

**МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное агентство
по образованию**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**физический факультет
Квалификационная работа на соискание
степени бакалавра**

Кафедра физики плазмы

Прохоров Иван Анатольевич

Название работы

**Разработка высокочастотного плазменного эмиттера
диагностического инжектора для стелларатора W7-X**

Научный руководитель:

И. В. Шиховцев,

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник,

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН

Новосибирск – 2010 год

Содержание

Введение.....	3
1 Общее описание инжектора нейтральных атомов.....	5
2 Высокочастотный плазменный эмиттер.....	8
2.1 Физические основы работы высокочастотного плазменного эмиттера.....	8
2.2 Схема высокочастотного эмиттера.....	10
3 Высокочастотный генератор.....	12
3.1 Описание и принцип работы генератора.....	12
3.2 Определение согласованной нагрузки генератора.....	14
4 Потребляемая разрядом мощность.....	15
4.1 Определение эквивалентного сопротивления плазмы.....	15
5 Оценка тепловых нагрузок на элементы эмиттера.....	18
5.1 Тепловые нагрузки.....	18
5.2 Система охлаждения.....	19
5.3 Численные оценки.....	21
5.3.1 Фарадеевский экран.....	21
5.3.2 Задний фланец.....	22
6 Профиль плотности ионного тока.....	23
6.1 Схема эксперимента.....	23
6.2 Измерение профиля плотности ионного тока.....	25
Заключение.....	26
Литература.....	27

Введение

Появление инжекторов нейтральных атомов можно назвать одним из крупнейших достижений экспериментальной физики XX века и поставить в один ряд с появлением ускорителей, полупроводниковых микросхем и пр. Область применения инжекторов чрезвычайно широка, и охватывает такие разделы современной науки и техники как нагрев и диагностика термоядерной плазмы, инжекция частиц в ускоритель, терапия рака, полупроводниковая имплантация и литография и многие другие.

В Институте Ядерной Физики им. Г.И. Будкера СО РАН уже более двадцати лет ведутся работы по созданию инжекторов нейтральных атомов для активной корпускулярной диагностики плазмы в термоядерных установках. За это время были созданы и успешно введены в эксплуатацию диагностические инжекторы для таких установок как пробкотрон ГДЛ (Новосибирск) [1], токамаки TEXTOR (Германия) [1] и TCV (Швейцария) [3], Alcator C-mod (США) [4] и др. Параметры диагностических инжекторов для различных установок лежат в пределах от 15 до 60 кэВ по энергии частиц и от 2 до 10 А по току пучка, длительность работы современного диагностического инжектора не превышает нескольких секунд [1-4].

Активная корпускулярная диагностика, основанная на инжекции в плазму пучков ионов и атомов, получила широкое распространение благодаря своим уникальным преимуществам. Среди них следует особо отметить бесконтактность, нечувствительность к электрическим и магнитным полям (для нейтралов), возможность определения широкого набора локальных параметров плазмы, таких как профиль плотности, ионная температура, потенциал плазмы, концентрация примесей и др. В подобных диагностиках используются как пучки тяжелых ионов и атомов (Cs^+ , Cs^0), так и легкие высокоэнергетичные (H^0 , D^0 , He^0).

В 2005 году в городе Грайфсвальд, Германия началось строительство экспериментального термоядерного реактора типа стелларатор, получившего название Wendelstein 7-X. Для диагностики параметров плазмы на этой установке будет использоваться разрабатываемый в ИЯФ СО РАН инжектор. Данный инжектор должен формировать пучок атомов водорода с энергией до 60 кэВ и эквивалентным током атомов с полной энергией до 2,5 А. Длительность работы инжектора в модулированном режиме составляет 10 сек. Пучок будет формироваться четырехэлектродной щелевой ионно-оптической системой с водяным охлаждением. Учитывая большую длительность работы инжектора, был сделан выбор в пользу высокочастотного эмиттера, преимуществом которого является отсутствие накаливаемых элементов и электродов в разрядной камере.

К диагностическим пучкам предъявляются высокие требования по угловой расходимости ($\sim 0,5^\circ$) и чистоте массового состава – желательно максимально повысить содержание частиц с полной энергией и не допустить образования в ионном пучке молекулярных ионов H_2^+ , H_3^+ , которые при обдирке превращаются в частицы с половиной и составляющей треть от максимальной энергии, соответственно. Большая длительность работы инжектора приводит к большим тепловым нагрузкам на элементы системы. Особенно подвержена нагреванию газоразрядная камера и ионно-оптическая система. Для эффективного отвода тепла от элементов конструкции используют водяное охлаждение.

Данная работа посвящена разработке плазменного эмиттера для диагностического инжектора. В ней рассматриваются проблемы получения требуемого потока ионов из эмиттера и эффективного охлаждения плазменной камеры, а также решения задач, связанных с подводом мощности к эмиттеру.

1 Общее описание инжектора нейтральных атомов

При проектировании инжекционной системы к ней предъявляется ряд требований, определяемых назначением и видом установки, на которой она будет использоваться. Среди характеристик, оговариваемых этими требованиями, можно выделить главные: 1) мощность вводимого в установку потока атомов; 2) полный инжектируемый поток атомов; 3) энергия частиц пучка; 4) длительность импульса инжекции; 5) геометрические характеристики пучка атомов; 6) сопутствующий поток холодного газа; 7) энергетические КПД системы инжекции; 8) надежность работы и ресурс системы. [7]

Физический принцип получения пучка атомов с заданной энергией заключается в ускорении ионов в электрическом поле с последующим их превращением в нейтралы. Реализация этого принципа возможна по двум схемам – через положительные или через отрицательные ионы. Конкретный выбор той или иной схемы определяется стремлением получить максимальные энергетический КПД инжектора. Дело в том, что генерировать положительные ионы водорода легче, чем отрицательные, однако сечение перезарядки таких ионов на нейтральной мишени, определяющее коэффициент преобразования их в атомы, сильно падает с ростом энергии. (рисунок 1.1) Сечение «обдирки» отрицательных ионов слабо зависит от их энергии в широком диапазоне больших энергий. Поэтому представляется разумным использовать технологию, основанную на перезарядке положительных ионов только для относительно низкоэнергетичных пучков (до 100 кэВ).

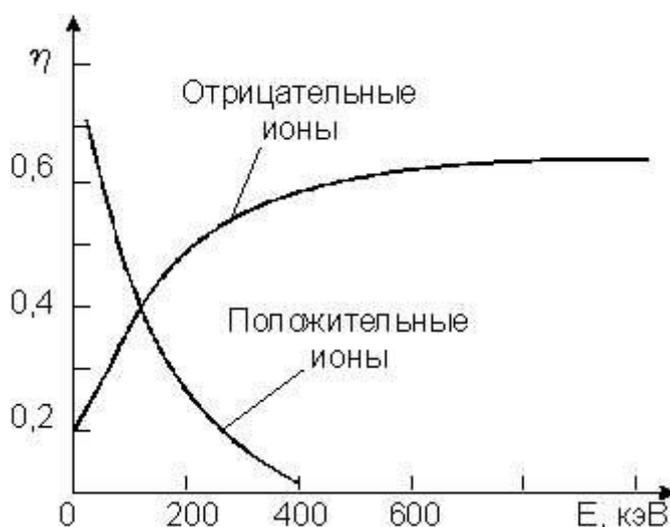


Рисунок 1.1 Коэффициент конверсии ионов водорода на равновесной мишени[7].

Техническое воплощение той или иной физической схемы всегда сталкивается с трудностями, связанными как с принципиальными ограничениями, налагаемыми законами природы, так и с современными технологическими возможностями. Например, ограничения характерных размеров ионно-оптической системы (ИОС) источника ионов – важнейшего элемента инжектора – напрямую связана с точностью изготовления ее деталей, механической стойкостью материала и возможностью теплоотвода. Размер ускоряющего зазора определяется высоковольтной прочностью, сильно зависящей от

качества обработки поверхностей электродов. Эти ограничения, в свою очередь, лимитируют плотность ионного тока от источника, при которой пучок может быть удовлетворительным образом сформирован ионно-оптической системой.

Схема процесса, положенного в основу получения пучка атомов из положительных ионов такова: в газовом разряде образуются положительные ионы водорода, далее они извлекаются из разряда, ускоряются и формируются в пучок, после чего перерабатываются в нейтральные атомы на перезарядной мишени (нейтрализаторе) с эффективностью, определяемой соответствующим сечением перезарядки. Полученный поток атомов очищается от неперезарядившихся ионов поворотным магнитом и инжектируется затем в плазму. На рисунке 1.2 показана принципиальная схема диагностического инжектора для стелларатора Wendelstein 7-X.

Для генерации плазмы с требуемыми параметрами в ионном источнике используют различные методы, основанные на дуговом разряде с холодными или горячим катодом, электрон-циклотронном резонансе, возбуждении геликонов, передаче мощности индукционным способом. Наиболее простым в создании и надежным в использовании является эмиттер, основанный на индукционной высокочастотной генерации плазмы, именно такой эмиттер будет использоваться в диагностическом инжекторе для стелларатора Wendelstein 7-X. К преимуществам данного типа эмиттера относятся: 1) простота развязки системы питания эмиттера от потенциала, под которым находится ионный источник при извлечении пучка; 2) большой ресурс работы и длительность импульса из-за отсутствия в разряде накаливаемых элементов.

