

**МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное агентство
по образованию**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НГУ)**

физический факультет

**Квалификационная работа на соискание
степени магистра**

Кафедра физики плазмы

Колмогоров Антон Вячеславович

**Формирование сфокусированного пучка нейтральных атомов в
диагностическом инжекторе**

**Научный руководитель:
Доктор физ-мат наук, в.н.с. Давыденко В. И.**

Новосибирск – 2009 год

Содержание

1. Введение	3
2. Устройство диагностического инжектора нейтральных атомов	5
2.1. Принципиальная схема диагностического инжектора	5
2.2. Формирование элементарного пучка в ячейке ионно-оптической системы	6
2.3. Геометрическая фокусировка пучка	8
3. Расчет ионно-оптической системы	9
3.1 Расчет ионно-оптической системы диагностического инжектора ДИНА для установки MST.....	10
3.2 Расчет ионно-оптической системы диагностического инжектора ДИНА-КИ.....	12
4. Экспериментальное исследование	15
4.1 Инжектор ДИНА для установки MST	16
4.2 Инжектор ДИНА-КИ для токамака T-10.....	17
5. Обработка результатов.....	19
Выводы	22
Список литературы.....	23

1. Введение

В настоящее время пучки высокоэнергетичных атомов широко используются для диагностики плазмы. Они успешно применяются в таких диагностиках, как резерфордовское рассеяние атомов пучка на ионах плазмы с последующим определением их температуры, измерения профиля плотности плазмы при регистрации вторичных ионов. Спектроскопия плазмы с использованием нейтральных пучков позволяет измерять пространственное распределение различных параметров в магнитных ловушках. Широкое распространение получили диагностики CXRS (Charge Exchange Recombination Spectroscopy) и BES (Beam Emission Spectroscopy), которые позволяют измерять ионную температуру, температуру и плотность примесей в плазме. Одним из немногих методов локального измерения магнитного поля в плазме является использование динамического штарк-эффекта (Motional Stark Effect, MSE) при инжекции нейтрального пучка в плазму. В системе отсчета атома, движущегося в магнитном поле, возникает электрическое поле, пропорциональное скорости атома и величине поля $\vec{E} = \frac{1}{c} [\vec{V} \times \vec{B}]$. В электрическом поле линии излучения атома расщепляются вследствие штарк-эффекта. Регистрация спектра излучения позволяет определять поле \vec{E} и, соответственно, поле \vec{B} . Пучок быстрых атомов инжектируется под углом, близким к 90° к силовым линиям магнитного поля. При столкновении с частицами плазмы атомы пучка возбуждаются и излучают. Наблюдение спектра этого излучения под углом к оси пучка позволяет определить степень расщепления линии, а следовательно и локальную величину поля B .

Для обеспечения локальности измерений необходимо иметь малый поперечный размер пучка и высокую плотность тока в зоне измерений. Ионный источник обычно располагается на расстоянии $1\div 3$ м от плазменной камеры. Для обеспечения достаточного поперечного размера пучка в плазме ~ 10 см необходимо иметь расходимость пучка не хуже 10^{-2} рад и использовать геометрическую фокусировку пучка.

В Институте ядерной физики СО РАН работы по атомарным пучкам для диагностики плазмы ведутся с начала 70-х годов. Была разработана серия импульсных диагностических инжекторов ДИНА для магнитных ловушек средних размеров, инжектор RUDI с длительностью действия до 10 с для больших токамаков. Проведены работы по отладке и оптимизации инжектора ДИНА для установки MST с энергией атомов 50 кэВ, угловой расходимостью пучка не более 10^{-2} рад, ионным током до 5,5 А и длительностью импульса до 20 мс. В настоящий момент ведутся работы по отладке инжектора ДИНА-КИ для токамака Т-10, расположенного в ИЯС имени Курчатова с энергией атомов 40 кэВ,

расходимостью пучка не более 10^{-2} рад, ионным током до 5 А и длительностью импульса до 20 мс.

Важным элементом формирования пучка атомов является ионно-оптическая система (ИОС). Она служит для вытягивания ионов из камеры дугового генератора и последующего их ускорения. Геометрия ИОС рассчитана и изготовлена таким образом, чтобы достигалась минимальная расходимость пучка при заданной плотности тока.

Данная работа посвящена расчету и экспериментальному изучению ионно-оптических систем диагностических инжекторов ДИНА и ДИНА-КИ.

2. Устройство диагностического инжектора нейтральных атомов

2.1. Принципиальная схема диагностического инжектора

Основными элементами импульсного инжектора являются источник плазмы, ускоряющая система и нейтрализатор. На рис. 2.1 показана схема ионного источника диагностических инжекторов ДИНА и ДИНА-КИ.

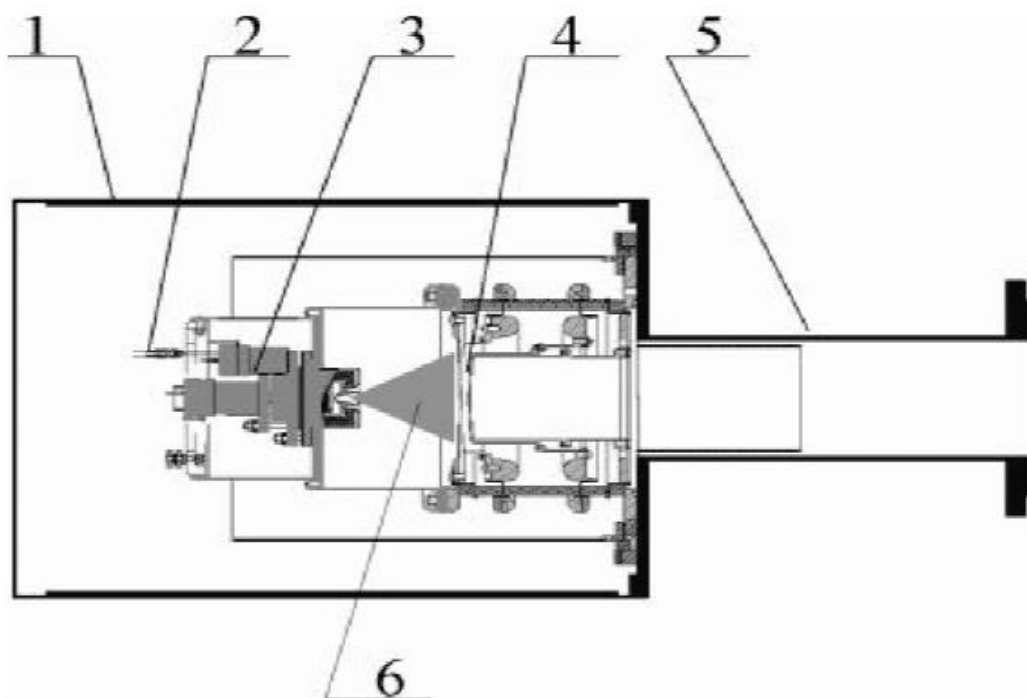


Рис. 2.1: Схема ионного источника. 1 – магнитный экран; 2 – подача газа; 3 – источник плазмы; 4 – ИОС; 5 – нейтрализатор; 6 – плазма.

Источником плазмы является генератор плазмы с дуговым разрядом с холодным катодом в газе. Ток разряда до 500 А при напряжении разряда 60-80 В. Перед началом рабочего импульса со стороны катода в течение нескольких сот микросекунд осуществляется импульсный напуск газа для инициализации дуги, основной напуск рабочего газа производится в прианодную область в течение всего импульса. Для увеличения выхода плазмы на разряд накладывается продольное магнитное поле, которое создается катушкой, расположенной вблизи анода. Плазма вытекает в анодное отверстие и расширяется до размера ИОС. Плотность плазмы вблизи анодного отверстия достигает $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$, в плоскости плазменной сетки плотность падает до требуемой величины $n \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Особенностью выбранного плазменного эмиттера на основе дугового разряда является применение периферийного мультипольного магнитного поля. Вследствие отражения периферийной части плазменной струи от мультипольного магнитного поля в области плазменной сетки формируется плазменный эмиттер с достаточной пространственной однородностью. Использование периферийного магнитного поля обычно повышает эмиссионную плотность тока примерно вдвое, позволяя использовать дуговой генератор плазмы с умеренным потоком плазмы. Периферийное магнитное поле создается набором из 16 постоянных магнитов из $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$ длиной 80 мм и сечением 9×12 мм, расположенных на внешней стенке экспандерной камеры.

С помощью ИОС из плазменного эмиттера вытягивается и формируется пучок ионов. Далее ионный пучок попадает в нейтрализатор, в который напускается газ с помощью импульсного клапана.

