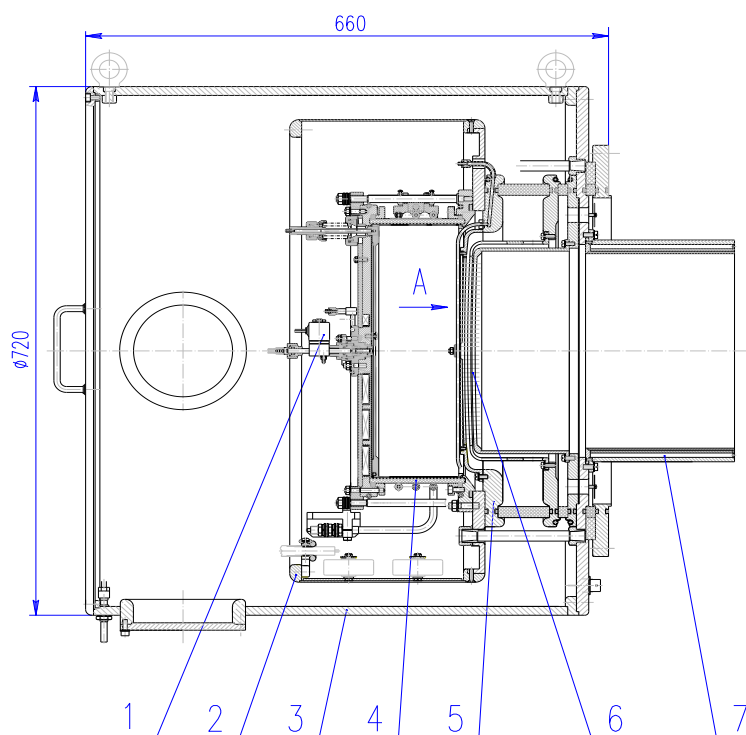


Рис. 4 Схема ВЧ ионного источника: 1- клапан напуска газа и узел поджига, 2 - электростатический экран, 3 – корпус – магнитный экран (защита от внешнего магнитного поля), 4 - плазменная камера, 5 – изоляторный узел, 6 - электроды ИОС, 7 - нейтрализатор.

Внутри камеры вставлен медный цилиндрический экран для защиты керамики от плазмы (Рис.5). Снаружи эмиттера установлена ВЧ антенна – три витка, намотанные медной трубкой диаметром 6 мм, снаружи которой надета термоусаживаемая трубка. На задней стенке эмиттера расположен фланец, в центр которого установлен узел поджига разряда. Через узел при помощи электромагнитного клапана в камеру подается газ.



Рис. 5 ВЧ плазменный эмиттер. Слева – вид внутри, справа – вид снаружи: 1 – антенна, 2 – клапан и узел поджига.

Во фланец эмиттера также установлен магнитопровод с постоянными магнитами, схема расположения которых показана на Рис.6. Поле от данных магнитов проваливается внутрь плазменной камеры и способствует уменьшению потери плазмы на заднюю стенку эмиттера, а также повышению эффективности разряда. Изменения конфигурации магнитного поля за счет удаление части магнитов из магнитопровода улучшает проникновение поля в плазму и усиливает неоднородность поля.

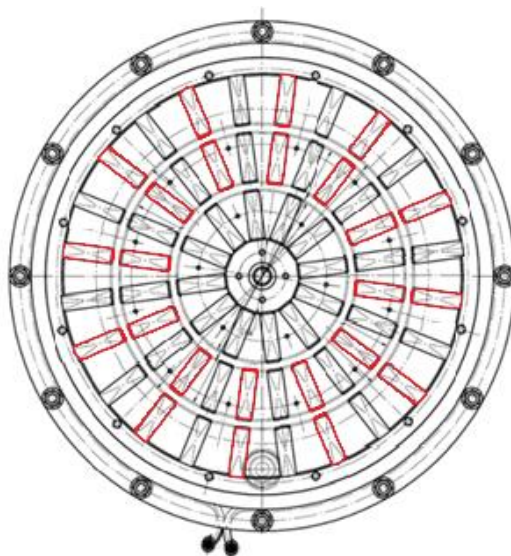


Рис.6 Схема расположения постоянных магнитов на задней стенке эмиттера. Красным выделены магниты, которые были убраны в данной работе.

Для ионизации напускаемого газа на электроды поджига подается высоковольтный импульс. В результате подачи импульса по поверхности изолятора, представляющего собой цилиндрическую трубку с внутренним диаметром 4 мм, происходит пробой.

Для поддержки плазменного разряда на антенну подается ВЧ напряжение с частотой 4 МГц. Ток в антенне создает вихревое магнитное поле, индуцирующее азимутальное электрическое поле [6].

2.2. Измерение распределения плотности плазмы

2.2.1. Описание установки

Для проведения исследования распределения плотности ионного тока насыщения эмиттер был подсоединен к объему, в котором поддерживался высокий вакуум (Рис.7).

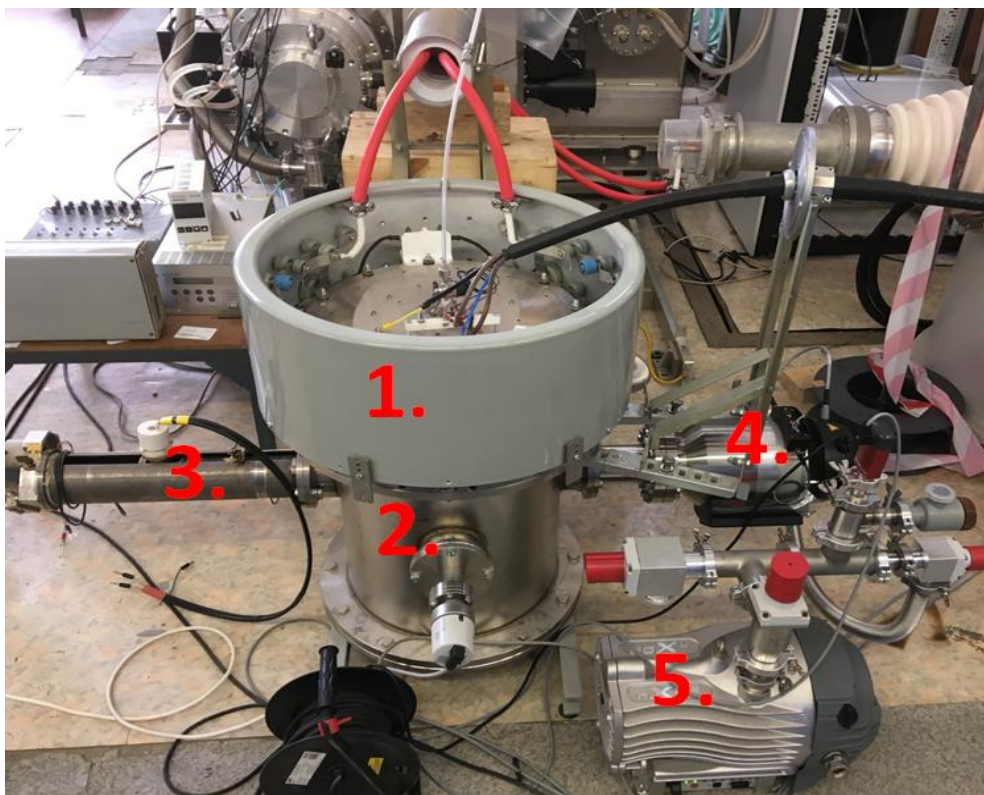


Рис.7 Экспериментальная установка: 1 – ВЧ плазменный эмиттер, 2 – вакуумный объем, 3 – шаговый двигатель, 4 – турбомолекулярный насос, 5 – спиральный насос.

