

**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**

**Ряшин Николай Сергеевич**

**Название работы**

**Исследование параметров пеннинговского источника отрицательных  
ионов водорода при различных ионно-оптических системах**

**Научный руководитель:**

**кандидат физ.-мат. наук Санин Андрей Леонидович**

---

**Новосибирск – 2007 год**

# Содержание

<b>1</b>	<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>СТАЦИОНАРНЫЙ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК</b> .....	<b>3</b>
2.1	Принцип работы пеннинговского поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов водорода .....	3
2.2	Экспериментальный стационарный ППИ .....	5
2.2.1	<i>Газоразрядная камера</i> .....	5
2.2.2	<i>Ионно-оптическая система</i> .....	6
<b>3</b>	<b>ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА</b> .....	<b>8</b>
3.1	СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ .....	8
3.2	ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМИТТАНСА .....	11
3.2.1	<i>Обработка сигналов</i> .....	11
3.2.2	<i>Расчет эмиттанса</i> .....	15
3.3	Преимущества усовершенствованной методики регистрации и обработки данных .....	16
<b>4</b>	<b>РЕЗУЛЬТАТЫ</b> .....	<b>17</b>
4.1	Интенсивность тока и профили плотности пучка .....	17
4.2	Эмиттансы пучка .....	20
<b>5</b>	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>23</b>
	<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	<b>24</b>

# 1 Введение

Отрицательные ионы (ОИ) водорода обладают низкой энергией сродства электрона (0,75 эВ), что позволяет применять их в перезарядных технологиях. При энергии более 100 кэВ/нуклон отрицательные ионы изотопов водорода преобразуются в быстрые атомы со значительно большей эффективностью, чем положительные ионы [1]. Вследствие этого высокоэнергетичные нейтралы для установок управляемого термоядерного синтеза предпочтительнее получать с помощью сильноточных источников ОИ. Большие сечения перезарядки высокоэнергетичных ионов  $H^-$  в протоны дают возможность перезарядной инжекции в циклические ускорители и накопители протонов, а также эффективного использования ОИ в тандемных ускорителях.

Современным циклотронам и тандемным ускорителям необходимы стационарные источники ОИ [2]. В ИЯФ им. Будкера разрабатывается интенсивный поверхностно-плазменный стационарный источник (ППИ) ионов  $H^-$  для ускорителя-тандема [3], требуемый ток отрицательных ионов для которого – не менее 10 мА. Настоящая работа посвящена исследованию параметров подобного источника.

В работе рассматривалось влияние геометрии ионно-оптической системы (ИОС) источника на характеристики получаемого пучка. Исследован источник с двумя типами ИОС – со щелевой геометрией и с аксиально-симметричной геометрией отверстий электродов. Проведена вариация геометрии вытягивающего электрода аксиально-симметричной ионно-оптической системы с целью получения наибольшего полного тока пучка ионов  $H^-$  с приемлемым эмиттансом в режиме стабильной работы источника. В результате усовершенствования системы регистрации параметров пучка была уменьшена погрешность измерений. С высоким пространственным разрешением сняты распределения плотности тока по сечению пучка, а также детально зарегистрирован локальный угловой разброс ионов в пучке. Применена цифровая методика обработки данных. Построены фазовые диаграммы пучка, определены обычный и среднеквадратичный эмиттансы пучка в  $XX'$ - и  $YY'$ -плоскостях.

## 2 Стационарный поверхностно-плазменный источник

### 2.1 Принцип работы пеннинговского поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов водорода

Ячейка пеннинговского разряда и схема генерации отрицательных ионов изображены на рис. 1. Газоразрядная камера (ГРК) состоит из двух массивных противоположащихся катодов, анода и анодной крышки (пластины), охватывающих газоразрядную зону со всех сторон. Анодная крышка выполняется с отверстием для вытягивания

отрицательных ионов. Источник располагается в магнитном поле, направленном от одного катода к другому, как показано на рис. 1. При подаче водорода и приложении напряжения между катодом и анодом порядка 1 кВ в межэлектродном промежутке загорается сильноточный разряд, в котором электроны замагничены и осциллируют вдоль магнитных силовых линий. Перенос электронов к аноду осуществляется за счет их диффузии поперек силовых линий магнитного поля.