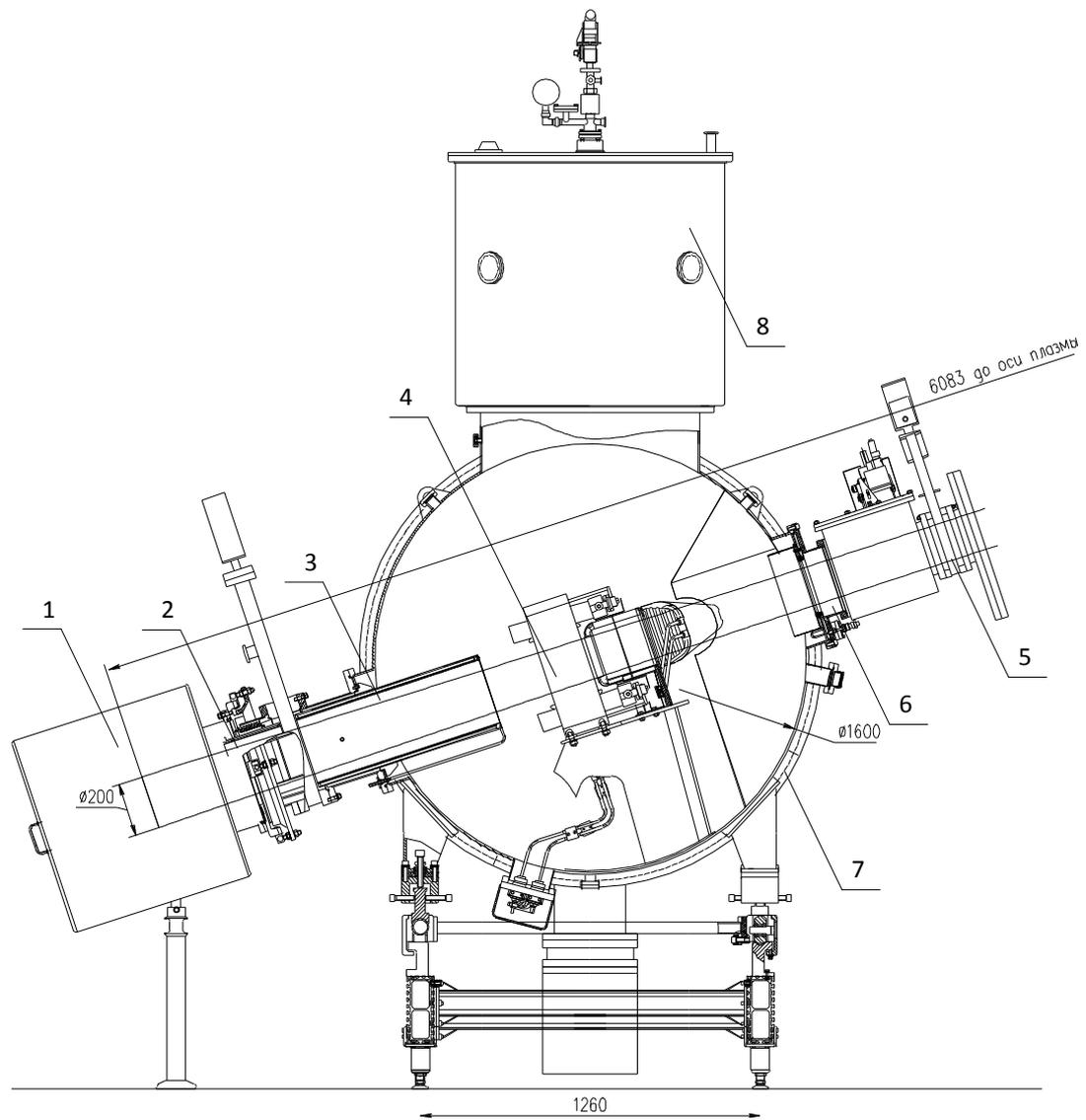


Рисунок 1.2. Схема диагностического инжектора для стелларатора Wendelstein 7-X:

- 1) источник ионов; 2) юстировочное устройство и шибер; 3) нейтрализатор; 4) отклоняющий магнит;
 5) выходной шибер; 6) прицельная мишень и калориметр; 7) вакуумный объем; 8) крионасос.

2 Высокочастотный плазменный эмиттер

2.1 Физические основы работы высокочастотного плазменного эмиттера

Индукционный метод возбуждения ВЧ разряда основан на использовании явления электромагнитной индукции. Переменный высокочастотный электрический ток, протекающий по виткам антенны – представляющей из себя соленоид, состоящий из нескольких или даже одного витка – индуцирует вихревое переменное магнитное поле, замкнутые линии которого направлены вдоль оси катушки. Магнитное поле, в свою очередь, индуцирует переменное электрическое поле, силовые линии которого замкнуты и концентричны с высокочастотным током, протекающим по антенне. Легкие электроны под воздействием такого поля начинают совершать колебательные движения, что приводит к ионизации и дальнейшему поддержанию разряда в нейтральном газе камеры.

Рассмотрим физические основы высокочастотных источников. Уравнение движения электронов в переменном электрическом поле имеет вид [8]:

$$m \frac{dV}{dt} + gV = eE_0 \cos(\omega t + \chi) \quad (2.1.1)$$

где g – коэффициент, характеризующий сопротивление среды, т.е. взаимодействие электрона с другими частицами. Если $g = mv$ (v – частота соударений электрона с атомами), то величина gV представляет собой среднее изменение импульса электрона за единицу времени вследствие его столкновений с атомами. Интегрируя уравнение движения (2.1.1), получаем выражение для скорости электрона [8]:

$$V = \frac{eE_0}{m\sqrt{v^2 + \omega^2}} \cos(\omega t + \chi - \varphi) - Ce^{-\nu t} \quad (2.1.2)$$

где $\varphi = \text{arcctg}(v/\omega)$, C – постоянная интегрирования. Таким образом, через очень короткий промежуток времени движение электрона приобретает чисто колебательный характер с частотой ω и сдвигом фазы φ относительно напряженности поля. Из выражения (2.1.2) можно получить величину мощности, выделяемой в единице объема; усреднение за период колебаний приводит к выражению:

$$\bar{P} = \frac{ne^2}{2mv} E_0^2 \frac{v^2}{v^2 + \omega^2} \quad (2.1.3)$$

Следовательно, поглощаемая в высокочастотном разряде мощность пропорциональна концентрации электронов, квадрату напряженности электрического поля и за-

висит от частоты поля и давления газа. Наилучшее поглощение энергии происходит при близости частоты соударений электронов с атомами ν и частоты поля ω .

При низких плотностях плазмы в основном происходит ионизация невозбужденных атомов электронным ударом. Механизмом потерь электронов служит диффузионный уход зарядов из разрядного объема (в том числе на стенки, где заряды взаимно нейтрализуются) и рекомбинация в объеме.

Наложенное на разряд статическое магнитное поле вызывает ряд эффектов. Экспериментально было показано [9], что увеличение напряженности магнитного поля приводит к росту поглощаемой мощности и концентрации плазмы, что объясняется уменьшением диффузии зарядов из области основной ионизации (объема, ограниченного катушкой, возбуждающей разряд) перпендикулярно магнитному полю. Уменьшение диффузии вызывает увеличение равновесной концентрации зарядов и, следовательно, отбираемой разрядом мощности, так как последняя пропорциональна концентрации зарядов.

2.2 Схема высокочастотного эмиттера

Высокочастотный плазменный эмиттер диагностического инжектора для стелларатора Wendelstein 7-X, представляет собой цилиндрическую керамическую камеру (4) с внутренним диаметром 180 мм и высотой 100 мм, толщина керамики составляет 6 мм. Вокруг камеры намотаны четыре медных витка антенны (2), по которым протекает высокочастотный ток.