Измерения ионного тока насыщения проводились с использованием сеточного зонда (Рис. 8).

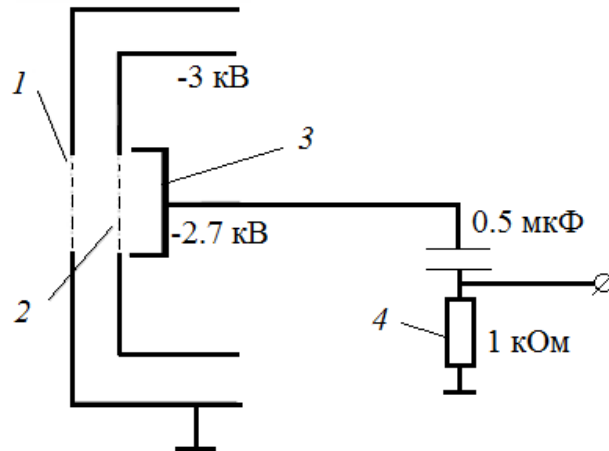


Рис.8 Упрощенная схема сеточного датчика; 1 – входное отверстие, 2 – запирающий электрод, 3 – коллектор, 4 - шунтовое сопротивление.

Сеточный зонд состоит из принимающего ионы коллектора, и двух электродов сеточного типа. Находящийся под отрицательным потенциалом (-2.7 кВ) коллектор извлекает ионы из эмиттера. Сетка, установленная перед коллектором, находится под напряжением -3 кВ и является запирающей – она не позволяет покинуть коллектор электронам, образовавшимся в результате вторичной эмиссии на его поверхности при падении на него частиц. К шунтовому сопротивлению 1 кОм, отвязанному по потенциалу от коллектора с помощью конденсатора, был подключен осциллограф.

Во время проведения эксперимента зонд был расположен на выходе плазменного эмиттера на прикрученном к штоку шагового двигателя кронштейне (Рис.9). Между зондом и эмиттером была установлена эмитирующая плазменный электрод ИОС металлическая пластина, имеющая по диаметру три щели.

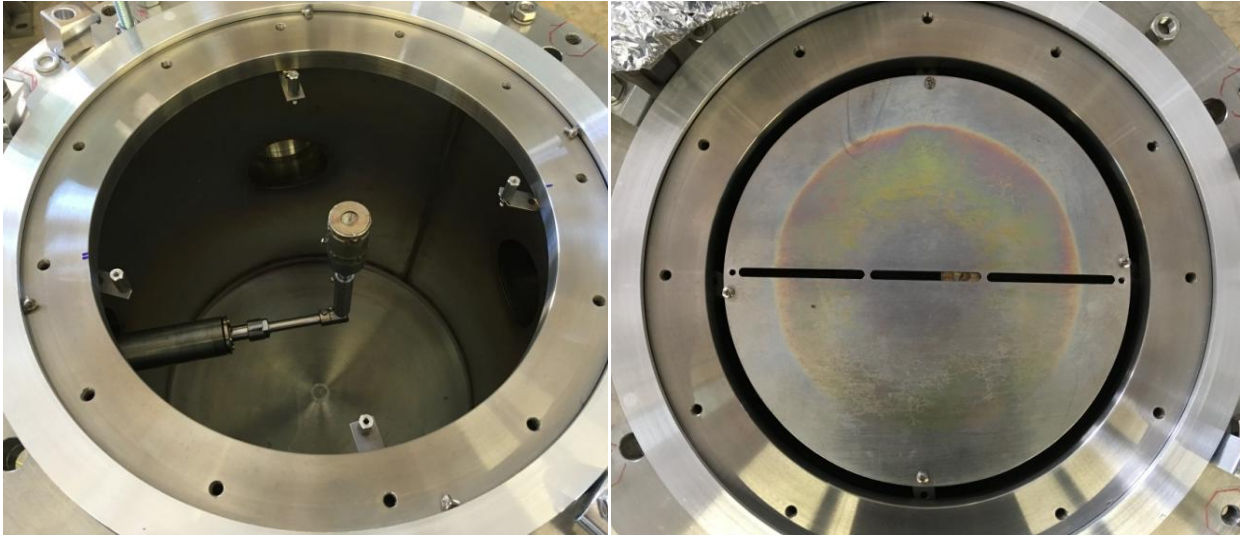


Рис.9 Сеточный зонд на штоке шагового двигателя с металлической пластиной перед ним (справа) и без пластины (слева).

2.2.2. Методика измерений ионного тока насыщения и получения распределения по радиусу и азимуту эмиттера

Во время измерения распределения плотности ионного тока насыщения сеточный зонд перемещался по радиусу плазменной камеры. Для получения азимутальной зависимости распределения при каждом новом измерении по радиусу магнитопровод эмиттера поворачивался на 15° .

Расчет плотности тока насыщения перед зондом проводился по следующей формуле:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{U}{R \cdot S}, \quad (1)$$

где I и U – ток и напряжение на шунте сопротивлением R , а $S \approx 1.3 \text{ мм}^2$ - эффективная площадь отверстия датчика (с учетом прозрачности). Напряжение на шунте измерялось с помощью подключенного к нему осциллографа (Рис.10)

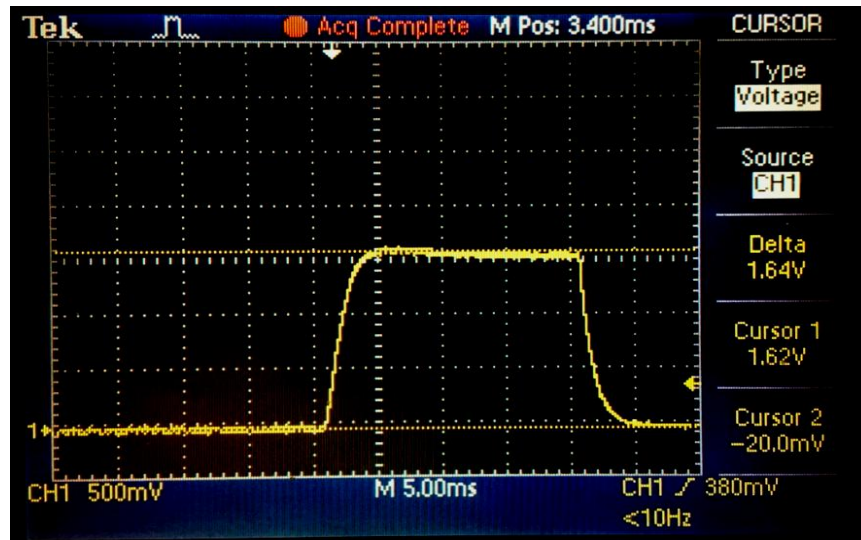


Рис.10 Пример сигнала на осциллографе, полученного с шунтового сопротивления.

Измерения проводились при импульсах длительностью 35 мс с подачей на антенну ВЧ напряжения амплитудой 7.5 кВ и напуском водорода при давлении перед клапаном в 0.5 атм.