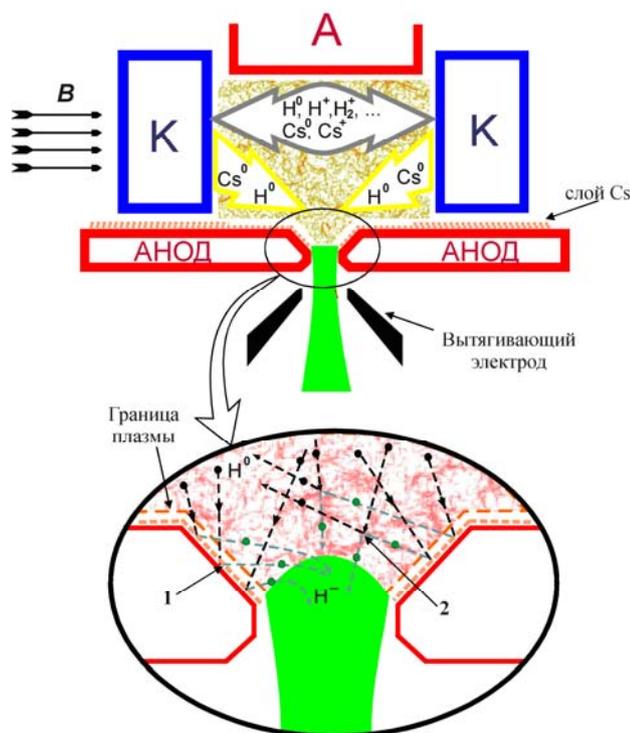


Рис. 1. Образование ионов  $H^-$  в ячейке пеннинговского ППИ.  
 1 – вытягивание ионов  $H^-$  образовавшихся на аноде;  
 2 – вытягивание ионов  $H^-$ , образованных при перезарядке в объеме.

В ППИ ионы  $H^-$  образуются на поверхности электродов, бомбардируемых интенсивным потоком частиц газоразрядной плазмы, за счет захвата электронов из металла на уровни электронного сродства распыленных и отразившихся частиц [4]. Количество извлекаемых из источника ионов  $H^-$  существенно возрастает, если в газоразрядную камеру подавать цезий. В результате его адсорбции на электродах работа выхода поверхности снижается до 1,5 эВ при оптимальном покрытии  $\theta \sim 0,7$  и до 2,2 эВ при обедненном покрытии ( $\theta \sim 0,3$ ) [5]. В ППИ с анодной генерацией, к которым относится исследуемый источник, отрицательные ионы образуются в основном на покрытой цезием поверхности анода, причем в извлекаемый пучок входят как образовавшиеся на поверхности анода отрицательные ионы (1 на врезке к рис.1), так и полученные при перезарядке отрицательных ионов на встречном потоке быстрых атомов водорода (2 на врезке к рис.1).

Добавление цезия также облегчает зажигание и поддержание разряда с пониженным напряжением на электродах при существенно уменьшенной подаче водорода. Уменьшение напряжения разряда до 50-100 В позволяет снизить тепловую

нагрузку на электроды и избежать их интенсивного оплавления. Понижение давления газа принципиально важно для уменьшения разрушения извлекаемого пучка ионов  $H^-$  на молекулах сопутствующего газа.