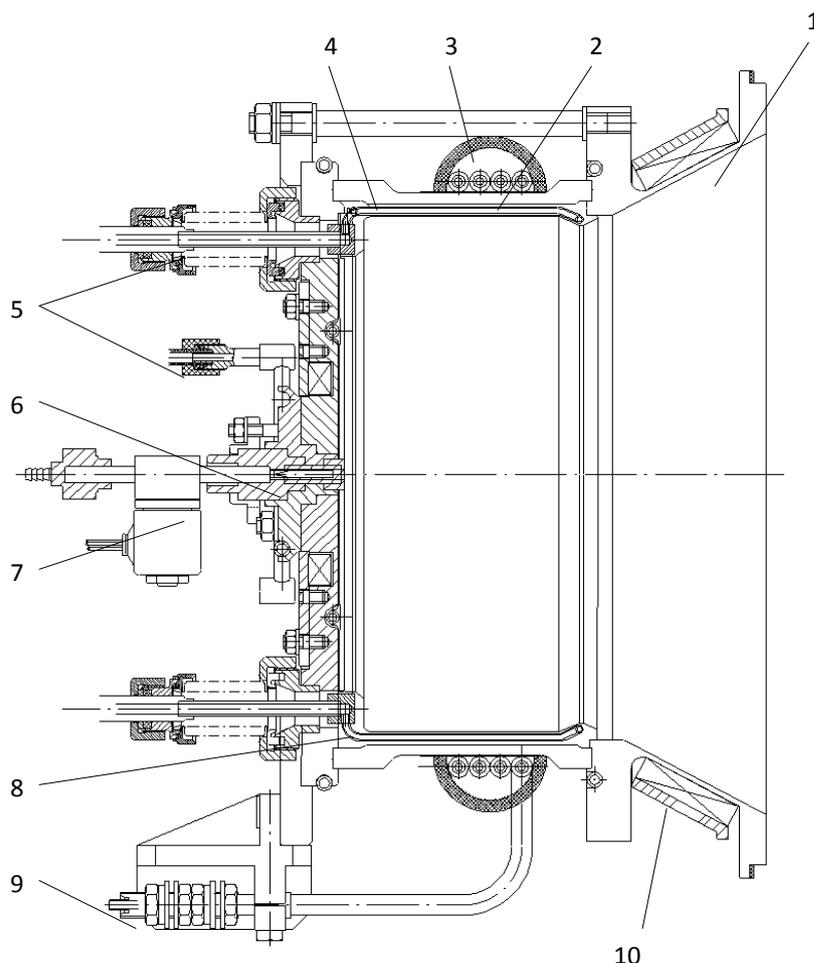


Рисунок 2.2.1 Схема эмиттера диагностического инжектора для стелларатора Wendelstein 7-X

1) расширитель; 2) антенна; 3) ферритовые полукольца; 4) керамическая плазменная камера; 5) подвод воды к системе охлаждения; 6) поджиг; 7) клапан; 8) медный фарадеевский экран; 9) клеммы антенны; 10) магнитная стенка расширителя.

Ферритовые полукольца (3), окружающие антенну, концентрируют магнитное поле, индуцируемое током, протекающим по виткам антенны, внутри газоразрядной камеры и не пропускают поле во внешнее пространство, что увеличивает эффективность разряда [9]. Индуктивность антенны после установки ферритов увеличивается с 3,9 до 7,3 мкГн.

Охлаждаемый фарадеевский экран (8) служит для снижения тепловых нагрузок на керамическую стенку камеры за счет поглощения части потока горячих частиц. Охлаждаемая задняя стенка с постоянными магнитами увеличивает эффективность разряда за счет уменьшения потерь плазмы на заднюю стенку, а также за счет удержания электронов постоянным магнитным полем [8].

Первоначальная ионизация в камере осуществляется устройством поджига (6), представляющим собой электрический пробой по поверхности диэлектрика между двумя электродами, к которым импульсно (10мкс) прикладывается 6 кВ . Поджиг срабатывает после напуска газа в камеру с помощью клапана (7).

Отличительной конструктивной особенностью данного эмиттера является наличие конического расширителя (1), представляющего собой сегмент конуса с основаниями 180 мм и 200 мм . Меньшим основанием расширитель примыкает к плазменной камере (4), большее совпадает с плоскостью плазменной сетки. Стенки расширителя окружены постоянными магнитами (10) длиной 40 мм и сечением $9\text{ мм} \times 12\text{ мм}$. Наличие расширителя улучшает массовый состав пучка (увеличивается относительное содержание компоненты H^+ по сравнению с H_2^+ и H_3^+). Объяснение этого эффекта состоит в следующем: в более плотной плазме увеличивается относительно содержание ионов H^+ [5], в меньшем объеме можно создать более горячую плазму с большей плотностью, а значит и лучшим массовым составом. В расширителе плотность плазмы падает, но массовый состав остается прежним. Таким образом, расширитель позволяет улучшить массовый состав за счет генерации более плотной плазмы в меньшем объеме.

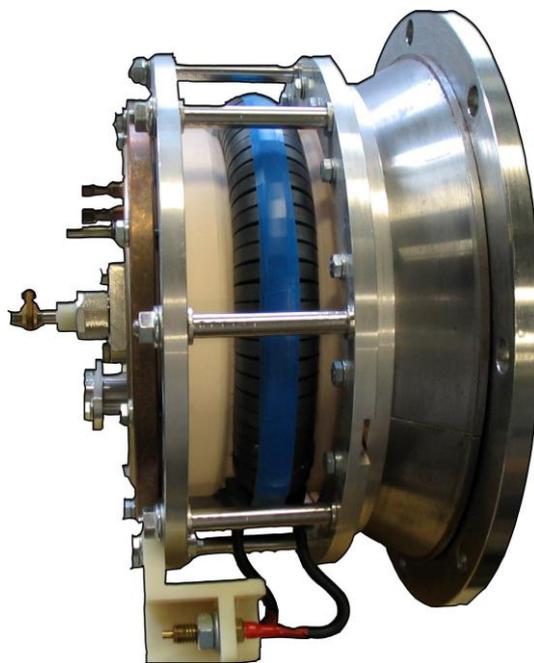


Рисунок 2.2.2. Фотография эмиттера диагностического инжектора.

3 Высокочастотный генератор

3.1 Описание и принцип работы генератора

Получение плазмы с требуемыми параметрами возможно только при подводе к разряду мощности необходимой величины. Для плазменных эмиттеров, основанных на высокочастотном разряде, используется схема подвода мощности, представленная на рисунке 3.1.1:

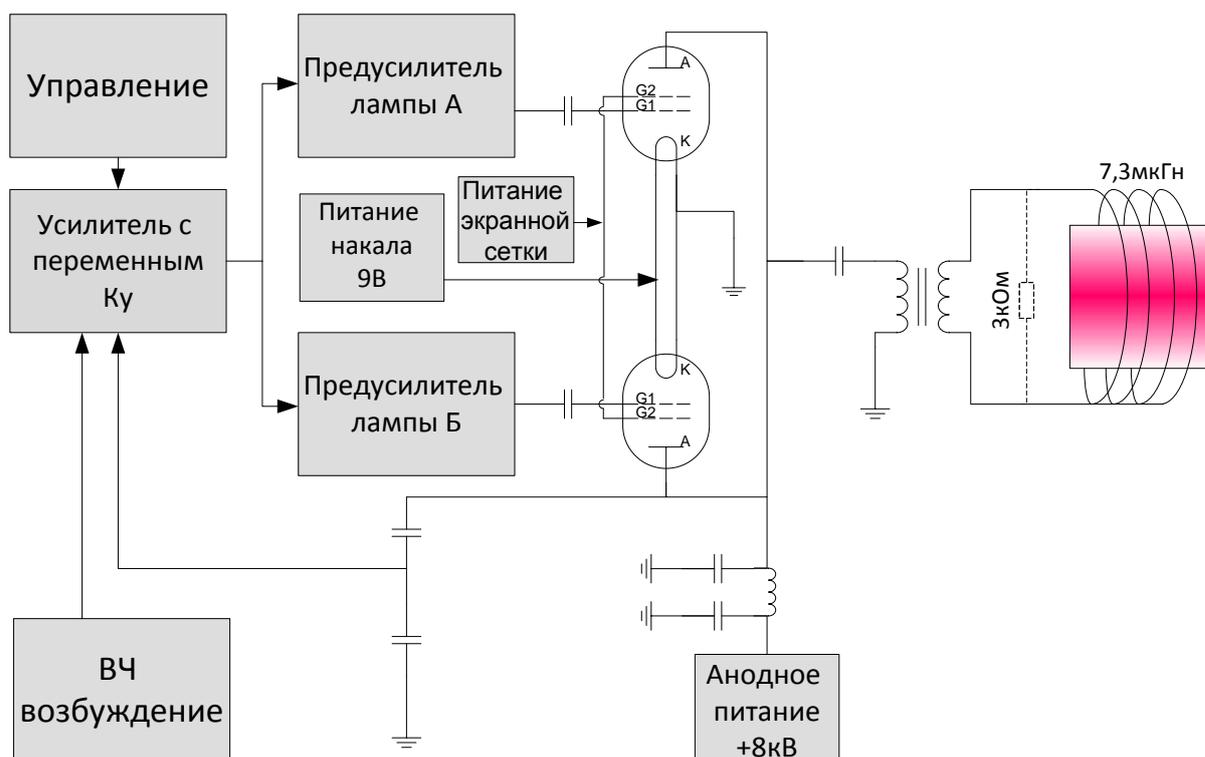


Рисунок 3.1.1. Высокочастотный генератор

Ламповый усилитель мощности является преобразователем электрической энергии постоянного тока в электрическую энергию переменного тока. Основным рабочим элементом генератора являются электронная лампа, в нашем случае использовались два тетрода ГУ-92А. *Тетрод* – это электронная лампа, имеющая четыре электрода: катод *К*, управляющую *G1* и экранирующую *G2* сетку, анод *А*. Во время работы лампы с катода, накаливаемого током, происходит термоэмиссия электронов, которые летят на анод, под действием существующего в лампе электрического поля. Управляющая сетка, на которую подается высокочастотный сигнал небольшой амплитуды, «запирает» часть электронов в момент, когда сигнал имеет отрицательную амплитуду и увеличивает ток на анод, когда сигнал положительный. Анодный ток для используемых в нашем эксперименте ламп составлял 12 А . Экранирующая сетка фокусирует поток электронов, тем самым повышая коэффициент усиления лампы, а также уменьшает проходную ёмкость между анодом и управляющей сеткой по сравнению с трехэлектродной системой в де-

сятки и сотни раз, что уменьшает частотные искажения на выходе лампы при работе на высоких частотах.