2.2.3. Анализ распределения плотности плазмы

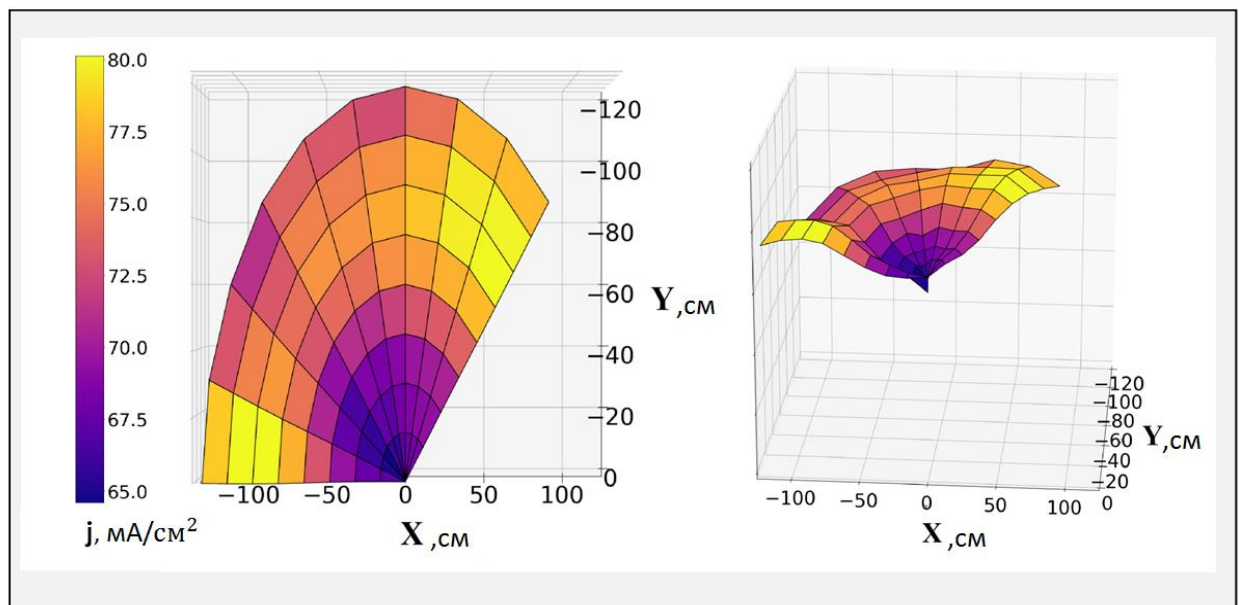


Рис.11 Азимутальная зависимость распределения плотности ионного тока насыщения (j) в двух проекциях. X и Y - декартовы координаты зонда относительно центра плазменного эмиттера.

Полученные в результате измерений (Рис.11) распределения по радиусу эмиттера имеет небольшую неоднородность - по периферии плотность ионного тока растет, а вблизи центра падает. Одной из главных причин наблюдаемого увеличения ионного тока вблизи границ может являться размер самого эмиттера - на периферии напряженность индуцируемого антенной электрического поля выше и, соответственно, выше поглощаемая ВЧ разрядом мощность.

Изменение конфигурации магнитного поля не привело к возникновению сильных азимутальных неоднородностей распределения ионного тока. Хотя азимутальные неоднородности тоже присутствуют, они, как видно из графика, незначительны, особенно в сравнении с неоднородностью по радиусу эмиттера.

2.3. Нахождение оптимального давления

Величина ионного тока пучка также зависит от давления напускаемого рабочего газа [2]. Эксперименты по нахождение оптимального давления, при котором достигается максимальный ток пучка, проводились на инжекторе (Рис.12).



Рис.12 Инжектор с плазменным эмиттером, закрытым магнитным и электростатическим экранами.

Измерение тока ионного пучка осуществлялось при помощи шунтового сопротивления, находящегося в земляной цепи системы высоковольтного питания ИОС. При каждом новом измерении тока давление напуска газа увеличивалось на пол атмосферы. Напряжение на антенне эмиттера оставалось постоянным и составляло 7 кВ.

По результатам экспериментов (Рис.13) максимальный ток 24.5 А был достигнут при давлении, равном 2.5 атм.

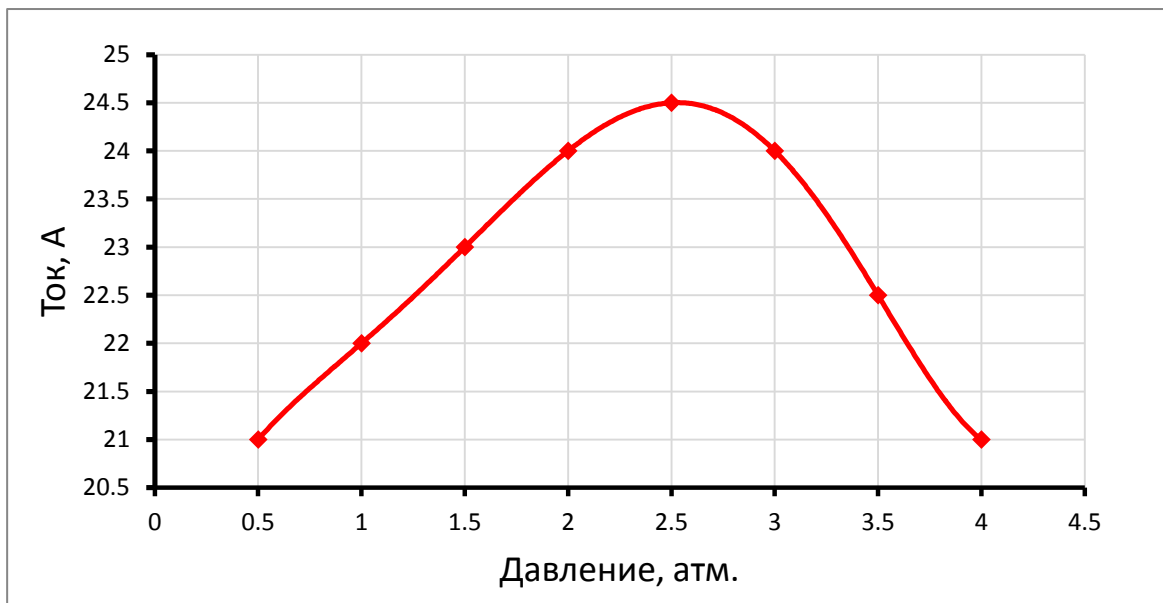


Рис.13 Зависимость тока пучка от давления, под которым производился напуск рабочего газа в плазменный эмиттер.

Глава 3. Основные параметры атомарного пучка

3.1. Фокусное расстояние, профили и угловая расходимость пучка

3.1.1. Зависимость размера пучка от угловой расходимости и фокусного расстояния

Угловая расходимость и фокусное расстояние - одни из важнейших параметров пучка. Данными параметрами определяется поперечный размер пучка, от которого, в частности, зависят потери частиц пучка на столкновения со стенками пучкового тракта.

Радиус пучка в первом приближении зависит от его угловой расходимости α :

$$R \approx \alpha z, \quad (2)$$

где R - радиус, z - расстояние от места измерения радиуса пучка до ионного источника.

На величину угловой расходимости в основном влияют такие факторы, как форма и положение границы плазмы, температура плазмы (ионы с температурой T обладают поперечным импульсом $\sim \sqrt{kT}$), а также эффекты, связанные с оптическими aberrациями, которые зависят от формы и толщины электродов ИОС. Немаловажным фактором является и пространственный заряд пучка - перед входом в нейтрализатор пучок состоит из положительно заряженных ионов. В частности, угловая расходимость зависит от силы тока пучка.

С учетом фокусного расстояния f выражение для R можно записать в следующей форме:

$$R \approx \sqrt{(\alpha z)^2 + b^2 \left(1 - \frac{z}{f}\right)^2}, \quad (3)$$

в данной формуле $b = 12.5$ см - радиус сетки ИОС.