## 2.2 Экспериментальный стационарный ППИ

### 2.2.1 Газоразрядная камера

Схема экспериментального стационарного источника отрицательных ионов водорода приведена на рис. 2. Следует отметить, что стационарный источник работает при высокой тепловой нагрузке на электроды (порядка  $0,2 \text{ кВт/см}^2$  на катоде и до  $2 \text{ кВт/см}^2$  на кромке ускоряющего электрода), могущей приводить к тепловой деформации и оплавлению электродов. Ввиду непрерывной подачи газа и цезия в разряд источник требует высокой скорости откачки газа и тщательной оптимизации теплового режима электродов, во избежание накопления цезия на них. В описываемом источнике ячейка пеннинговского разряда образована массивными охлаждаемыми молибденовыми катодами, анодной вставкой и анодным корпусом, в крышке которого сделано

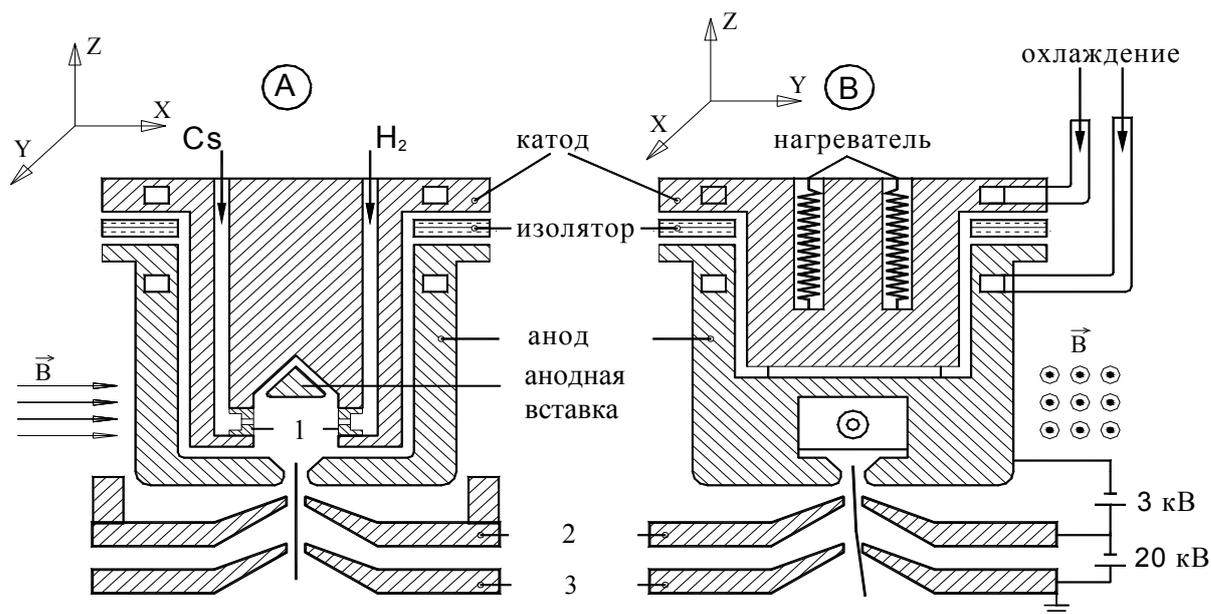


Рис. 2. Схема экспериментального источника.

*A – разрез вдоль магнитного поля, B – поперек поля.*

*1 – полые катоды; 2 – экстрактор; 3 – ускоряющий электрод.*

эмиссионное отверстие. Объем газоразрядной камеры  $1 \text{ см}^3$ . Подача цезия осуществляется за счет нагрева таблеток из смеси бихромата цезия с титаном ( $Cs_2Cr_2O_7 + Ti$ ) в печи, соединенной с каналом в катоде (на схеме не показана). Каналы инъекции цезия и водорода прогреваются омическими нагревателями. Повышенная температура Cs-канала необходима для предотвращения конденсации цезия на стенках. Магнитное поле

источника ( $B = 0,7-1,2$  кГс), создаваемое внешним электромагнитом, обеспечивает горение пеннинговского разряда в ГРК, уменьшает выход электронов в область вытягивания и сепарирует пучок  $H^-$  от сопутствующих электронов и тяжелых ионов примесей.