Генератор имеет следующие основные электрические цепи: 1) *цепь накала* с низковольтным источником питания: $\sim 9\text{ В}$, 200 А ; 2) *цепь питания и возбуждения управляющей сетки*, в которой имеется постоянное (-190 В – в режиме ожидания, и -60 В – в рабочем режиме генерации) и высокочастотное переменное напряжение (амплитудой до 120 В); 3) *цепь питания экранирующей сетки* ($+1000\text{ В}$); 4) *анодная цепь*, в которую входит источник питания ($+8\text{ кВ}$) и элемент согласования выхода ламп с нагрузкой антенны эмиттера.

Между выходом генератора и антенной установлен высокочастотный трансформатор с высоковольтной изоляцией, назначение которого заключается в передаче мощности от генератора, находящегося под земляным потенциалом, к эмиттеру, который во время работы будет соединен с плазменной сеткой ионно-оптической системы инжектора с потенциалом $+60\text{ кВ}$.

Нагрузка, представленная антенным контуром, не соответствует величине, при которой от генератора отбирается максимальная мощность. Эффективная передача

мощности от выходного каскада усилителя к антенне возможна только при их согласовании. В качестве согласующего элемента используется ёмкостной делитель, включенный в цепь анодного контура, как показано на рисунке 3.1.2.

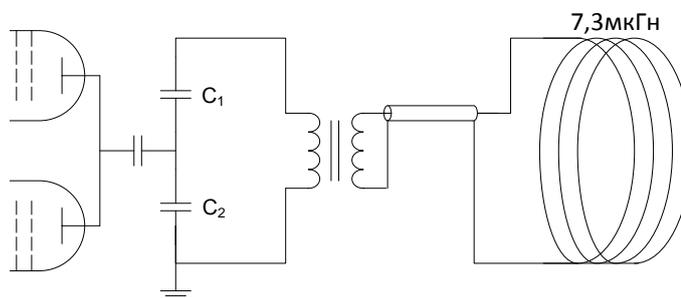


Рисунок 3.1.2 Схема ёмкостного согласующего элемента.

Преимуществом такого элемента является простота изменения коэффициента передачи, путем изменения емкости конденсаторов, согласно формуле:

$$R_{н} = \left(\frac{C_2}{C_1} \right)^2 R_{вых} \quad (3.1.1)$$

В качестве согласующего элемента может выступать трансформатор с коэффициентом трансформации равным квадратному корню из отношения сопротивления нагрузки к выходному сопротивлению генератора. Наличие трансформатора необходимо в любой схеме согласования, т.к., как уже было сказано выше, с помощью него осуществляется высоковольтная развязка.

3.2 Определение согласованной нагрузки генератора

Была исследована зависимость максимальной мощности от величины нагрузки. Исследования проводились при резонансной настройке анодной цепи и постоянном режиме питания ламп и анодного возбуждения. Изменялась только величина шунтового сопротивления

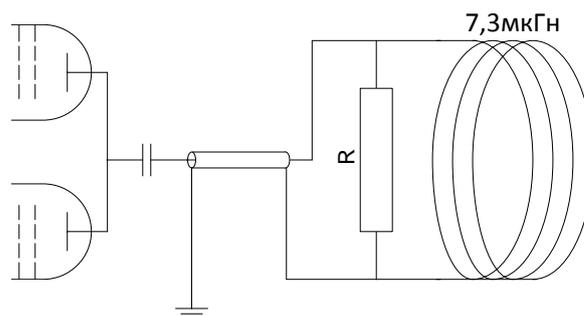


Рисунок 3.2.1. Схема эксперимента по определению согласованной нагрузки генератора.

R анодного контура (рисунок 3.2.1) в пределах от 250 Ом до 5 кОм.

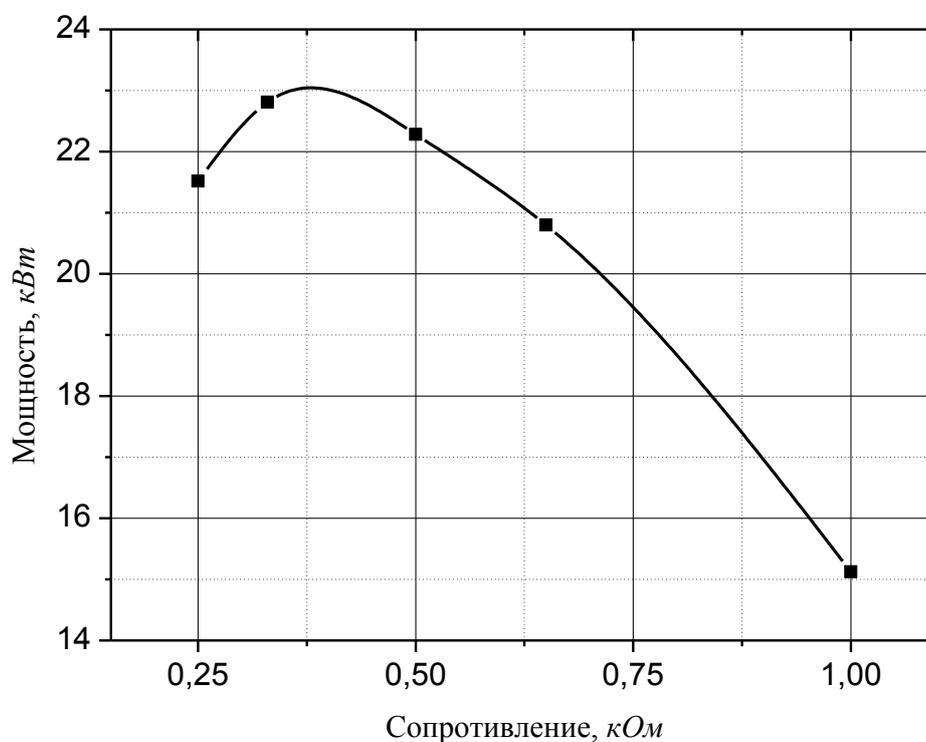


Рисунок 2.2.2. Зависимость мощности генератора от величины нагрузки.

Как видно из приведенного графика (рисунок 2.2.2), максимальная мощность от генератора (22 кВт) отбирается при нагрузке 400 Ом. Приемлемая мощность для работы с эмиттером лежит в пределах от 16 до 20 кВт, что соответствует выходной нагрузке 700—900 Ом. В связи с этим становится очень важным знание величины эквивалентного сопротивления антенны с плазмой, определение которого приведено в главе 4.

4 Потребляемая разрядом мощность

Потребляемая разрядом мощность является важным параметром любого плазменного эмиттера. Эта величина дает знание о параметрах плазмы и потоке ионов из эмиттера, а также дает возможность оценить тепловые нагрузки на элементы системы, что очень важно при работе на длинных импульсах.

Вычислить потребляемую мощность можно через эквивалентное сопротивление плазмы и амплитудное напряжение на антенне по формуле:

$$P = \frac{U_{ам}^2}{2R_{экв}}. \quad (4.1)$$

В данной работе была применена новая методика определения эквивалентного сопротивления плазмы через внутренние параметры ВЧ-генератора.

4.1 Определение эквивалентного сопротивления плазмы

Антенна эмиттера и плазма имеют реактивное и активное сопротивление. Шунтовое сопротивление антенны с индуктивностью $L=7,3 \text{ мкГн}$ на резонансной частоте анодного контура $f=4,56 \text{ МГц}$ и при добротности контура $Q=120$ имеет величину $R_{ш} = 2\pi fLQ \approx 25 \text{ кОм}$. Сопротивление плазмы может быть представлено активным сопротивлением. В этом можно убедиться, наблюдая незначительное – на несколько процентов – уменьшение резонансной частоты анодного контура в режиме холостого хода эмиттера. Оценочное значение сопротивления плазмы составляет несколько кОм .

Эквивалентное сопротивление плазмы определяется в основном конструктивными особенностями конкретного эмиттера, конфигурацией антенны и наличием или отсутствием ферритовых полуколец. Сопротивление плазмы слабо изменяется в широком диапазоне потребляемой мощности [5].

Измерение эквивалентного сопротивления производилось с помощью двух методик. Первая, традиционная, позволяет определить эквивалентное сопротивление через установку активной нагрузки нужной величины параллельно антенне при работе без плазмы в условиях, повторяющих режим с плазмой. Опишем метод более подробно, сопротивление определяется в два этапа:

- 1) В режиме с плазмой, на резонансной частоте регистрируется напряжение на антенне и управляющей сетке лампы.
- 2) В режиме без плазмы, параллельно антенне подключается активное сопротивление такой величины (поочередно перебираются различные сопротивления), чтобы на резонансной частоте и при прежней величине напряжения на управляю-

щей сетке, напряжение на антенне соответствовало измеренному на первом этапе.