2.2. Формирование элементарного пучка в ячейке ионно-оптической системы

Формирование ионных пучков с током в несколько ампер и энергией десятки килоэлектронвольт производится с помощью многоапертурных систем вытягивания ионов. Невозможность использования одноапертурной ИОС связана с ограничением тока для одноапертурной системы с круглым эмиттером. Предельный ток в ионном пучке в этом случае с хорошей точностью может быть определен из закона Чайльда-Ленгмюра:

$$I = \sqrt{\frac{2e}{M}} \frac{U^{\frac{3}{2}} D^2}{36d^2} \quad (2.1)$$

где D – диаметр эмиттера, d – расстояние между плазменным и вытягивающим ионный пучок электродом, e и M заряд и масса иона, U – разность потенциалов между плазменным и вытягивающим электродами.

Поскольку для формирования направленного пучка необходимо, чтобы $d \geq D$, ток ионного пучка, сформированного ячейкой с круглыми апертурами, не может превзойти величины 0.52А для протонов с энергией 50кэВ. Поэтому используются многоапертурные системы, при этом каждая ячейка формирует независимый элементарный пучок.

В источниках ионов диагностических инжекторов ДИНА и ДИНА-КИ применяется четырехэлектродная ионно-оптическая система. На рис. 2.2 показана схематично элементарная ячейка такой системы. Поперечный импульс, приобретаемый ионами в поле пространственного заряда и поперечном электрическом поле вблизи ускоряющего электрода, компенсируется при движении в поперечном поле вытягивающего электрода.

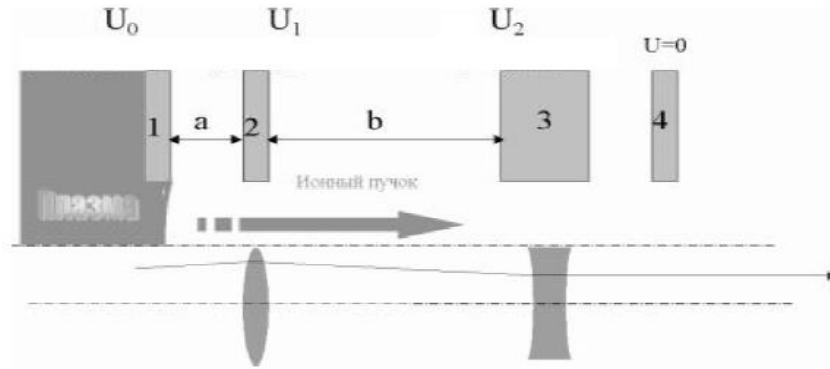


Рис. 2.2: Элементарная ячейка ИОС. 1 – плазменный электрод; 2 – вытягивающий электрод; 3 – ускоряющий электрод; 4 – заземляющий электрод.

Такая схема оказывается менее зависимой от формы плазменного эмиттера в сравнении с трехэлектродной ИОС, где отсутствует электрод с промежуточным потенциалом. Кроме того, распределение полного напряжения на два зазора позволяет повысить надежность работы ИОС при больших ускоряющих напряжениях.

В теоретических расчетах трудно учесть температуру ионов и абберации ИОС. Более полное исследование ИОС возможно при численном моделировании условий формирования пучка методом трубок тока. При этом решается уравнение Пуассона для нахождения поля потенциала:

$$\Delta\phi = 4\pi e(N - n) \quad (2.2)$$

где n – плотность ионов

$$n = \int f d\vec{V} \quad (2.3)$$

\vec{V} и f – скорость ионов и функция распределения соответственно. Для определения f необходимо решить уравнение Власова:

$$\vec{V} \cdot \nabla f - (e/M)\nabla\phi \cdot \nabla_v f = 0 \quad (2.4)$$

Плотность электронов в эмиттере имеет больцмановское распределение

$$N = N_0 \cdot \exp(-e(\phi_0 - \phi)/T_e) \quad (2.5)$$

где ϕ_0 – потенциал плазмы, N_0 , T_e – плотность и температура электронов в плазме.

Решение уравнений (2.2) и (2.4) позволяет найти поля в зазорах ИОС и определить расходимость сформированного пучка. Для решения таких задач используются такие программы как AXCEL, PBGUNS, SAM.

2.3. Геометрическая фокусировка пучка

Для повышения плотности тока пучка в области измерений в плазме используют фокусировку пучка. В диагностических инжекторах ДИНА и ДИНА-КИ применяется геометрическая фокусировка. Electroды ИОС являются вложенными друг в друга сферическими сегментами. При этом шаг отверстий у всех сеток должен быть разным, чтобы обеспечить сходимость осей всех каналов в точку фокуса. Фокусное расстояние в этом случае равно радиусу кривизны электродов. Схематично геометрическая фокусировка представлена на рис. 2.3.

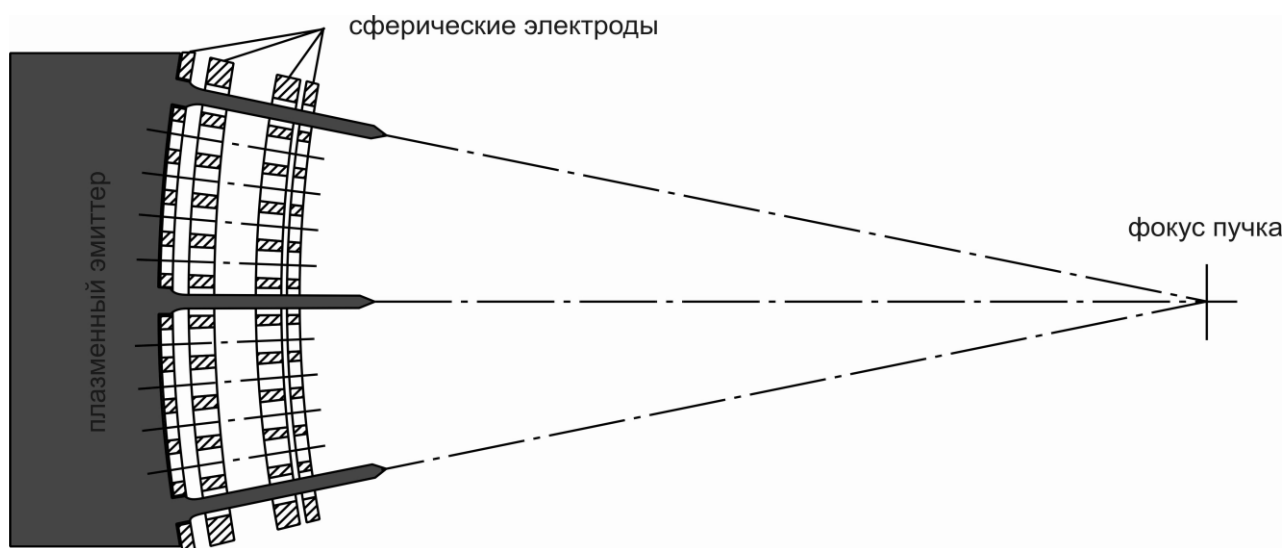


Рис. 2.3: Геометрическая фокусировка ИОС.

Величина плотности тока в фокусе определяется формулой:

$$j(r, F) = \frac{I_b e^{-r^2 / (\delta\alpha F)^2}}{\pi^2 F^2 \delta\alpha^2} \quad (2.6)$$

где I_b – ток элементарного пучка, $\delta\alpha$ – угловая расходимость, F – фокусное расстояние.

3. Расчет ионно-оптической системы

С помощью имеющейся в ИЯФ СО РАН программы PBGUNS проведено численное моделирование формирования пучка в элементарных ячейках ионно-оптических систем инжекторов ДИНА для установки MST, и ДИНА-КИ.

Поскольку параметры инжекторов близки, использовались схожие методы расчета. Были приняты следующие величины параметров: электронная температура $T_e = 8.0$ эВ, ионная температура $T_i = 2.0$ эВ. В результате расчетов получались диаграммы траекторий частиц водородного пучка, диаграммы эмиттанса на заданных расстояниях, форма плазменной границы, распределения плотности частиц в пучке. Полученные численные результаты обрабатывались с помощью программы MathCAD. Определялся угол, в котором происходит падение плотности в e раз относительно максимальной, и именно им определялась угловая расходимость атомного пучка.

Отрицательный потенциал на третьей сетке необходим для подавления обратного электронного тока. Минимальный необходимый потенциал третьей сетки соответствует появлению потенциального барьера для электрона в ускоряющем канале. Расчеты потенциального барьера, проведенные с помощью программного пакета USAM, приведены на рис 3.1. На рисунке показана выходная часть ускоряющего канала: ускоряющий (3й) электрод и заземленный. По оси абсцисс отложена координата вдоль оси канала, по оси ординат потенциал оси канала. Видно, что для появления барьера в несколько десятков вольт для данной геометрии сеток необходимо подать потенциал не менее -600 В, без учета пространственного заряда пучка.