Для облегчения зажигания и поддержания разряда в стенки массивных катодов помещены термоизолированные вставки (см. рис. 2), именно через них осуществляется подача водорода и цезия непосредственно в разряд. Отверстия вставок имеют малый диаметр, что обеспечивает перепад плотности рабочего вещества. Благодаря проникновению плазмы пеннинговского разряда в полости вставок и интенсивной генерации электронов на их внутренних поверхностях возрастает плотность плазмы (реализуется эффект полых катодов [6]). Плазма полых катодов обеспечивает поддержание и стабильную работу разряда. Контрагирование (сжатие) плазмы в отверстиях вставок приводит к запираению цезия внутри них и уменьшает его вынос из газоразрядной камеры. Поэтому источник работает при малой, менее 1 мг/час, подаче цезия.

### **2.2.2 Ионно-оптическая система**

Трехэлектродная ионно-оптическая система источника включает в себя анодную крышку с эмиссионным отверстием (далее – эмиссионный электрод), вытягивающий электрод (экстрактор) и ускоряющий электрод. Все элементы ИОС изготовлены из особо чистого молибдена, имеющего высокую температуру плавления, высокую теплопроводность и низкую вероятность дугообразования на поверхности, что обеспечивает повышенную устойчивость системы к пробоям. Также у молибдена малый коэффициент теплового расширения, что необходимо для уменьшения изменения геометрии ИОС при повышенных тепловых нагрузках. Во время работы на эмиссионный электрод подается постоянное отрицательное напряжение 20-26 кВ, между ним и экстрактором поддерживается вытягивающая разность потенциалов 3-5 кВ, а ускоряющий электрод заземлен. В отличие от импульсных источников, в описываемом стационарном источнике электроды принудительно охлаждаются: вытягивающий электрод – дистиллятом, а ускоряющий – технической водой. По бокам экстрактора, на периферии промежутка между эмиссионным и вытягивающим электродами (далее – вытягивающего промежутка (зазора), промежуток между вытягивающим и ускоряющим электродами – ускоряющий промежуток (зазор)), установлены массивные молибденовые ребра для перехвата потока сопутствующих электронов на потенциал экстрактора. Это необходимо как для предотвращения проплавления электродов, так и для снижения вероятности возникновения паразитных разрядов между ними. В целях увеличения ресурса работы экстрактор и ускоряющий электрод сделаны массивными.

В работе рассмотрены три варианта ионно-оптических систем источника: два – с аксиально-симметричной геометрией отверстий электродов и один – со щелевой. Размеры отверстий исследованных ИОС приведены в таблице 1. Сначала на экспериментальном источнике устанавливалась аксиально-симметричная ИОС, подобная применявшимся ранее [3], с диаметрами эмиссионного окна и отверстия в вытягивающем электроде 3,5 мм (вариант 1 табл. 1). Во втором варианте аксиально-симметричной ИОС использовался экстрактор с большим диаметром отверстия (вариант 2 табл. 1). Данное изменение было внесено в целях снижения тока в цепи вытягивающего электрода и уменьшения осаждения пучка на этот электрод. Стационарный источник со щелевой ИОС исследовался впервые. Ожидалось, что применение щелевого вытягивания позволит уменьшить расходимость пучка в направлении вдоль щели (аналогично импульсным ППИ с аспектным отношением длина/ширина щели порядка 10-20 [7]). Из-за малого продольного размера катодов в исследуемом экспериментальном источнике удалось реализовать щелевую ИОС только с аспектным отношением, равным 4. В целях получения сопоставимого полного тока пучка ионов  $H^+$  площади аксиально-симметричного и щелевого эмиссионного отверстий выбирались приблизительно равными.