На первом этапе резонансная частота определяется по максимуму потока ионов из эмиттера, на втором – по величине напряжения на антенне. Сопротивление, выбранное таким образом, соответствует эквивалентному сопротивлению плазмы. Для эмиттера, исследуемого в данной работе, измеренное этим методом сопротивление составляет 3кОм .

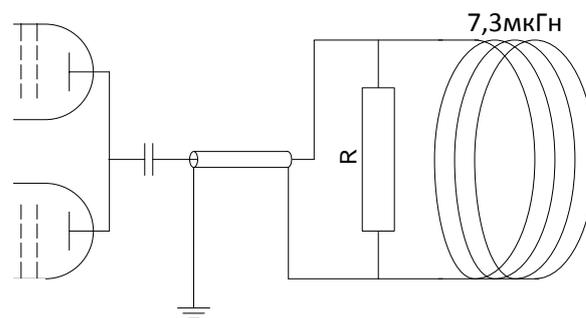


Рисунок 4.1.1. Схема эксперимента по определению эквивалентного сопротивления.

Другой метод измерения эквивалентного сопротивления заключается в построении зависимости внутренних параметров ВЧ-генератора от его нагрузки, среди регистрируемых параметров: ток через тетрод и выходное напряжение. На рисунке 4.1.1 представлена схема эксперимента. Параллельно антенне поочередно подключались сопротивления $1, 2, 3$ и 4кОм , регистрировались ток через лампу с помощью шунтового сопротивления, напряжение на аноде емкостным делителем и напряжение на антенне с помощью измерительного трансформатора с коэффициентом передачи $100:1$. Затем измерялись внутренние параметры генератора в режиме работы с плазмой.

По построенным кривым (рисунок 4.1.2) легко определить искомое сопротивление, зная, какие внутренние параметры имеет генератор в режиме работы с плазмой (горизонтальные линии на графике). Видно, что оно близко к 3кОм , что согласуется с определенным традиционным методом сопротивлением и не противоречит оценкам.

Измеренному сопротивлению соответствует напряжение на антенне в 9кВ , т.о. по формуле 4.1 потребляемая мощность составляет 13кВт .

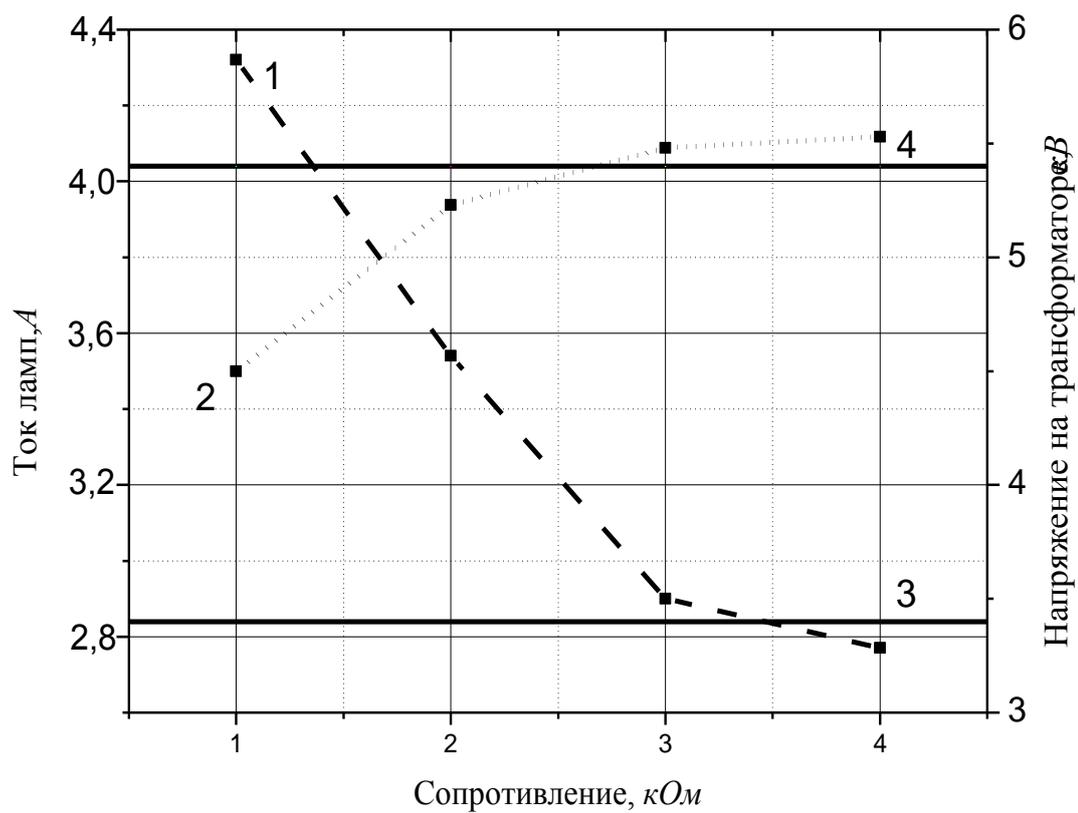


Рисунок 4.1.2. Зависимость внутренних параметров высокочастотного генератора от величины нагрузки. 1- ток лампы; 2- напряжение на трансформаторе; 3- ток лампы в режиме с плазмой; 4- напряжение на трансформаторе в режиме с плазмой.

5 Оценка тепловых нагрузок на элементы эмиттера

5.1 Тепловые нагрузки

Принципиальной особенностью данного эмиттера, выделяющего его на фоне остальных подобных устройств разработанных и построенных в ИЯФ СО РАН, является большая длительность работы – 10 сек в модулированном режиме. Этот факт ставит нас перед проблемой нагрева узлов эмиттера, прежде всего керамической камеры и задней стенки. Источники тепловых нагрузок и способы их подавления классифицированы в таблице 5.1.1.

Источник тепловых нагрузок	Способы уменьшения тепловых нагрузок
Поток заряженных частиц плазмы на стенки камеры, обратный поток электронов из ИОС	Установка постоянных магнитов на задней стенке
Нейтральный газ в объеме камеры	Водяное охлаждение фарадеевского экрана и других элементов (фланцы)
Скин-токи	Водяное охлаждение экрана, фланцев, антенны

Таблица 5.1.1 Классификация тепловых нагрузок и способы их уменьшения

Существует два основных канала нагрева элементов эмиттера – это поток горячих частиц и наводимые скин-токи. Роль нагрева скин-токами не столь значительна, при напряжении на антенне в 9 кВ и шунтовом сопротивлении антенны на резонансной частоте в 25 кОм , выделяется мощность около $1,6 \text{ кВт}$, что составляет около 10% процентов от мощности потока частиц на стенку. Предполагалось, что поток частиц имеет одинаковую по всем направлениям плотность и распределяется между боковой и торцевыми стенками плазменной камеры соответственно их площадям. Полная мощность потока оценивалась как вся поглощаемая разрядом 13 кВт (см. главу 4)

5.2 Система охлаждения

Численно была проверена эффективность системы водяного охлаждения, спроектированной для данного эмиттера.

Фарадеевский экран – это полый металлический (медный или алюминиевый) цилиндр небольшой толщины с продольными прорезями, занимающими до половины площади поверхности. Фарадеевский экран по размерам почти совпадает с внутренними размерами плазменной камеры и должен устанавливаться в непосредственной близости от стенок. Его функция заключается в поглощении значительной части потока частиц на стенку камеры. Продольные прорези позволяют ВЧ полю проникать внутрь и не дают течь наводимым антенной скин-токам. Необходимость в фарадеевском экране появляется при работе на больших мощностях и при большой длительности импульса, т.к.

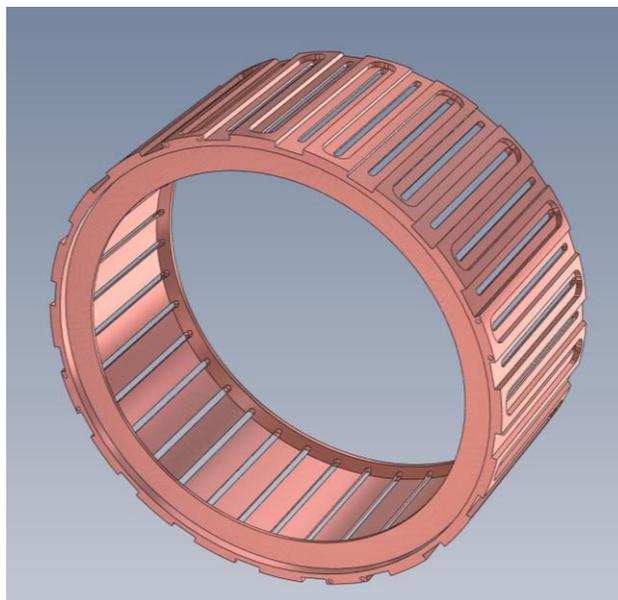


Рисунок 5.2.1. Фарадеевский экран с водяным охлаждением.