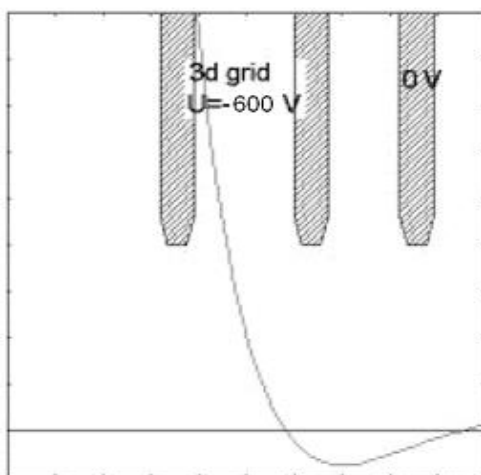


Рис. 3.1: Профиль потенциала на оси ячейки вблизи третьей сетки.

3.1 Расчет ионно-оптической системы диагностического инжектора ДИНА для установки MST

Для достижения требуемой расходимости 10^{-2} рад при заданном полном токе пучка 5.5А и энергии ионов 50кэВ, выбрана следующая геометрия ИОС инжектора: вытягивающий зазор - 3.2мм, ускоряющий зазор – 8.4мм, и зазор между 3й и 4й сетками – 1.5мм. Потенциалы, приложенные к электродам: плазменный – 50кВ, вытягивающий – 44кВ, ускоряющий – -600В, заземляющий – 0В. Геометрия выбиралась таким образом, чтобы при требуемой плотности тока угловая расходимость была минимальной. Для определения оптимальности геометрии строилась V-образная зависимость расходимости от плотности тока (рис 3.2).

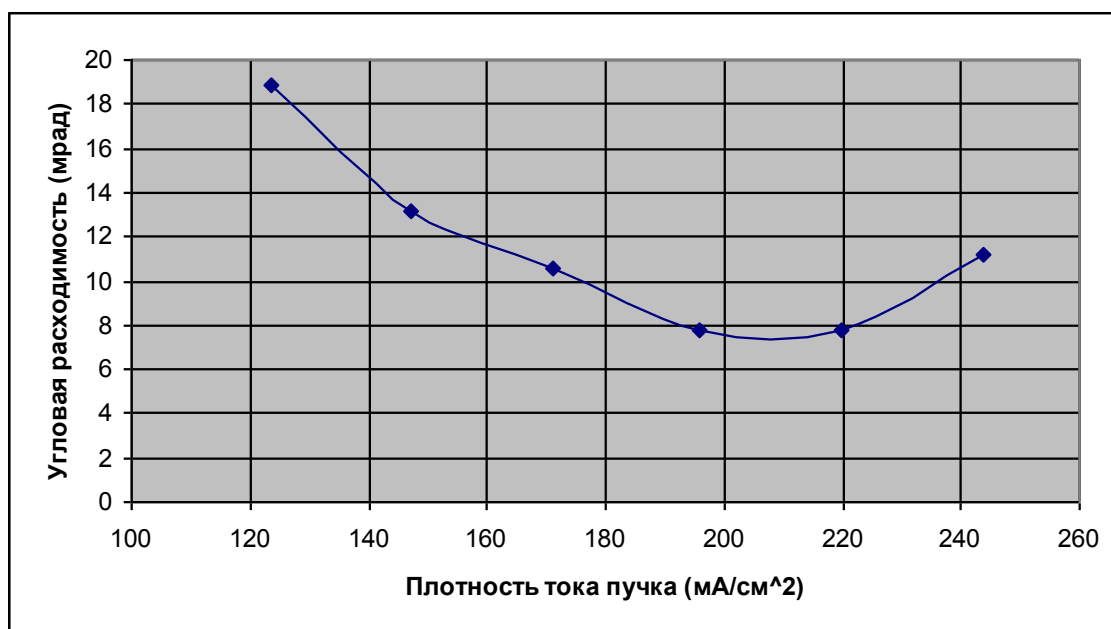


Рис. 3.2: Диаграмма зависимости угловой расходимости пучка от плотности тока.

При плотности тока 195 мА/см^2 расчетная расходимость является минимальной и составляет 7,8 мрад. В этой точке получены диаграммы траекторий частиц водородного пучка (рис. 3.3), диаграммы эмиттанса (рис. 3.4), распределения плотности ионов (рис. 3.5) и форма плазменной границы(рис. 3.6).

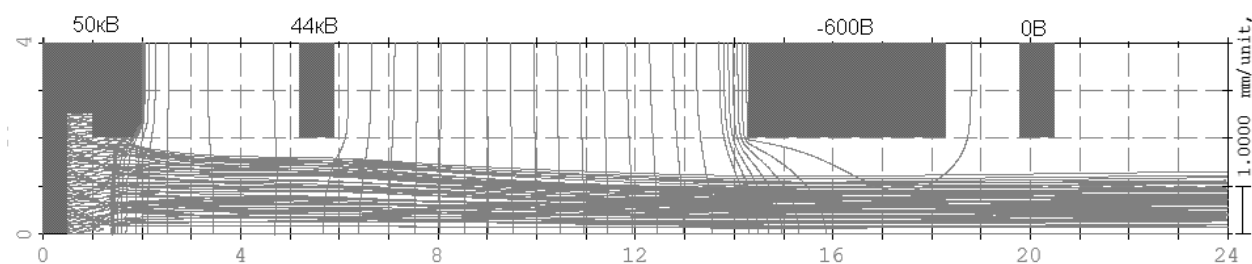


Рис. 3.3: Диаграмма траекторий частиц водородного пучка в элементарной ячейке.

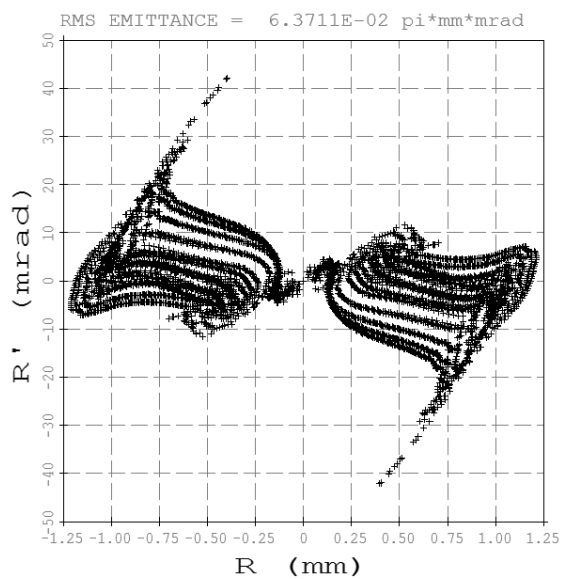


Рис. 3.4: Диаграмма эмиттанса

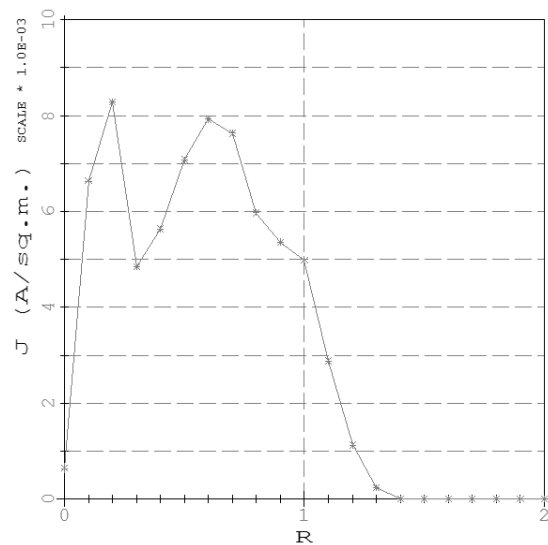


Рис. 3.5: Диаграмма распределения плотности ионов в пучке

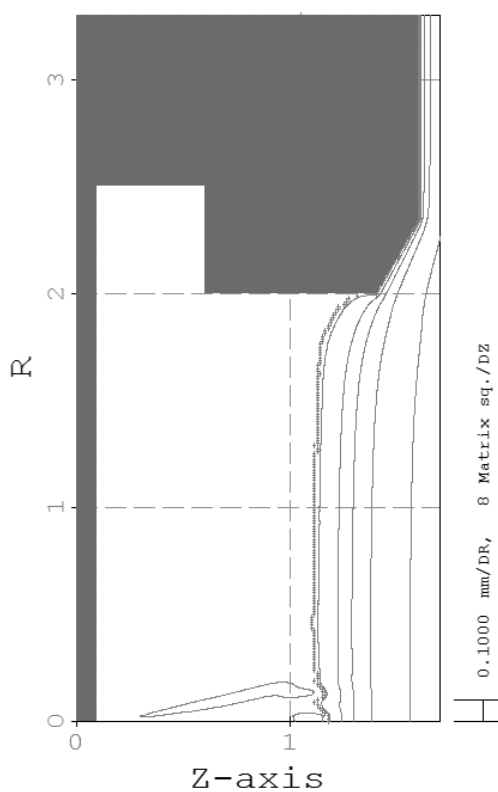


Рис. 3.6: Форма плазменной границы.