Эксперименты проводились при следующих параметрах источника:

- Магнитное поле 1,2 кГс
- Поток водорода 0,1 Л·Торр/сек
- Вытягивающий зазор 1,1 мм
- Ускоряющий зазор 2,5 мм
- Энергия пучка ионов  $H^+$  23-26 кэВ
- Напряжение разряда 60-75 В
- Ток разряда 5-6 А
- Подача цезия < 1 мг/ч

<i>Таблица 1. Размеры отверстий в электродах исследованных ИОС.</i>				
<i>№</i>	<i>Геометрия ИОС</i>	<i>Отверстие анода, мм</i>	<i>Отверстие экст., мм</i>	<i>Отверстие уск. эл., мм</i>
1	Акс.-симм.	Ø 3,5	Ø 3,5	Ø 4,5
2	Акс.-симм.	Ø 3,5	Ø 4,0	Ø 4,5
3	Щелевая	1,5x6,0	1,5x6,0	1,5x6,0

### 3 Измерение параметров пучка

#### 3.1 Система регистрации

Для определения параметров ионного пучка нами была усовершенствована система регистрации, ранее описанная в работе [8]. Схема используемой системы регистрации параметров пучка (СРП) приведена на рис. 3. Сформированный пучок, пройдя через окно экрана, попадает на коллектор 1, регистрирующий полный ток ионов  $H^+$ . Экран закрывает коллектор сверху и по бокам и имеет размеры входного окна 20x20 мм. Коллектор 1 расположен на расстоянии 125 мм от ИОС источника, его пластина и ребра изготовлены из тантала. Ребра высотой 10 мм расположены перпендикулярно силовым линиям периферийного магнитного поля источника. Вторичные электроны, выбиваемые с коллектора, перехватываются на ребрах благодаря удержанию в магнитном поле (см. рис. 3).

Коллектор 1 совмещен с коллиматором, представляющим из себя толстую вольфрамовую пластинку, в центре которой сделано калиброванное отверстие проходным диаметром 0,4 мм, вырезающее из пучка  $H^+$  элементарную струйку. Чтобы уменьшить разрушение струйки при движении через коллиматор, коллимирующее отверстие выполнено в виде усеченного конуса с углом при вершине  $45^\circ$ , а его кромка имеет малую толщину – 0,1-0,2 мм. Вырезаемая элементарная струйка анализируется с помощью коллектора 2, установленного на расстоянии 220 мм от коллиматора. Коллектор 2 – это стандартный цилиндр Фарадея, помещенный в экранирующую коробку. В верхней крышке коробки вырезано 7 щелевых отверстий (диафрагм), расположенных параллельно друг другу и выделяющих измеряемую коллектором 2 узкую часть элементарной струйки (см. рис. 3). Размеры отверстий  $0,9^{\pm 0,1} \times 40$  мм, расстояние между их центрами 10 мм. Подавление вторичных электронов, выбиваемых с коллектора 2, обеспечивается с помощью охранного электрода («запирающей сетки»), на которую подается отрицательный потенциал (-30)-(-50) В. Потенциал сетки также препятствует попаданию на коллектор 2 вторичных электронов, выбиваемых с краев щелевой диафрагмы.



Регистрация распределений плотности пучка по сечению и определение локального углового разброса (далее – локальная угловая расходимость или угловая расходимость элементарной струйки) в точках этих распределений осуществляются передвижением СРП плоскости поперечного сечения пучка. При этом СРП смещается с помощью координатного механизма с шагом 1 мм в направлении вдоль магнитного поля источника (X) или поперек него (Y). Измерение интенсивности струйки и определение ее угловой расходимости проводятся в 30 точках в выбранном направлении. При перемещении системы регистрации поперек ионного пучка анализируемая элементарная струйка смещается в пределах  $\pm 30$  мм относительно центра крышки со щелевыми диафрагмами за счет влияния регулярной угловой расходимости пучка. Большое количество диафрагм позволяет проводить измерения без перемещения коллектора 2 относительно СРП.