Зная угловую расходимость и фокусное расстояние, можно получить зависимость радиуса пучка от расстояния до ИОС.

Чтобы вычислить параметры угловой расходимости и фокусного расстояния можно провести измерения профиля пучка при двух разных расстояниях от ИОС (z_1 и z_2). Тогда по данным измерений (R_1 и R_2) можно построить систему из двух уравнений (4) с двумя неизвестными: α и f .

$$\begin{cases} R_1^2 = (\alpha z_1)^2 + b^2 \left(1 - \frac{z_1}{f}\right)^2 \\ R_2^2 = (\alpha z_2)^2 + b^2 \left(1 - \frac{z_2}{f}\right)^2 \end{cases} \quad (4)$$

3.1.2. Измерения профиля пучка

Для получения профилей пучка была использована система из 19 вторично-эмиссионных датчиков, установленных на выходе инжектора за калориметром (Рис.14).

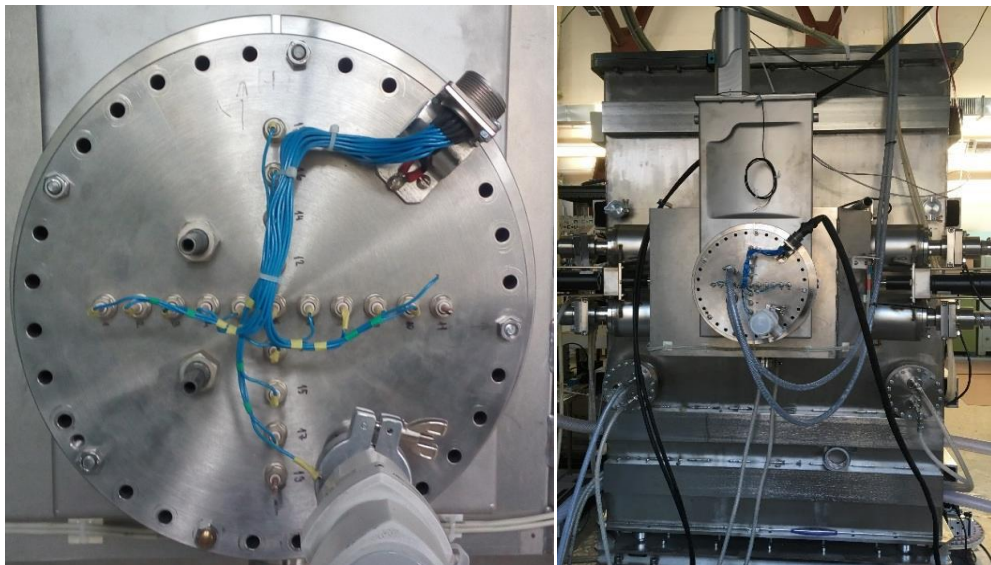


Рис.14 Вторично-эмиссионные датчики, установленные за калориметром инжектора.

Детекторы были расположены на фланце в форме креста. Получаемые с датчиков данные отображались в виде профилей пучка в двух

перпендикулярных направлениях X и Y (Рис.15). Также на графике была показана аппроксимация профилей при помощи Гауссова распределения:

$$I = I_0 e^{-\frac{(x-x_0)^2}{r^2}},$$

где x_0 - смещение пучка относительно центра датчиков, I_0 - ток в центре пучка, r - его радиус. Радиус в данной работе оценивался по уровню экспоненты.

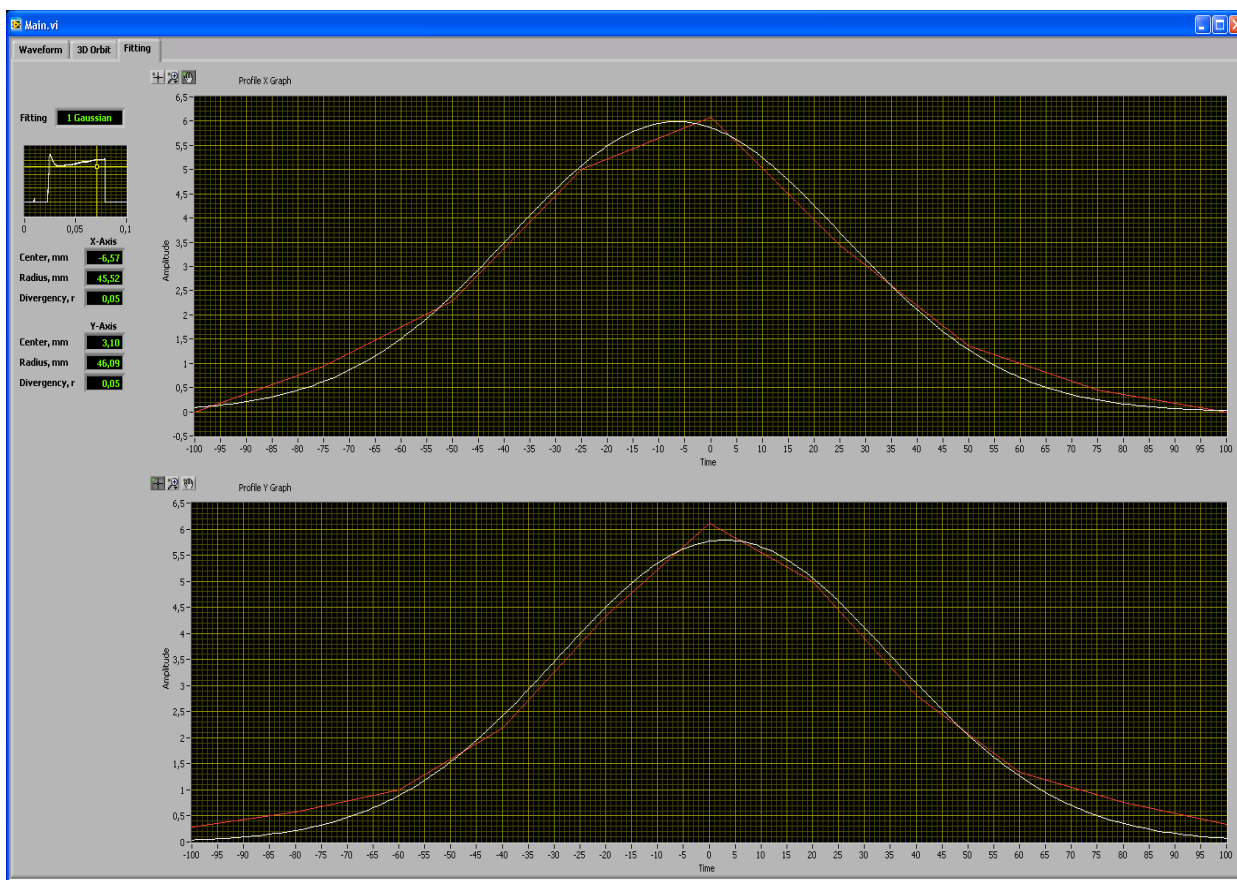


Рис.15 Пример профилей пучка с радиусами 45.5 мм по горизонтали (X) и 46 мм по вертикали (Y). Красные линии – экспериментальные данные, белые – распределения Гаусса.

Как обсуждалось выше, угловая расходимость и, соответственно, размеры пучка существенно зависят от тока пучка. С целью нахождения оптимального тока, при котором достигается минимальный размер пучка, измерения профиля проводились при разных токах пучка. Ток пучка менялся

путем регулировки подачи напряжения на антенну эмиттера (от напряжения зависит количество генерируемой в эмиттере плазмы).