невозможно эффективно отводить тепло от керамической стенки с низкой теплопроводностью. Однако, наличие фарадеевского экраны уменьшает эффективность проникновения ВЧ-поля в объем плазменной камеры, а значит уменьшает эффективность горения разряда [6]. Для данного эмиттера спроектирован фарадеевский экран с водяным охлаждением.

Спроектированная керамическая камера имеет внутреннюю поверхность специальной формы – продольные пазы, которые совпадают с каналами водяного охлаждения фарадеевского экрана (рисунок 5.2.2).

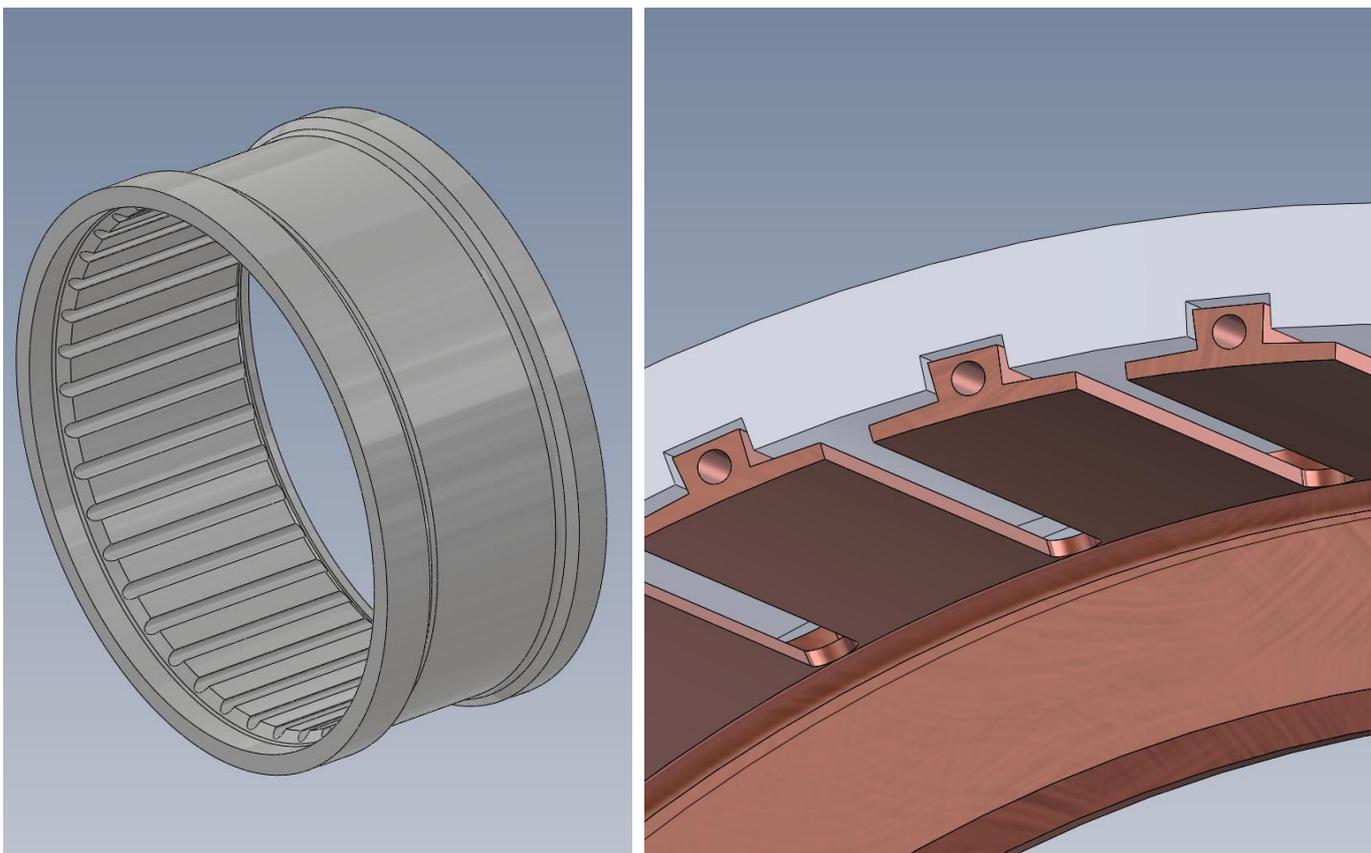


Рисунок 5.2.2. Керамическая стенка плазменной камеры с продольными пазами (слева), совпадающими с каналами охлаждения фарадеевского экрана (справа).

Задняя стенка (рисунок 5.2.3) эмиттера также испытывает значительные тепловые нагрузки как за счет потока частиц из плазмы, так и вследствие обратного тока электронов из ионно-оптической системы инжектора. Для подавления этих нагрузок устанавливаются постоянные магниты, поле которых препятствует бомбардировке стенки заряженными частицами. Более того, наличие магнитов на задней стенке увеличивает поток ионов из камеры [8], все современные плазменные эмиттеры оснащаются магнитной задней стенкой. Задняя стенка для данного эмиттера выполнена из молибдена и имеет систему водяного охлаждения – два медных канала.

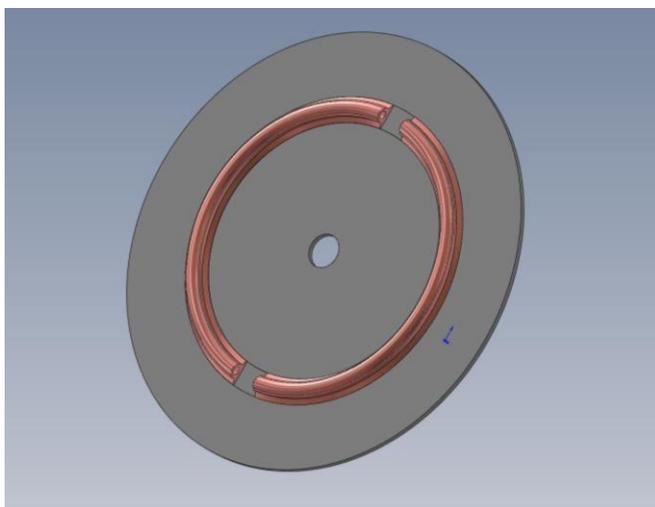


Рисунок 5.2.3 Молибденовый задний фланец с медными каналами охлаждения.

5.3 Численные оценки

Численные расчеты тепловых нагрузок на стенки плазменной камеры проводились с помощью программы Ansys 12. Программа позволяет получить распределение температуры на поверхности со сложной геометрией, задав плотность потока тепла на эту поверхность. Каналы охлаждения моделировались как термостатированные элементы конструкции, что соответствует наиболее эффективному теплосъёму водой, температура которой поддерживается постоянной на уровне 22°C .

5.3.1 Фарадеевский экран

На рисунке 5.3.1 представлено распределение температуры на поверхности фарадеевского экрана через 10 сек , при мощности потока 9 кВт , что соответствует такой доли от полной мощности, которую занимает поверхность экрана от полной поверхности камеры.

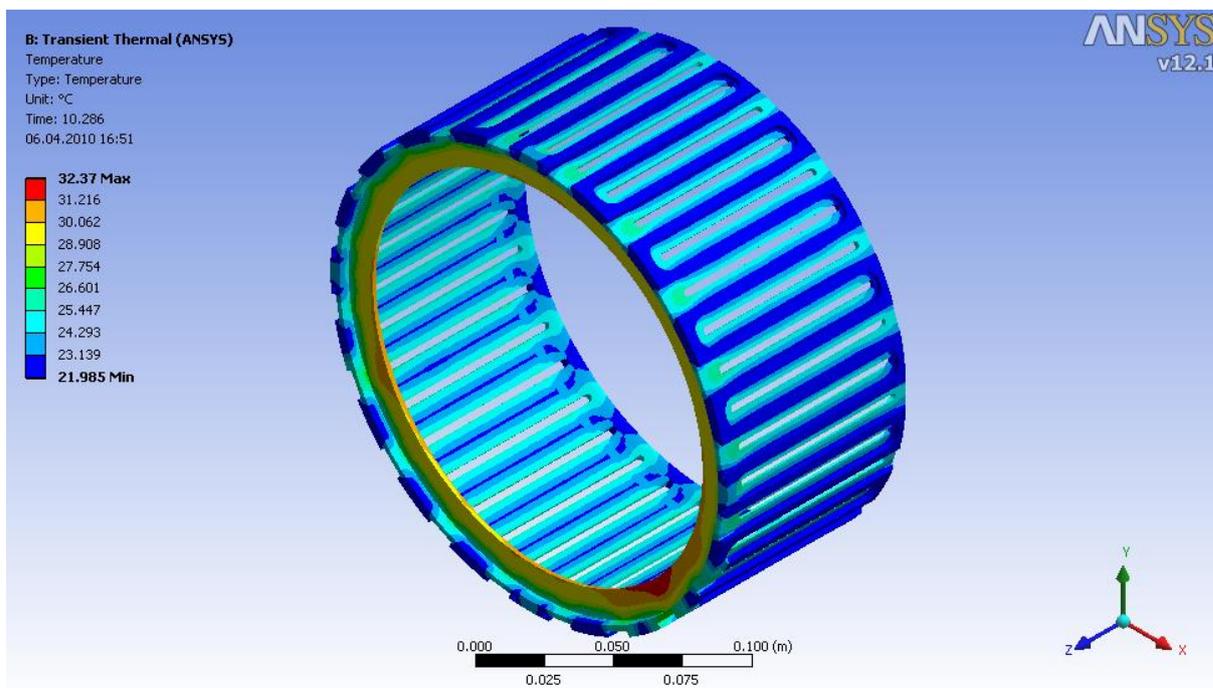


Рисунок 5.3.1 Распределение температуры на поверхности фарадеевского экрана после 10 сек работы.