3.2 Расчет ионно-оптической системы диагностического инжектора ДИНА-КИ

При увеличении температуры и плотности плазмы в установке, требования к диагностическому инжектору возрастают. Для получения достаточной светимости, необходимо увеличивать ток инжектируемых частиц, при этом так же требуется, чтобы фокусировка пучка не ухудшалась. Плотность тока в ячейке определяется законом «трех вторых», из которого следует, что при неизменной энергии ионов для увеличения тока надо увеличивать общую площадь эмиттера. В этом случае при использовании круглых апертур увеличиваются размеры электродов, что значительно увеличивает требования на точность их изготовления. Другой ограничивающий фактор – невысокая, около 50%, прозрачность электродов с круглыми апертурами. Большое поглощение сетками энергии пучка приводит к их тепловой деформации, и, как следствие, изменению фокусного расстояния, что недопустимо.

Для решения этих проблем было предложено использование электродов с азимутальными апертурами. (рис. 3.7). Прозрачность электродов с щелевыми азимутальными апертурами достигает 75%.

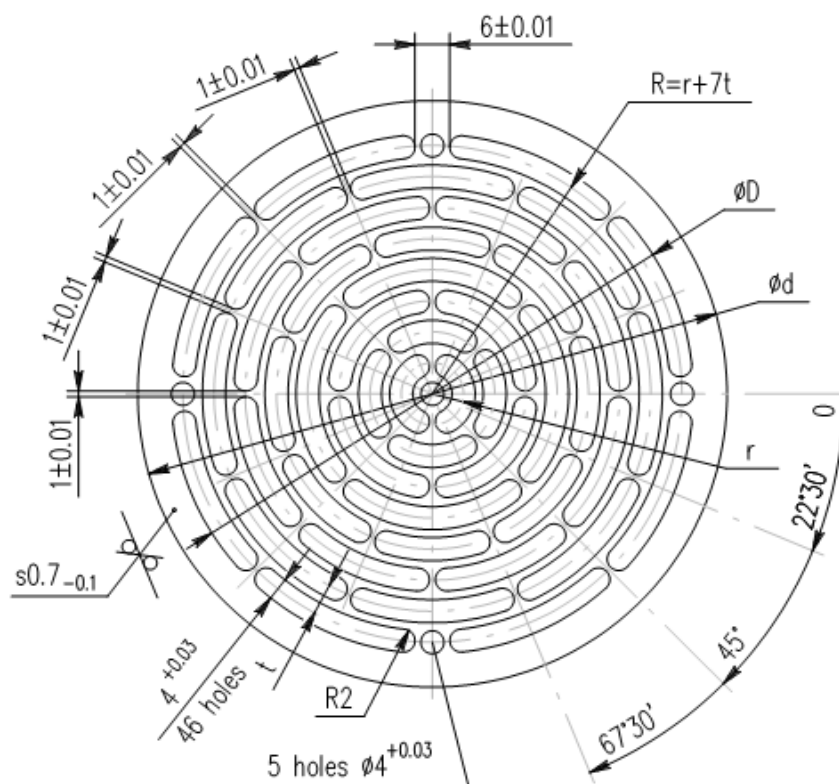


Рис. 3.7: Электрод ИОС с щелевыми азимутальными апертурами.

Проведены расчеты по оптимизации ИОС с такими электродами для инжектора ДИНА-КИ. Предполагалось, что щелевую апертуру можно с хорошей точностью рассматривать как длинное (1м в расчетах) прямоугольное отверстие, а области вблизи краев – как круглые апертуры. Поскольку площадь щелевой части апертур – основная, составляет более 90%, оптимизация проводилась именно по этой части.

Для обоих случаев проведено численное моделирование формирования пучка в элементарной ячейке ИОС с помощью программы RBGUNS. Были выбраны следующие параметры ИОС, удовлетворяющие требованию минимальности угла расходимости пучка: плазменный-вытягивающий – 3.3 мм; вытягивающий-ускоряющий – 8.7 мм и ускоряющий-заземляющий – 2.1 мм. Потенциалы, приложенные к сеткам: плазменная – 40 кВ, вытягивающая – 34.4 кВ, ускоряющая – -600 В, заземляющая – 0 В.

Зависимости расходимости от плотности тока для щелевой и цилиндрической геометрий показаны на рис. 3.8. Как видно из рисунка, оптимальные значения плотности тока для различных геометрий не совпадают. Поскольку наибольший вклад в расходимость дает часть пучка, проходящая через щелевые апертуры, рабочая область выбирается вблизи оптимума щелевой геометрии. Рабочий участок выделен жирными (красными) линиями. При плотности тока 140 mA/cm^2 расчетная угловая расходимость для

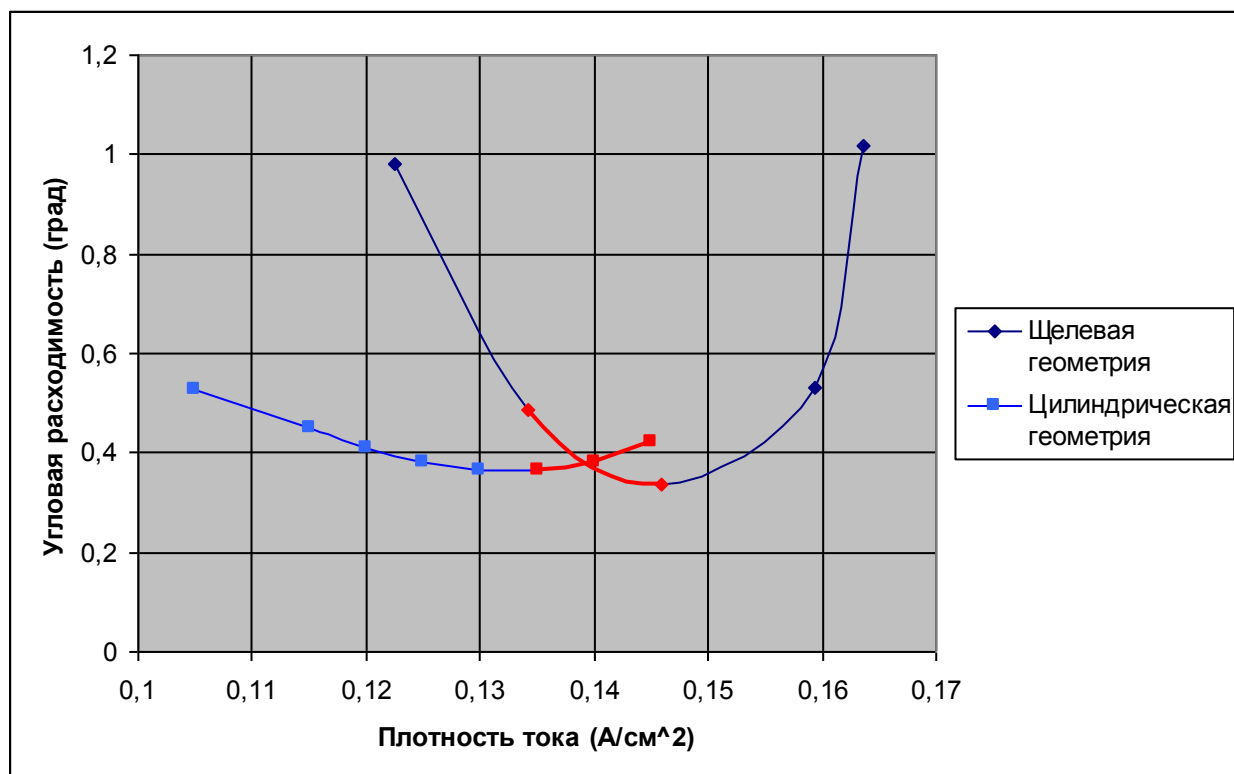


Рис. 3.8: Зависимость угловой расходимости от плотности тока.

обеих геометрий не превышает $0,5^\circ$, что удовлетворяет необходимому условию расходимости для данного диагностического инжектора. Приведены диаграммы траекторий частиц пучка (рис. 3.9, рис 3.10) и диаграммы эмиттанса (рис. 3.11, рис. 3.12) для цилиндрической и щелевой геометрий (соответственно) в рабочей области по плотности тока.

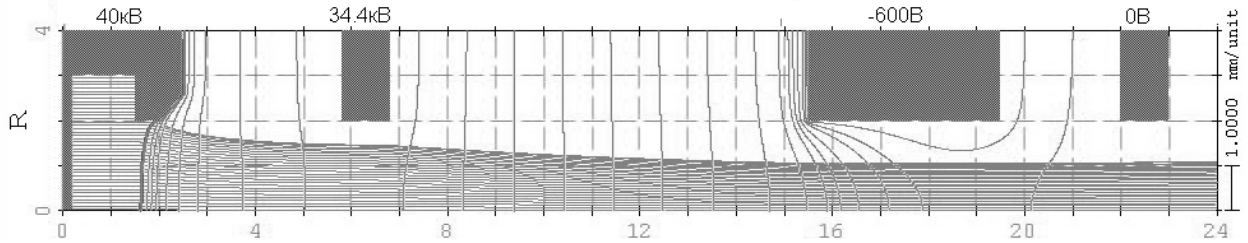


Рис. 3.9: Траектории частиц пучка в случае цилиндрической геометрии.