Чтобы оценить угловую расходимость и фокусное расстояние (4), измерения профиля от тока проходили при двух разных положениях датчиков: $z_1 = 2.84$ м и $z_2 = 3.4$ м до ионного источника.

Измерения профиля пучка были проведены с использованием как водорода (Рис.16), так и дейтерия (Рис.17) в качестве рабочего газа.

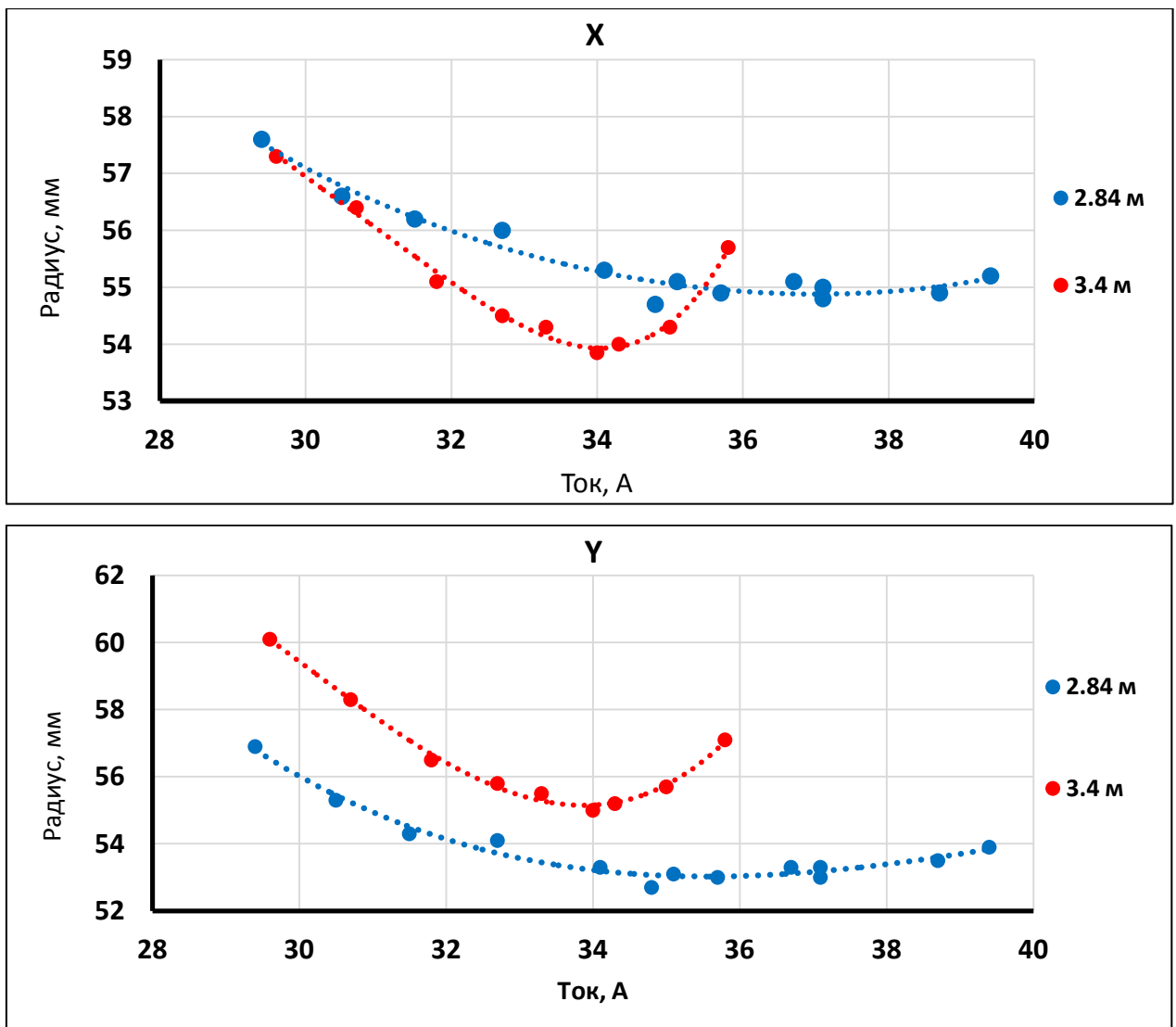


Рис.16 Зависимости размеров водородного пучка от тока пучка при двух различных положениях вторично-эмиссионных датчиков.

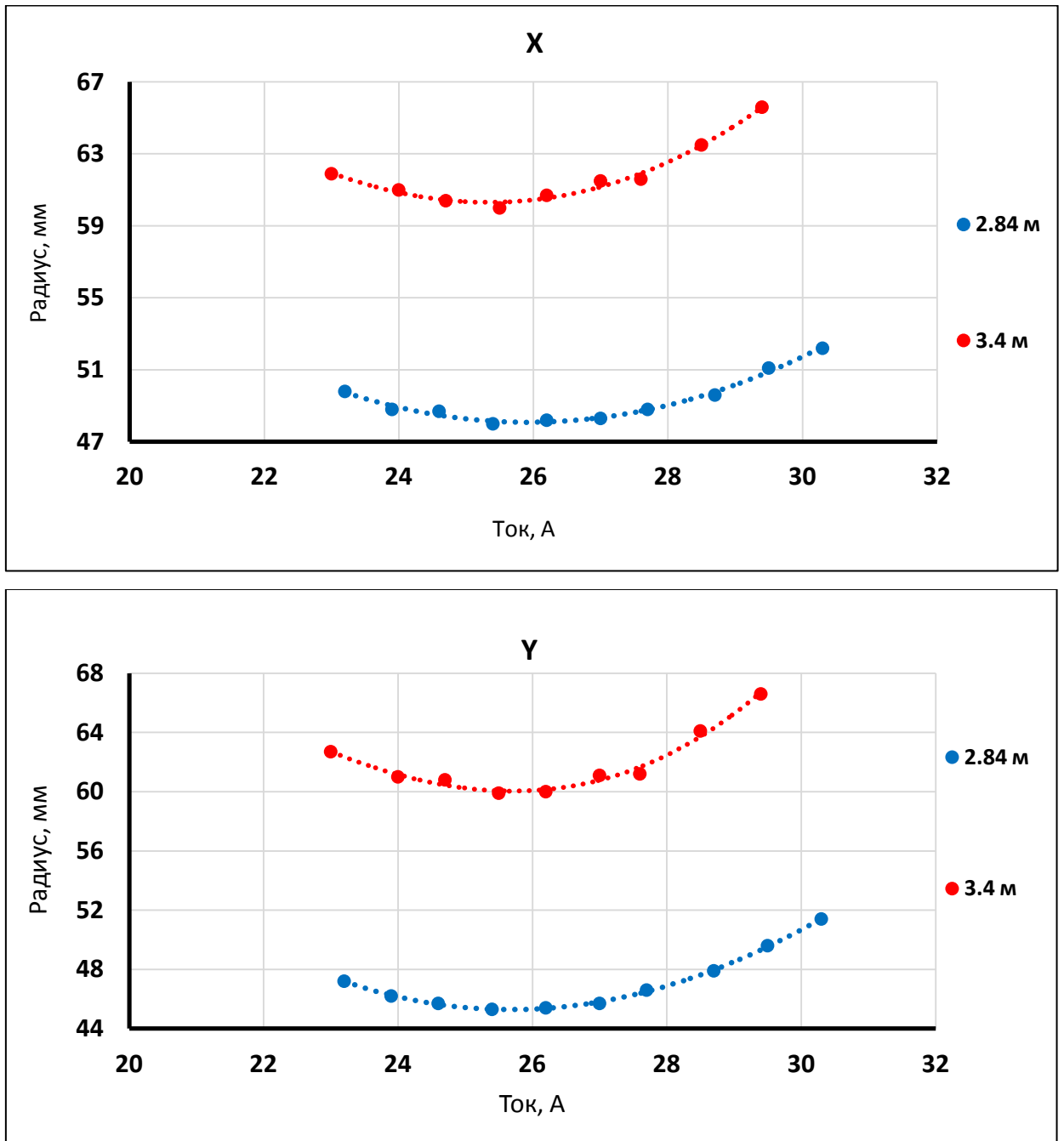


Рис.17 Зависимости размеров дейтериевого пучка от тока пучка при двух различных положениях вторично-эмиссионных датчиков.