Температура поверхности после 10 сек работы стабилизируется и не превышает 32°C , что дает основания сделать вывод, что разработанный экран имеет эффективную систему охлаждения и способен работать как в десятисекундном, так и в непрерывном режиме. Продольные разрезы занимают около 20% поверхности фарадеевского экрана. Все заряженные частицы, проходящие сквозь эти щели попадают на керамическую стенку, что соответствует мощности около 2 кВт . Обеспечить эффективный теплосъем с керамики в непрерывном режиме работы в такой конструкции не удастся. Для этого требуется другая конструкция фарадеевского экрана, полностью закрывающая попада-

ние плазмы на керамику. Но для *10 сек* импульса с паузами между импульсами *100 сек* эта конструкция вполне подходит.

5.3.2 Задний фланец

На рисунке 5.3.2 представлено распределение температуры на поверхности молибденового заднего фланца через *10 сек* при мощности потока *3 кВт*, что соответствует такой доли от полной мощности, которую занимает поверхность заднего фланца от полной поверхности камеры.

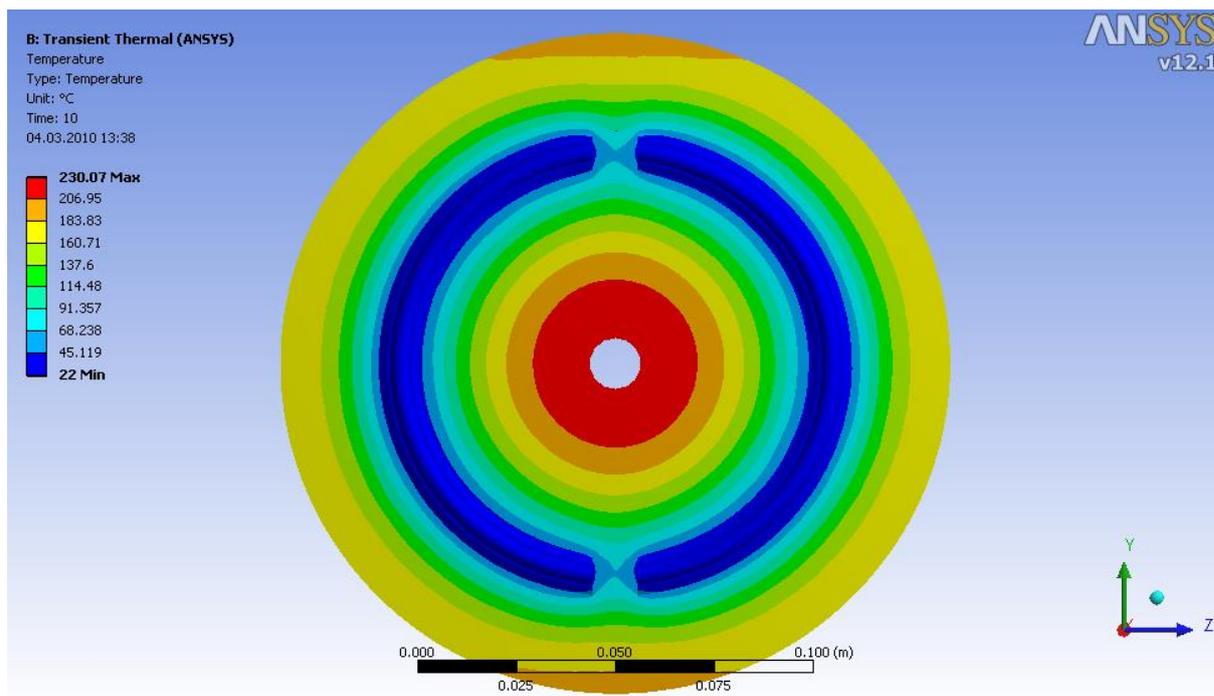


Рисунок 5.3.2. Распределение температуры на поверхности заднего фланца после *10 сек* работы.

После *10 сек* работы поверхность вблизи центра нагревается до 230°C , а на периферии до 200°C , что является неприемлемым по причине соприкосновения этой части с индиевым уплотнением, температура плавления которого 150°C . Однако, это моделирование не учитывает наличие постоянных магнитов на задней стенке, что должно значительно снизить поток горячих заряженных частиц и понизить максимальную температуру.

6 Профиль плотности ионного тока

Ионный источник диагностического инжектора для стелларатора W7-X должен формировать поток ионов 10 А , причем накладываются жесткие требования на угловую расходимость пучка $\leq 0,5^\circ$. Спроектированная для данного инжектора ионно-оптическая система имеет такую геометрию, что при превышении плотности тока в 120 мА/см^2 , возрастает нескомпенсированный пространственный заряд ионного пучка, что увеличивает его угловую расходимость. По этой же причине накладываются ограничения на однородность профиля потока ионов ($\pm 10\%$).

6.1 Схема эксперимента

В плоскости вытягивания ионов был установлен сеточный зонд (рисунок 6.1.1), имеющий возможность передвигаться по вертикали с помощью шагового двигателя, что позволяло измерить профиль плотности потока ионов из эмиттера.

Сеточный зонд – это диагностическое устройство, преобразующее поток ионов плазмы в электрический сигнал, принципиальная схема показана на рисунке 6.1.2.

Коллектор зонда (1) находится под отрицательным потенциалом -2.7 кВ , вытягивающим положительные ионы плазмы.

Для подавления эффекта вторичной эмиссии перед коллектором установлен электрод в виде сетки (2) с потенциалом -3 кВ . Эта сетка называется запирающей, она возвращает на коллектор электроны, выбитые с коллектора ионами. Ионы проходят через сетку входного отверстия корпуса (3), далее через запирающую сетку и затем попадают на коллектор. Ток коллектора измеряется с помощью шунтового сопротивления осциллографом. Плотность ионного тока равна:

$$j = \frac{I}{S_{\text{эфф}}} = \frac{U_{\text{ш}}}{S_{\text{эфф}} \cdot R_{\text{ш}}} \quad (6.1.1)$$



Рисунок 6.1.1. Металлическая пластина с пазом, установленная в плоскости вытягивания ионов имитирует влияние плазменной сетки ионно-оптической системы.

где I – ток коллектора, $U_{ш}$ – напряжение, измеряемое осциллографом, $R_{ш}$ – шунтовое сопротивление, а $S_{эфф}$ – площадь входного отверстия зонда, с учетом его прозрачности. Зная $S_{эфф} = 1,28 \text{ мм}^2$ и $R_{ш} = 1000 \text{ Ом}$ получаем рабочую формулу:

$$j = 78 \cdot U[B] \left(\frac{\text{mA}}{\text{см}^2} \right), \quad (6.1.2)$$

где $U[B]$ – сигнал с осциллографа (рисунок 6.1.3), по которому и рассчитывалась плотность ионного тока.

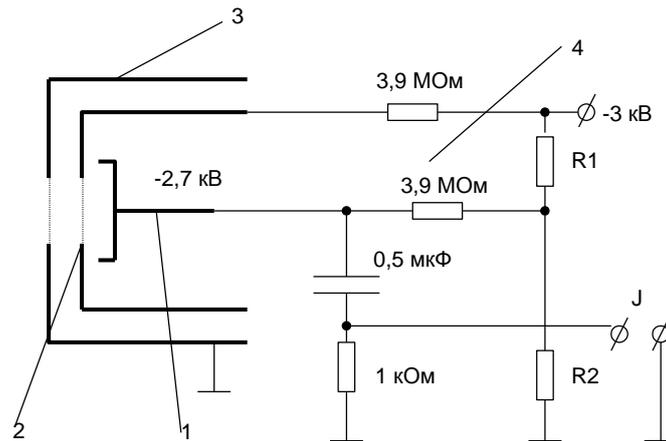


Рисунок 6.1.2. Сеточный зонд и схема измерений: 1 – коллектор, 2 – запирающая сетка под потенциалом -3кВ, 3 – корпус зонда с входным отверстием, 4 – схема измерений.