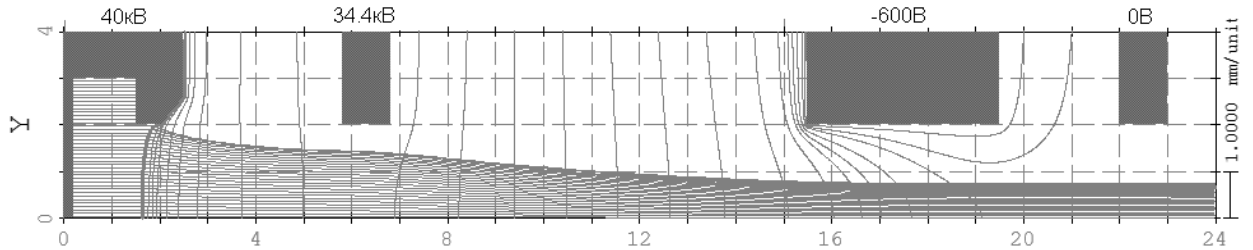


Рис. 3.10: Траектории частиц пучка в случае щелевой геометрии.

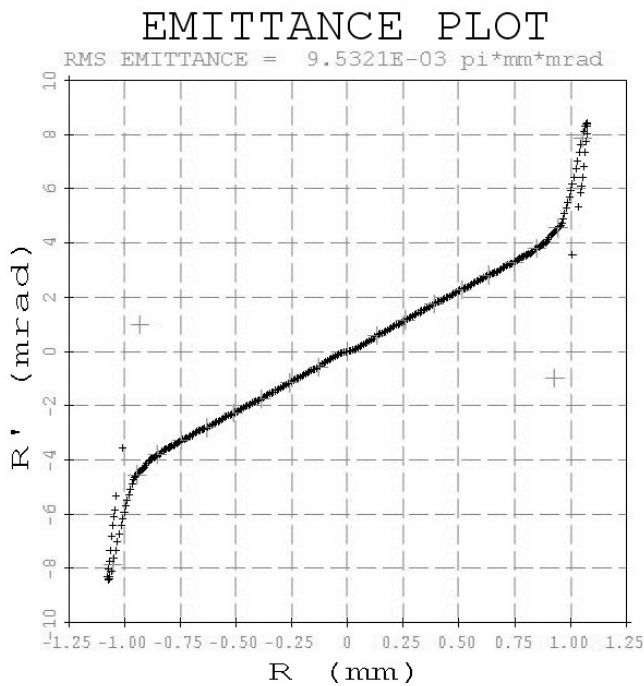


Рис. 3.11: Диаграмма эмиттанса в случае цилиндрической геометрии.

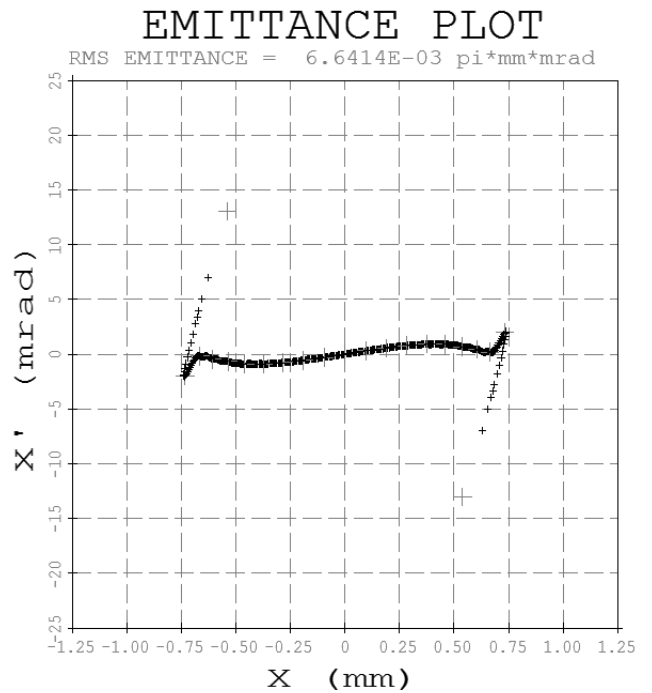


Рис. 3.12: Диаграмма эмиттанса в случае щелевой геометрии.

4. Экспериментальное исследование

Эксперимент проводился на специализированном инжекторном стенде, представляющем собой герметичную камеру с системой вакуумной откачки, пристыкованный к камере источник ионов, высоковольтный модулятор, систему питания дугового генератора плазмы и других вспомогательных систем питания.

Временная диаграмма работы основных систем инжекторов показана на рис. 4.1. В первую очередь возбуждается ток в катушке, создающей продольное магнитное поле в разряде (за $10 \div 15$ мс до импульса). Источник питания дугового разряда запускается за $5 \div 10$ мс. Напуск газа в область анода начинается за $5 \div 10$ мс до импульса и длится в течение всего импульса. Одновременно с этим начинается запуск газа в прикатодную область и длится до поджига дуги генератора плазмы. Затем на поджиговый электрод подается высоковольтный импульс. В результате пробоя на катод, образуется плазма, которая инициирует возникновение заряда между анодом и катодом. Импульс высокого напряжения стартует за $0.1 \div 0.2$ мс до начала импульса пучка. Это необходимо, чтобы предотвратить высоковольтный пробой на переднем фронте из-за несоответствия потока ионов из эмиттера и напряжения на электродах. Длительность импульса тока пучка определяется длительностью работы дугового разряда и длительностью импульса высоковольтного модулятора.

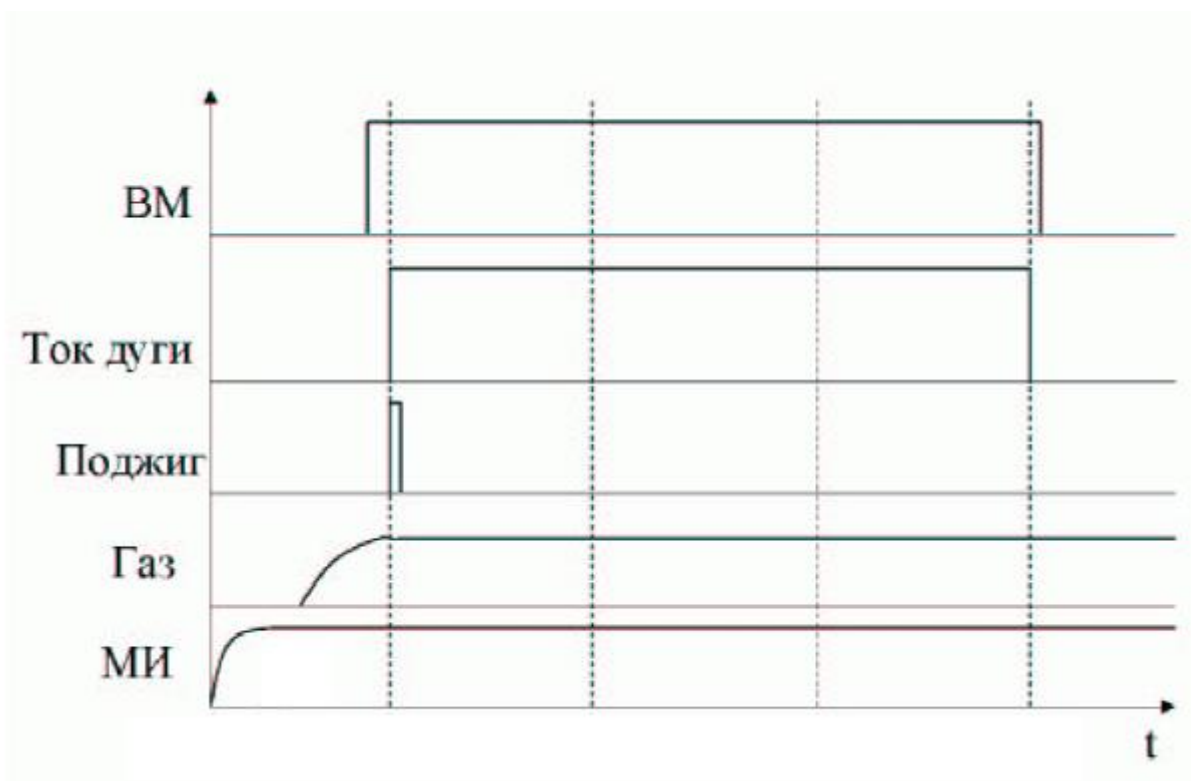


Рис. 4.1: Временная диаграмма основных систем ионного источника

4.1 Инжектор ДИНА для установки MST

Для изучения пучка ионов, сформированного ИОС инжектора ДИНА, проведен ряд экспериментов. Измерялись зависимости угловой расходимости пучка в зависимости от плотности тока пучка. Измерения проводились с помощью сборки вторично-эмиссионных датчиков и методами оптической диагностики.