По итогам измерений было установлено, что для водородного пучка минимальный радиус пучка достигается при токах 34-36 А, а для дейтериевого оптимальный ток составляет ~ 25.5 А.

В целом зависимости профилей пучка от тока слабо отличаются по проекциям X и Y, так как в данной работе использовалась ИОС с круглыми отверстиями в электродах.

3.1.3. Расчет угловой расходимости и фокусного расстояния

Способ решения системы (4), использованный в данной работе состоял в построении приближенной зависимости размера пучка от параметров z и f по уравнению (3) с использованием оценки (2) для угловой расходимости (Рис.18). При таком подходе фокусное расстояние находилось путем подбора - выбиралось то значение f , при котором построенное приближение наиболее точно аппроксимировало экспериментальные данные.

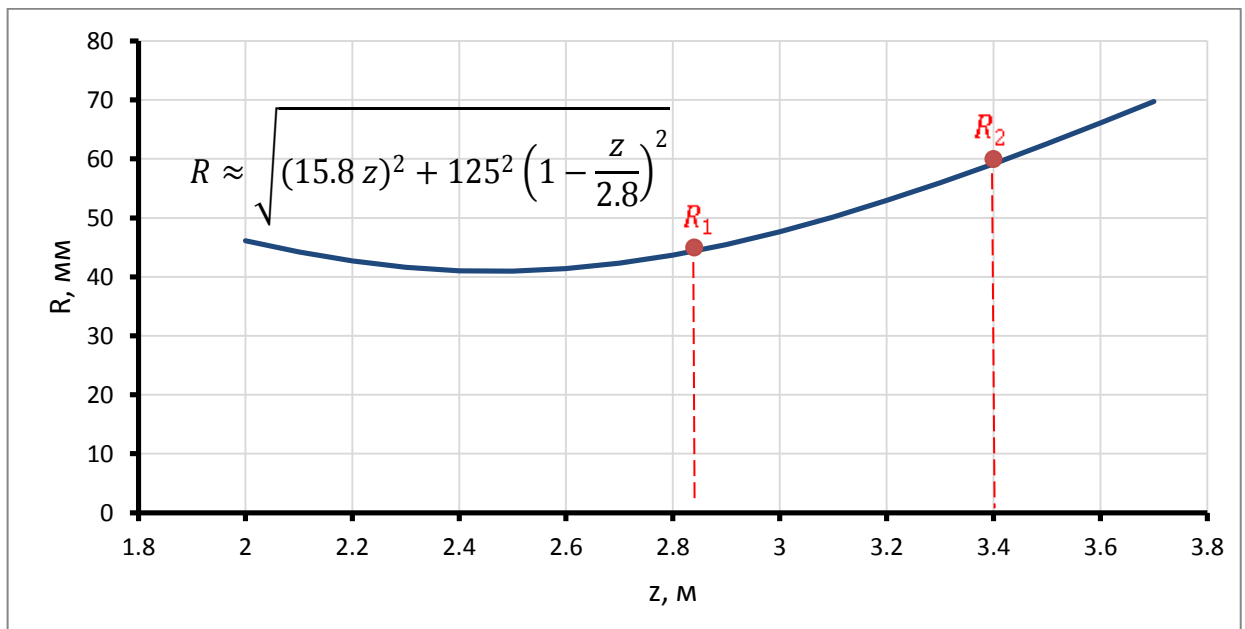


Рис.18 Пример аппроксимации зависимости размера пучка от расстояния до ИОС с параметрами $\alpha=15.8$ мрад и $f=2.8$ м, рассчитанная для Y проекции профиля дейтерия. $R_1=45.3$ мм, $R_2=60.1$ мм.

Для решения системы (4) и построения зависимостей были использованы радиусы пучка, измеренные при оптимальном токе. При помощи рассчитанных зависимостей были также оценены размеры пучка на входе в токамак (порт которого располагается в $z = 4.2$ м от ИОС). Полученные параметры представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Аналитически полученные параметры атомарного пучка водорода и дейтерия.

Параметры пучка	Рабочий газ			
	Водород		Дейтерий	
	X	Y	X	Y
Угловая расходимость, мрад	15.9	15.2	16.9	15.8
Фокусное расстояние, м	3.9	3.6	3.0	2.8
Радиус на расстоянии 4.2 м, мм	65	69	87	91

По результатам вычислений было установлено, что сформированные пучки имеют расходимость $< 1^\circ$.

Вследствие использования при измерениях сеток ИОС с круглыми отверстиями рассчитанные величины радиуса пучка не сильно отличаются по направлениям X и Y.

3.2. Массовый состав пучка

3.2.1. Процессы, влияющие на состав пучка

Другим важным параметром пучка является его массовый состав по извлекаемым из плазменного эмиттера ионам. К основным процессам, приводящим к образованию ионов в плазменном эмиттере, относятся [7]:

- Ионизация молекулы: $\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}_2^+ + 2e$ с диссоциацией молекулярного иона: $\text{H}_2^+ + e \rightarrow \text{H} + \text{H}$ и ионизацией полученных атомов: $\text{H} + e \rightarrow \text{H}^+ + 2e$.
- Ионизация молекулы: $\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}_2^+ + 2e$ и следующая за ней диссоциация молекулярного иона: $\text{H}_2^+ + e \rightarrow \text{H}^+ + \text{H} + e$.
- Диссоциация молекулы: $\text{H}_2^+ + e \rightarrow \text{H} + \text{H}$ с последующей ионизацией атомов: $\text{H} + e \rightarrow \text{H}^+ + 2e$.

- Диссоциация молекулы: $\text{H}^+ + e \rightarrow \text{H} + \text{H}$ с последующим возбуждением атома и его ионизацией: $\text{H} + e \rightarrow \text{H}^{2p} + e$, $\text{H}^{2p} + e \rightarrow \text{H}^+ + 2e$.
- Реакция, результатом которой является молекулярный ион H_3^+ : $\text{H}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_3^+ + \text{H}$.

Таким образом, после многократных соударений электронов с тяжелыми частицами в плазменном эмиттере образуются не только атомарные, но и молекулярные ионы: H_2^+ и H_3^+ . Также в эмиттере могут образовываться различные примесные добавки из H_2O : OH^+ , OH_2^+ , OH_3^+ [8].

В результате распада данных ионов в нейтрализаторе могут образовываться ионы H^+ и атомы H с энергиями $\frac{E}{2}$ и $\frac{E}{3}$, а также молекулы H_2 и молекулярные ионы H_2^+ с энергией $\frac{2E}{3}$, где E - полная энергия частиц пучка. Тяжелые ионы распадаются на частицы с энергией, меньшей $\frac{E}{10}$.

Данные частицы нагревают плазму слабее, так как проникают в неё хуже, чем атомы пучка, обладающие полной энергией - нейтралы с $\frac{E}{10}$ (при $E = 40$ кэВ) в токамаках ионизируются еще на границе плазмы [9]. Наличие тяжелых примесей также нежелательно, так как приводит к существенному возрастанию потерь на рекомбинационное и тормозное излучения.