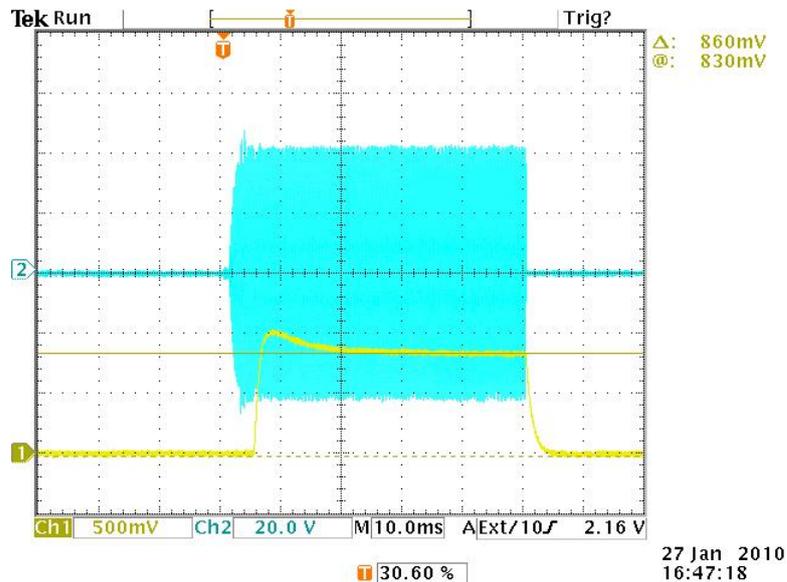


Рисунок 6.1.3. Типичная осциллограмма. Сигнал с зонда (Ch1) и напряжение на антенне (Ch2), измеренное трансформатором с коэффициентом передачи 1:100.

6.2 Измерение профиля плотности ионного тока

Профиль плотности измерялся при различных напряжениях на антенне эмиттера (рисунок 6.2.1). При напряжении в 9 кВ была достигнута требуемая величина тока с приемлемой однородностью. На радиусе 90 см однородность профиля составляет $\pm 10\%$. При уменьшении плотности тока однородность уменьшается до $\pm 20\%$ при напряжении 4 кВ .

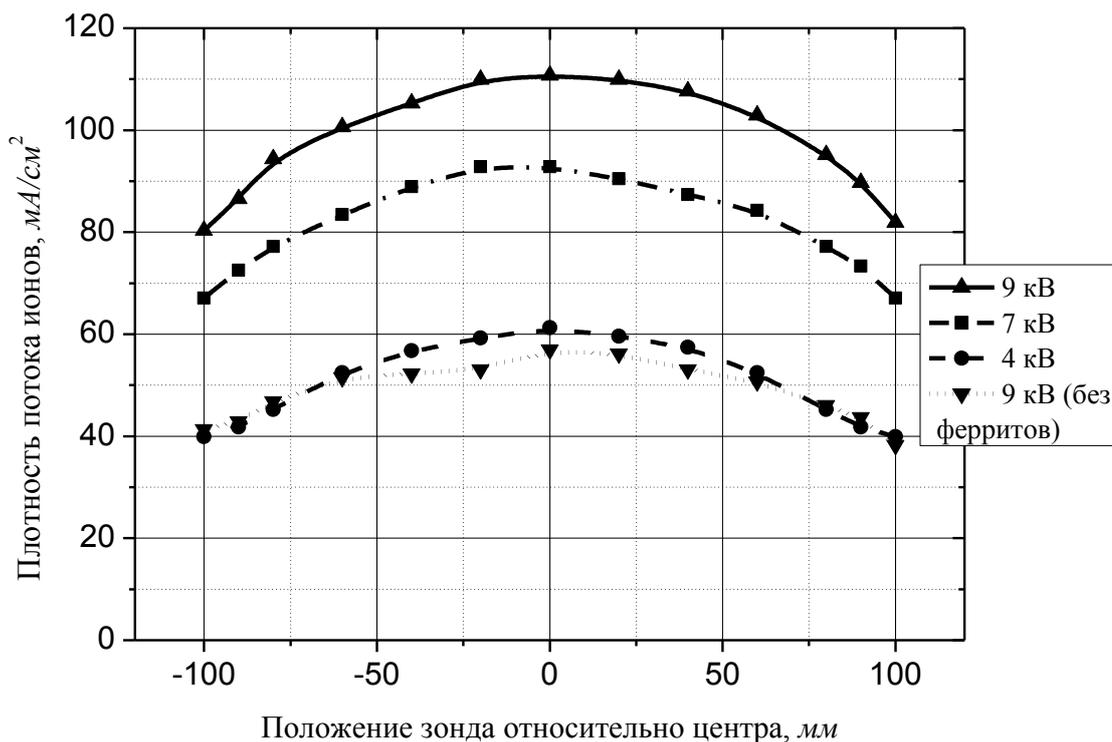


Рисунок 6.2.1. Профиль плотности ионного тока. Область вытягивания ионов имеет радиус 100 мм .

Также была исследована зависимость профиля плотности от наличия ферритовых полуколец вокруг антенны. Как видно из рисунка 6.2.1., при том же напряжении на антенне, отсутствие ферритов приводит к падению плотности, однако, одновременно с этим профиль плотности становится более однородным. Это можно объяснить тем, что ферритовые полукольца концентрируют ВЧ-поле внутри газоразрядной камеры, за счет чего увеличивается энергетическая эффективность разряда. Можно предположить, что улучшение однородности профиля связано с тем, что изменяется распределение плазмы внутри плазменной камеры – в пристеночной области создается более плотная плазма. Однако сделанные выводы имеют исключительно качественный характер. Чтобы описать количественное влияние, нужно знать каково эквивалентное сопротивление плазмы без ферритовых полуколец, и, соответственно, какая мощность поглощается в разряде в соответствующем эксперименте.

Заключение

Представленные данные по разработке высокочастотного плазменного эмиттера состоят из четырех основных частей:

1. Высокочастотный генератор был настроен на оптимальный режим работы. Для того чтобы генератор выдавал требуемую мощность и чтобы установить наиболее эффективный для разработанного эмиттера согласующий элемент была исследована зависимость мощности, выдаваемой генератором, от величины нагрузки. По полученной зависимости оптимальная согласованная нагрузка генератора составляет 400 Ом , а рабочий диапазон нагрузок лежит в пределах до 900 Ом .
2. Определение величины эквивалентного сопротивления плазмы ($\sim 3 \text{ кОм}$), приведенного к подводам антенны, позволило вычислить поглощаемую плазмой мощность и узнать параметры согласующего элемента, устанавливаемого между генератором и эмиттером.
3. Большая длительности работы эмиттера связана с существенными тепловыми нагрузками на стенки плазменной камеры. Для проверки эффективности спроектированной системы охлаждения были проведены численные оценки температуры фарадеевского экрана и заднего фланца после 10 сек работы в оптимальном режиме. Оценки показали, что спроектированная система водяного охлаждения эффективно справляется со своей задачей.
4. Для диагностического инжектора очень важна маленькая угловая расходимость пучка. Спроектированная ИОС инжектора рассчитана на хорошую ($\pm 10\%$) однородность ионного тока из плазменной камеры и величину этого тока не более 120 мА/см^2 . Проведенные исследования профиля плотности потока ионов показали, что однородность потока удовлетворительна при оптимальном режиме работы эмиттера.

Разработка плазменного эмиттера диагностического инжектора для стелларатора Wendelstein 7-X не ограничивается вышеперечисленными пунктами. Предстоит также работа по измерению ионной температуры плазмы, экспериментальному исследованию влияния фарадеевского экрана на параметры плазмы, более точному определению потребляемой мощности, измерению температуры нагреваемых элементов эмиттера. Также должны быть проведены испытания эмиттера с ионно-оптической системой. В будущем планируется модернизировать эмиттер для работы в непрерывном режиме

Литература

- [1] Deichuli P.P., Davydenko V.I., Ivanov A.A. et al.// Rev. Sci. Instrum., 2004, vol. 75, No 5, p. 1816-1818.
- [2] Ivanov A.A., Davydenko V.I., Deichuli P.P. et al, // Rev. Sci. Instrum., 2000, vol.71, No 10, p.3728–3735.
- [3] Alexander N. Karpushov et al, // Fusion Engineering and Design, 2003, vol. 66-68, p.899-904, Proceedings of 22nd Symposium on Fusion Technology (Finland, 2002).
- [4] Deichuli P.P. et al.// Rev. Sci. Instrum., 2006, vol. 77, No 3, 03B514
- [5] Иванов А.А., Шиховцев И.В., Подыминогин А.А. и др. // Физика плазмы. 2002 Т.28 №5. С. 221-228.
- [6] Kraus W. et al. // Fusion Engineering and Design, 1994, vol. 1, p.573-476, Proceedings of 18th Symposium on Fusion Technology (Germany, 1994).
- [7] Н.Н. Семашко, А.Н. Владимиров, В.В. Кузнецов, В.М. Кулыгин, А.А. Панасенков. Инжекторы быстрых атомов водорода. М, Энергоиздат, 1981
- [8] М.Д. Габович. Физика и техника плазменных источников ионов. М, Атомиздат, 1972
- [9] А.А. Иванов, А.А. Подыминогин, И.В.Шиховцев, Высокочастотный ионный источник с повышенным содержанием протонов в пучке, Журнал технической физики, 2007, том.77, вып.1, стр.104-108