Схема эксперимента показана на рис. 4.2. В дуговом генераторе создается плазма, попадающая на плазменный электрод ионно-оптической системы, которая формирует сфокусированный пучок ионов водорода. Далее пучок попадает в вакуумную камеру, в которой на подвижке с шаговым двигателем установлен зонд.

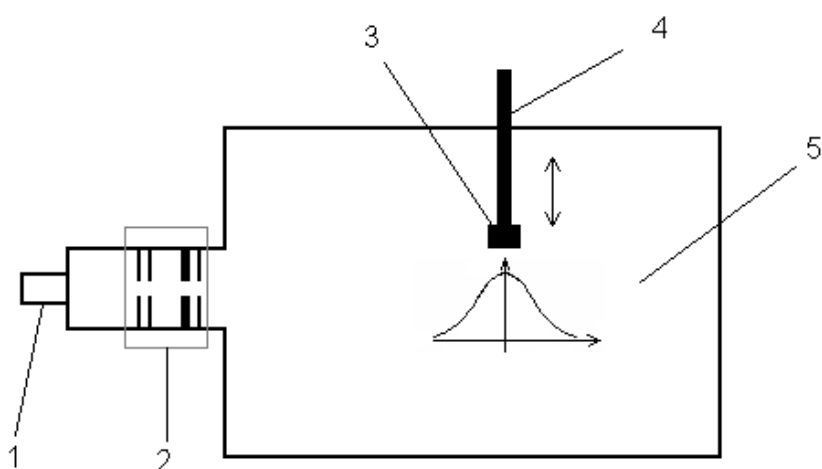


Рис. 4.2: Схема эксперимента. 1 – дуговой генератор плазмы; 2 – ионно-оптическая система; 3 – зонд; 4 – подвижка; 5 – вакуумная камера.

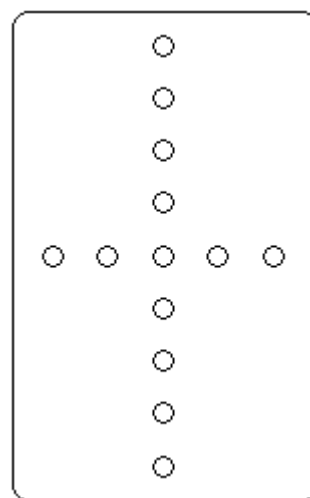


Рис. 4.3: Зонд.

Зонд (рис. 4.3) представляет собой сборку вторично-эмиссионных датчиков, расстояние между соседними составляет 15мм. Вертикальная линейка датчиков позволяет измерять распределение тока по радиусу, горизонтальная линейка необходима для юстировки зонда относительно центра пучка по горизонтали.

Ток со вторично-эмиссионных датчиков измерялся с помощью 16-разрядного АЦП и обрабатывался программой, написанной в среде National Instruments Labview (рис. 4.4). На верхней диаграмме изображены сигналы с различных датчиков, на нижней – срез в заданный момент времени. По полученным значениям тока в каждой точке методом последовательных приближений строилось распределение Гаусса и определялся радиус, на котором плотность тока падает в e раз.

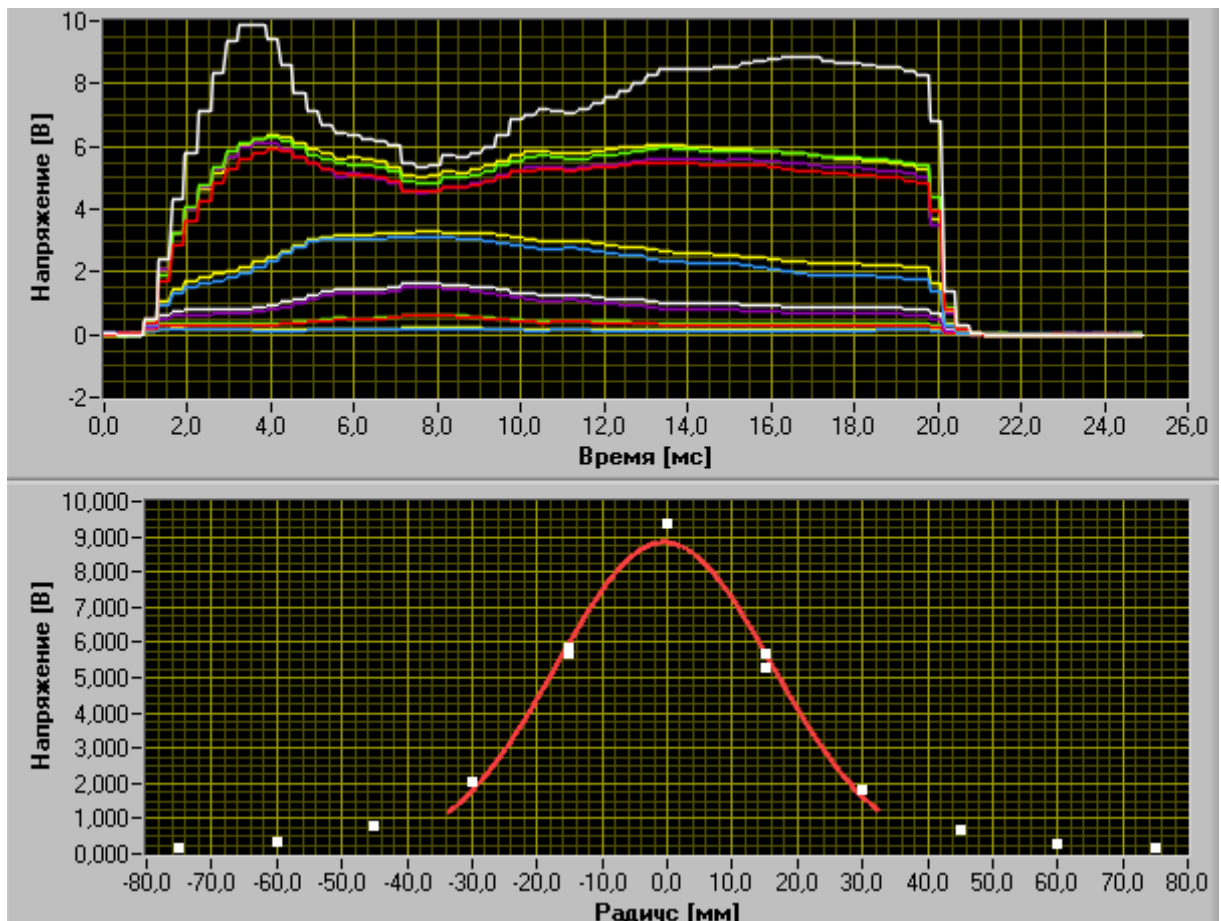


Рис. 4.4: Сигналы с вторично-эмиссионных датчиков (сверху); диаграмма распределения плотности тока в зависимости от датчика (снизу), срез в 4мс.

Так же расходимость пучка исследовалась методами оптической диагностики. Пучок фотографировался с максимальной выдержкой. Вблизи фокуса измерялось распределение интегральной светимости пучка. По распределению определялся радиус, на котором плотность тока падает в e раз.

4.2 Инжектор ДИНА-КИ для токамака Т-10

В настоящее время система питания инжектора находится в стадии отладки. Требуемые параметры инжектора – энергия частиц в пучке – 40кэВ, ток пучка – до 5А. Достигнутые параметры: энергия частиц – 30кэВ, ток пучка – 3А.

Поскольку электроды ионно-оптической системы из производства выходят с микродефектами, один из важных процессов отладки ионного источника – тренировка. В этом режиме постепенно повышается энергия ионов и величина тока пучка до тех пор, пока в течение выстрела не начинают возникать пробое между сетками. За счет пробоев дефекты сеток сглаживаются. Эффективным способом тренировки сеток является многопробойный режим (рис. 4.5). В момент пробоя система высоковольтного питания

отключается на 5мс, после чего восстанавливается, и работа источника продолжается либо до возникновения следующего пробоя, либо до момента окончания импульса.

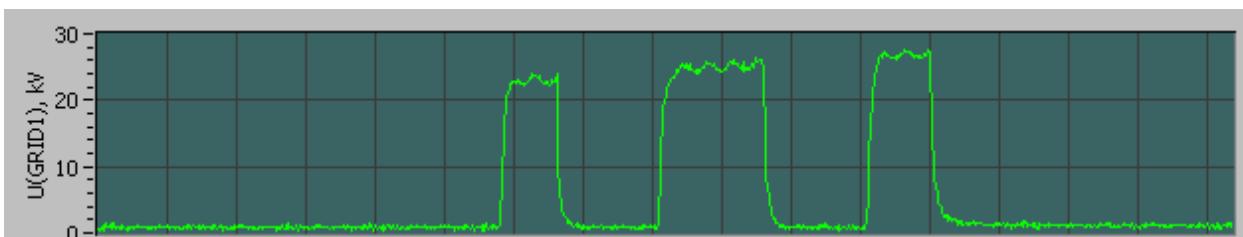


Рис. 4.5: Многопробойный режим – диаграмма напряжения на электродах ИОС.