3.2.2. Использование смещенных линий спектра пучка для расчета массового состава

Некоторые частицы пучка из-за столкновений с фоновым газом после нейтрализатора возбуждаются и при переходах с третьего на второй возбужденный уровень излучают линию H_α . За счет доплеровского эффекта частицы с разными энергиями излучают на разных частотах.

Сдвиг линии H_α для частицы со скоростью $u = \sqrt{\frac{2E}{m}}$:

$$\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{u}{c} \cos\theta, \quad (5)$$

где θ - угол наблюдения, а λ_0 - длина волны несмещенной линии H_α (для водорода $\lambda_0 = 656.3$ нм, для дейтерия $\lambda_0 = 656.1$ нм). Таким образом, при измерении спектра данного излучения (под неперпендикулярным углом) можно зарегистрировать несмещенную H_α , соответствующую фоновому газу и линии, соответствующие различным компонентам пучка со скоростями u , $\frac{u}{\sqrt{2}}$, $\frac{u}{\sqrt{3}}$ и $\frac{u}{\sqrt{18}}$ (или $\frac{u}{\sqrt{10}}$ для D_α).

Интенсивности пиков I пропорциональна плотностям ионов n в пучке [8]:

$$\frac{n_{H_2^+}}{n_{H^+}} = A_1 \frac{I_{E/2}}{I_E}$$

$$\frac{n_{H_3^+}}{n_{H^+}} = A_2 \frac{I_{E/3}}{I_E}$$

$$\frac{n_{OH_2^+}}{n_{H^+}} = A_3 \frac{I_{E/18}}{I_E}$$

Коэффициенты A_1 , A_2 и A_3 зависят от сечений возбуждения, перезарядки и диссоциации соответствующих атомов и молекул, и от энергии пучка [10-12].

В данной работе измерение спектра проводилось с включенным нейтрализатором и работающим поворотным магнитом инжектора при помощи спектрометра Ocean Optics 2000, регистрировавшего излучение под углом $\theta = 45^\circ$ к атомарному пучку.

Энергия пучка составляла 45 кэВ. Коэффициенты при данной энергии: $A_1 \approx 0.25$, $A_2 \approx 0.14$, $A_3 \approx 0.105$. Вычисление массового состава было выполнено в программе Mathcad.

3.2.2. Анализ спектра и массового состава пучка

Спектры и массовые составы были получены для пучка водорода (Рис.19) и дейтерия (Рис.20).

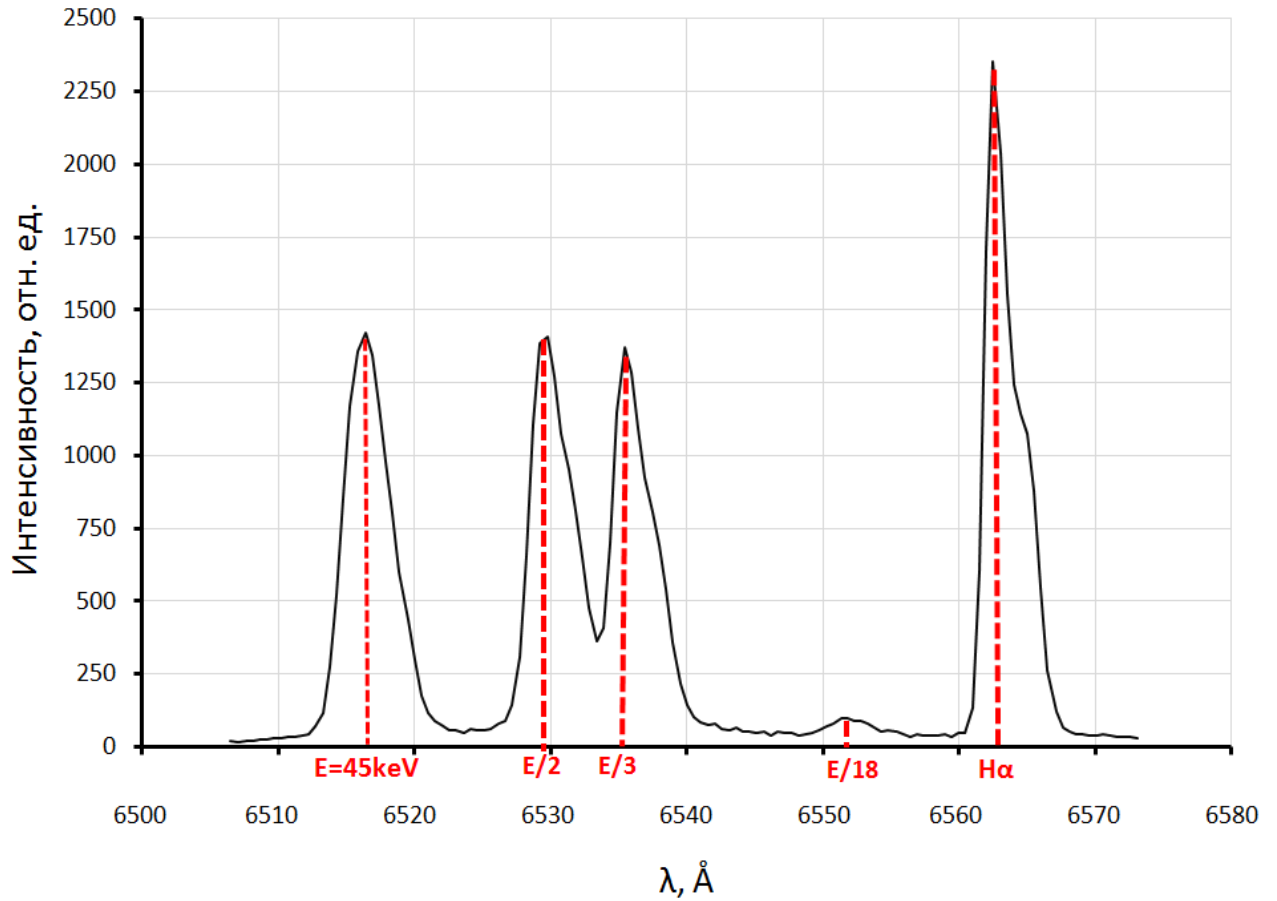


Рис.19 Спектр пучка водорода. Доли ионов в пучке:
 $\text{H}^+ \sim 71.8\%$, $\text{H}_2^+ \sim 17.9\%$, $\text{H}_2^+ \sim 9.7\%$, $\text{OH}_2^+ \sim 0.6\%$.

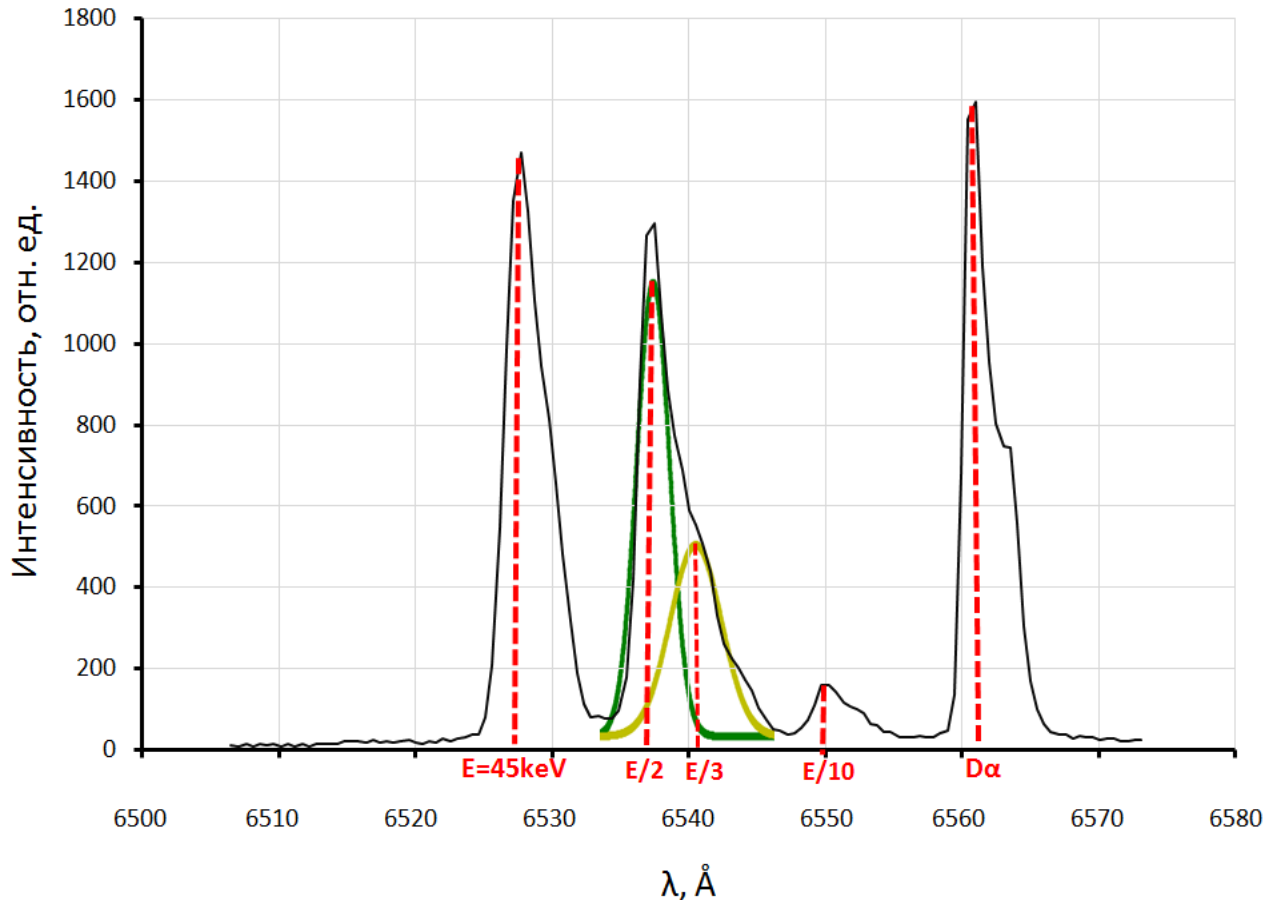


Рис.20 Спектр пучка дейтерия. Желтая и зеленая линии - Гауссовы аппроксимации пиков $E/2$ и $E/3$ соответственно. Доли ионов в пучке: $D^+ \sim 80.6\%$, $D_2^+ \sim 14.9\%$, $D_2^+ \sim 3.6\%$, $OD_2^+ \sim 0.9\%$.

Как видно из построенных графиков линии D_α спектра дейтерия расположены ближе друг к другу, чем линии водорода H_α , - пики с энергией $\frac{E}{2}$ и $\frac{E}{3}$ дейтерия фактически слились в один. Причиной такого различия спектров заключается в том, что атом дейтерия тяжелее водорода, из за чего скорость частиц пучка водорода и, соответственно, доплеровское смещение пиков H_α больше. Чтобы определить интенсивность отдельных линий $\frac{E}{2}$ и $\frac{E}{3}$ для дейтерия была построена их аппроксимация Гауссовым распределением. Для расчета положения этих линий использовалась формула (5).

По результатам вычислений массового состава было обнаружено, что большинство ионов, образующихся в плазменном эмиттере - атомарные, а количество тяжелых ионов (OD_2^+ , OH_2^+) не превышает 1%.

Заключение

В данной работе с помощью сеточного зонда были проведено исследования распределение плотности ионного тока насыщения ВЧ плазменного эмиттера. По результатам экспериментов было обнаружено, что изменение количества магнитов в магнитопроводе эмиттера оказало незначительное влияние на распределение ионного тока.

Во время экспериментов на инжекторе с эмиттером, имеющим такую же магнитную конфигурацию, была установлена величина оптимального давления напуска рабочего газа (2.5 Па), а также проведена диагностика пучка атомарного дейтерия и водорода. В результате измерены ток, энергия, профили и спектры пучка.

По итогам измерений профиля и тока атомарного пучка были рассчитаны фокусное расстояние, угловая расходимость и размер пучка на выходе инжектора. Угловая расходимость сформированных пучков составляет меньше 1° .

Из спектров пучка были получены массовые составы по положительным ионам. Выяснилось, что создаваемая в эмиттере плазма в основном состоит из атомарных ионов и имеет низкую концентрацию тяжелых ионов.

Полученные параметры размеров пучка, расходимости и массового состава удовлетворяет основным требованиям технической спецификации к инжектору.

Список литературы

1. A. A. Ivanov, V. I. Davydenko, P. P. Deichuli, A. Kreter, V. V. Mishagin, A. A. Podyminogin, I. V. Shikhovtsev, B. Schweer, R. Uhlemann // *Rev. Sci. Instruments* 71, стр. 3728-3735 (2000).
2. D.Rauner, S Briefi, U.Fantz. Influence of the excitation frequency on the RF power transfer efficiency of low pressure hydrogen ICPs. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 28 // стр. 2, (2019) .
3. D.Rauner, S Briefi, U.Fantz. RF power transfer efficiency of inductively coupled low pressure H2 and D2 discharges. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 26 // стр. 2 (2017).
4. A. A. Ivanov, P. P. Deichuli , A. Kreter, V. V. Maximov, B. Schweer, I. V. Shikhovtsev, N. V. Stupishin, D. V. Usoltsev, A. A. Podminogin and R. Uhlemann. Characterization of ion species mix of the TEXTOR diagnostic hydrogen. // *Vol. 75* (2004).
5. Bernhard Wolf. Handbook of ion sources. стр.101 (1995).
6. Ian G. Brown. The Physics and Technology of Ion Sources. стр. 31 (2004).
7. М.Д.Габович. О роли многократных процессов при образовании протонов в ионных источниках // *ЖТФ*, т.30, №3 (1960).
8. S.J. Yoo, H.L. Yang, Seung mi Hwang. Doppler shift spectroscopy for the measurement of angular divergence and ion species of ion beam. // *Journal-Korean Physical Society* 35(4), стр. 315-320 (1999).
9. Klara Mitosinkova, Jan Stöckel, Jozef Varju, Vladimir Weinzettl. Energy composition of high-energy neutral beams on the COMPASS tokamak. // *NUKLEONIKA*, стр. 420 (2016).
10. Bilau Faust, R. Spectrometrical measurement of the species composition and beam divergence of hydrogen and deuterium beams the ASDEXNI-beamline ion sources and the HF sources. Garching bei Munchen: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, (1991).

11. Deschamps, G. H., Falter, H. D., Hemsworth, R. S., & Massman, P. JET neutral beam species measurements by Doppler-shift spectroscopy. // Plasma Phys. Fusion Technol 1, стр. 588–592 (1988).
12. Kim, J., & Haselton, H. H. Analysis of particle species evolution in neutral-beam injection lines. // J. Appl. Phys 50, стр. 3802–3808 (1979).