Расходимость пучка исследуется методами оптической диагностики аналогично исследованию пучка инжектора ДИНА для установки MST.

На рис 4.6 представлен внешний вид ионного источника инжектора ДИНА-КИ для установки Т-10.

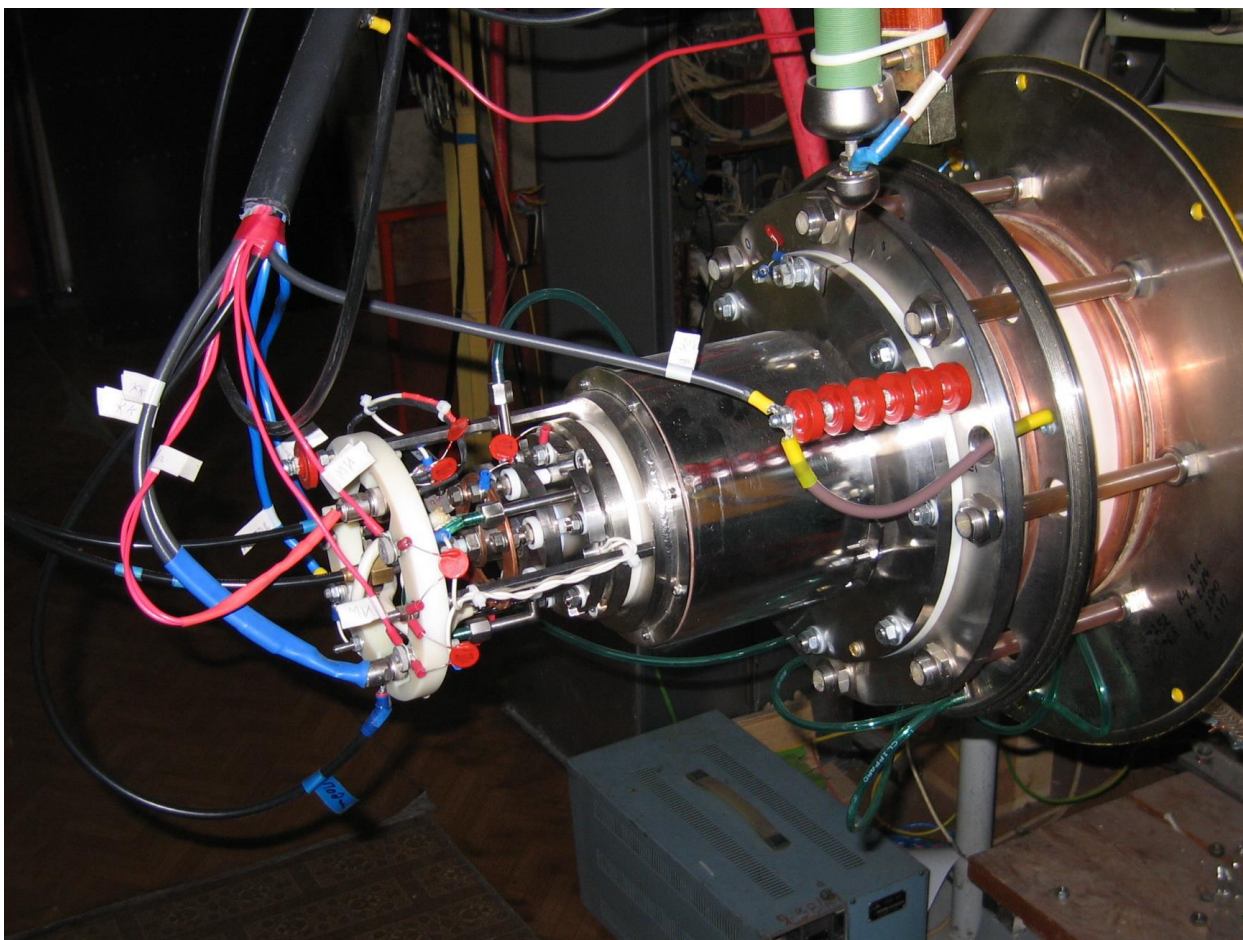


Рис. 4.6: Внешний вид источника ионов инжектора ДИНА-КИ.

5. Обработка результатов

В результате измерений, проведенных в эксперименте, получена зависимость радиуса пучка от тока пучка (рис. 5.1).

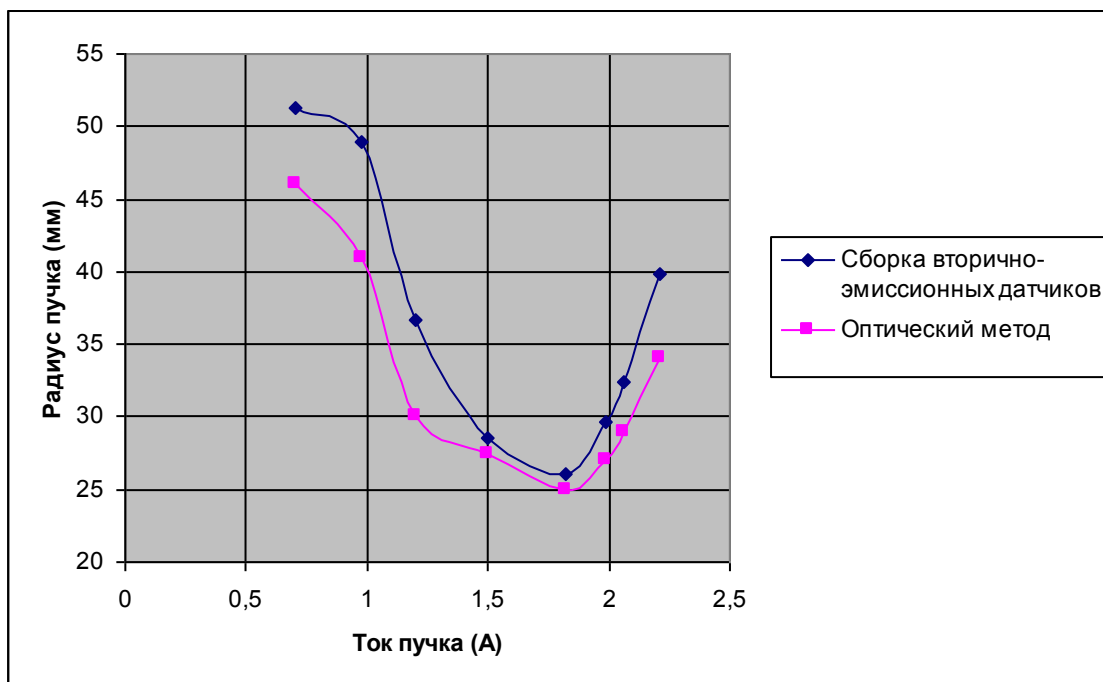


Рис. 5.1: Диаграммы зависимости радиуса пучка от тока пучка.

Проведено сравнение расчетной зависимости с экспериментальной (рис. 5.2), полученной при рабочем напряжении 27кВ. Как видно из графика, есть отличия экспериментальных данных от результатов расчетов. Этому есть несколько объяснений.

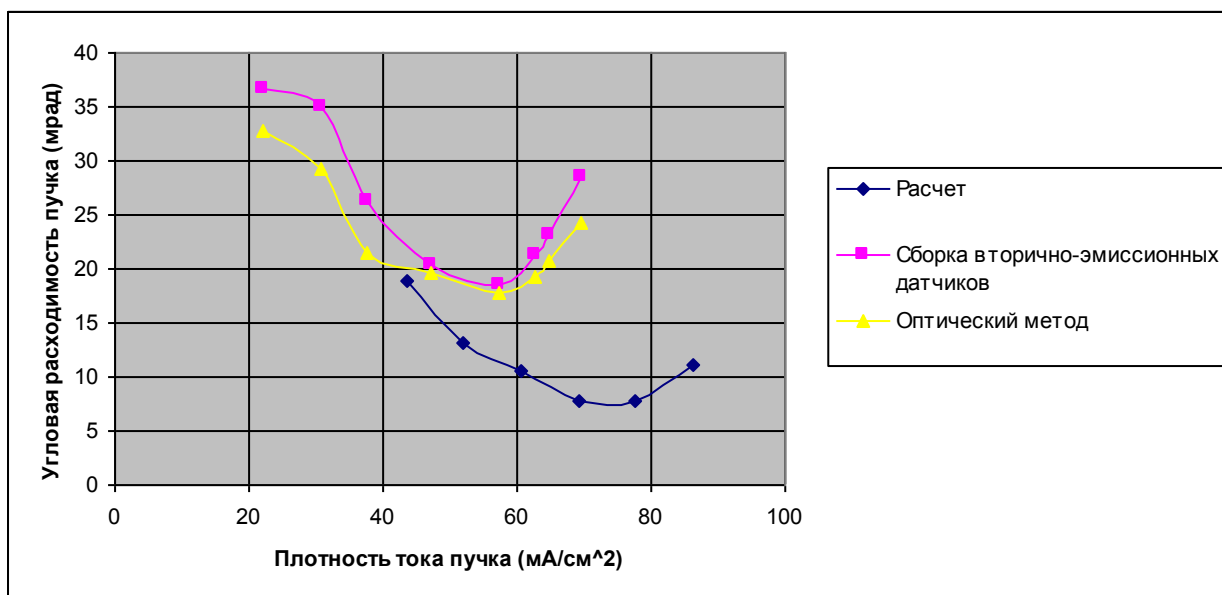


Рис. 5.2: Сравнение расчетов с экспериментальными данными.

Несоответствие плотности тока в минимуме может быть объяснена тем, что при расчетах пучок считается состоящим целиком из протонов. В действительности же это не так. Спектроскопическое исследование пучка показывает, что протонная составляющая – лишь около 87%. В пучке так же присутствует H^{2+} (4%), H^{3+} (4%) и ионы воды (5%). Таким образом корень эффективной массы получается 1.2 массы протона. В закон «трех вторых» масса входит в степени $-1/2$. Если учесть этот факт, то расчетная плотность тока в минимуме должна составлять 0.83 от полученной, то есть около 60 mA/cm^2 . Еще около 5% отклонения можно объяснить неоднородностью плотности плазмы вблизи эмиссионной поверхности. Плотность плазмы вблизи эмиссионной поверхности падает от центра ИОС к краю на 10%, поэтому апертуры, расположенные вблизи края ИОС работают не в оптимуме. Таким образом полученный результат, 57 mA/cm^2 , в пределах точности измерений хорошо совпадает с экспериментальным минимумом – 57.3 mA/cm^2 .

Большая, по сравнению с расчетной, угловая расходимость пучка объясняется искажением сферической формы электродов, связанным с неточностью их изготовления, отсутствием квазипирсовских электродов, неоднородностью плотности плазмы вблизи эмиссионной поверхности, а так же тем, что измерения проводились при напряжении, почти в два раза меньше рабочего.

Поскольку параметры инжекторов ДИНА для установки MST и ДИНА-КИ близки, для сравнения ожидаются результаты измерений с ДИНА-КИ.

Поставленный на установку MST инжектор продемонстрировал первые результаты. Оптически измерен радиус пучка (рис. 5.3, рис 5.4), он составляет 26мм в фокусе. С помощью инжектора была испытана MSE-диагностика на установке (рис 5.5). На диаграмме видно ярко выраженное расщепление линий, позволяющее с хорошей точностью измерять магнитное поле. Такой результат достигнут благодаря хорошей фокусировке пучка.



Рис. 5.3: Фотография пучка.

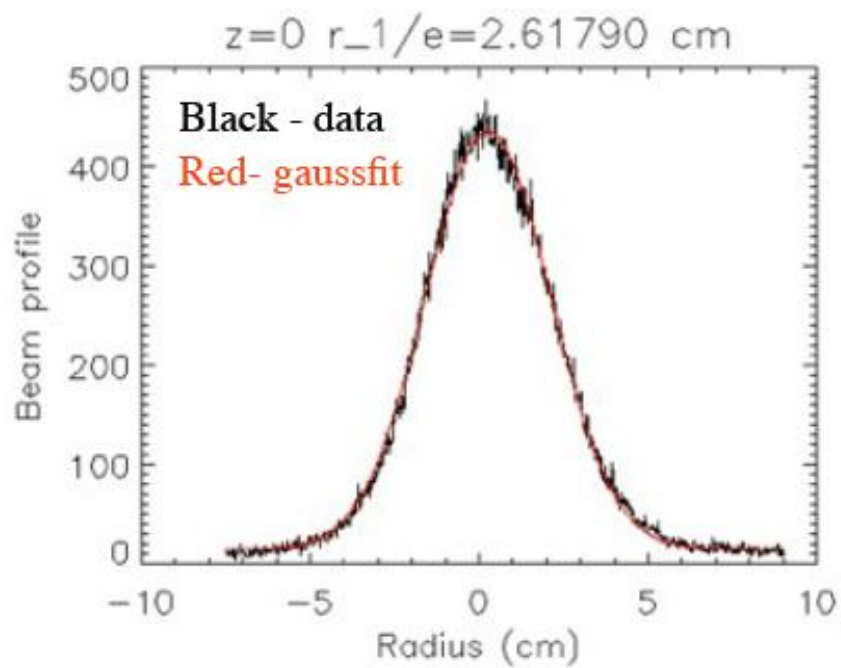


Рис. 5.4: Распределение плотности тока в пучке.

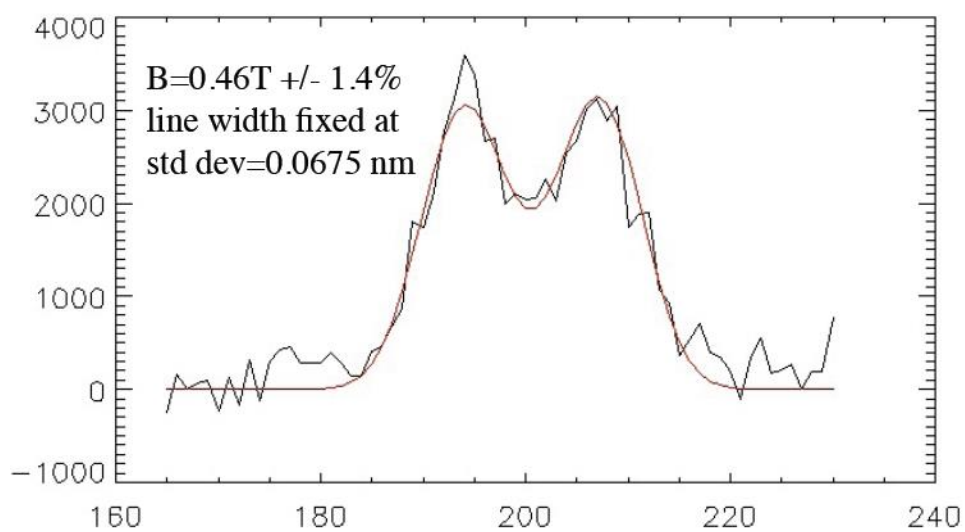


Рис. 5.5: MSE-диагностика.

Выводы

В работе изучалось формирование слаборасходящихся сфокусированных пучков нейтральных атомов для диагностических инжекторов. Рассчитана и оптимизирована геометрия многоапертурной четырехсеточной ионно-оптической системы диагностического инжектора нейтральных атомов ДИНА для установки MST. Экспериментально исследована зависимость угловой расходимости пучка от его плотности. Проведено численное моделирование и сравнение цилиндрической и щелевой геометрий ионно-оптической системы диагностического инжектора ДИНА-КИ для установки Т-10. В настоящее время ведутся испытания диагностического инжектора ДИНА-КИ.

Список литературы

1. Браун Я. «Физика и технология источников ионов», М.: Мир, 1998.
2. Корепанов С. А. «Инжекторы атомарных пучков для активной штарковской спектроскопии плазмы», Диссертация на соискание ученой степени кандидата ф-м. наук. Новосибирск, 2004, ИЯФ СО РАН.
3. А. Г. Барсуков, А. В. Волков, В. И. Давыденко, В. Ф. Королев, А. А. Медведев, В. А. Никулин, В. Я. Савкин, Г. И. Шульженко, Г. Н. Тилинин. «Диагностический инжектор ДИНА-6 для активного зондирования плазмы в установке ТОКАМАК-10», Москва, 2004, РНЦ «Курчатовский институт».
4. П. П. Дейчули, С. А. Корепанов, А. А. Иванов, В. И. Давыденко, В. В. Мишагин, Р. Улеманн, Н. В. Ступишин, Г. И. Шульженко. «Инжектор атомов водорода для активной штарковской спектроскопии плазмы», Новосибирск, 2003, ИЯФ СО РАН.
5. Н. В. Ступишин, П. П. Дейчули, А. А. Иванов, В. В. Мишагин. «Квазистационарный дуговой генератор плазмы для диагностического инжектора быстрых атомов», Новосибирск, 2004, ИЯФ СО РАН.
6. V. I. Davydenko, A. A. Ivanov, S. A. Korepanov, and I. A. Kotelnikov. «Precise formation of geometrically focused ion beams», Review of Scientific Instruments 77, 2006.