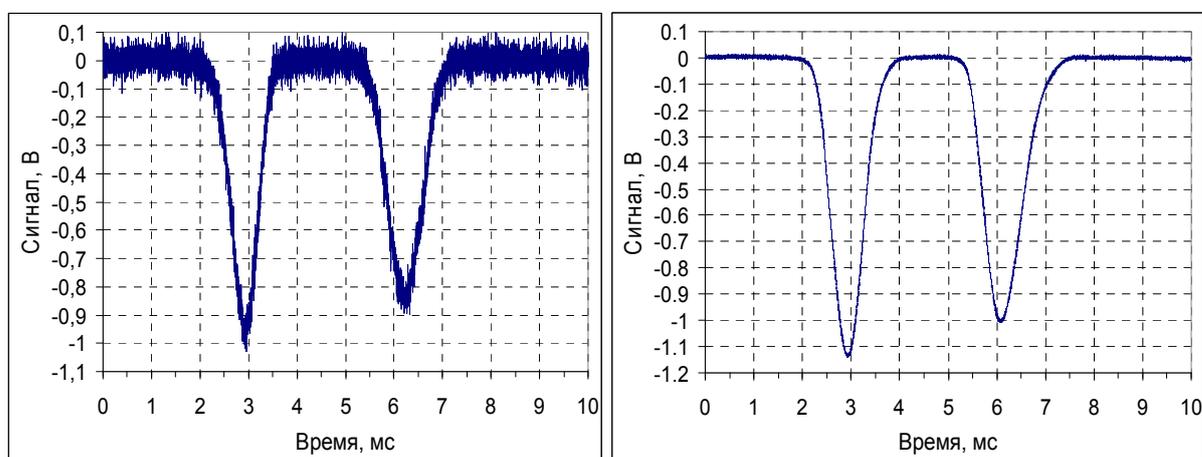


Рис. 4. Осциллограммы сигналов с коллектора 2.  
Слева – без усреднения, справа – после усреднения по 64 сканированиям.

Используемая система регистрации параметров пучка открыта со всех сторон и не содержит ограничивающих струйку элементов конструкции с большими поверхностями, на которых могут образовываться сопутствующие пучку выбитые и отраженные частицы (свет, атомы и вторичные электроны). Если не принимать соответствующих мер, эти частицы приводят к фону и шумам измерений, которые трудно контролировать и учитывать. В описываемой системе регистрации отмеченное выше экранирование коллектора 2 с подавлением потока вторичных электронов позволяет снизить уровень фона и проводить абсолютные измерения плотности тока пучка отрицательных ионов в подобных условиях. Наличие небольшого фона измерений, обусловленного вторичной эмиссией с охранного электрода под действием отраженного света, легко устраняется правильным вычетом нуля, о чем будет сказано далее. Ввиду СВЧ активности пеннинговского разряда в сигнале коллектора 2 присутствуют высокочастотные шумы,

для компенсации которых сигнал при записи усредняется по 64 (или 32) восходящим полупериодам сканирующей синусоиды. Уровень шумов регистрируемых сигналов и результат усреднения показаны на рис. 4: слева – сигнал коллектора 2, полученный в результате сканирования по 2 щелям в однопроходном режиме, то есть без усреднения, справа – аналогичный сигнал с усреднением по 64 полупериодам сканирующего напряжения.

Применяемая система регистрации не позволяет осуществлять измерения по X- и Y-координатам пучка одновременно. В частности, ориентированная как показано на рис. 3 она применяется для регистрации по направлению X. Переход к Y-измерениям осуществляется поворотом дефлектора и крышки с диафрагмами на  $90^\circ$  в плоскости XY, в то время как ориентация коллектора 1 остается неизменной. Для смены направления регистрации источник выключается, вакуумная камера вскрывается, а СРП необходимо перестраивать. В результате данные по X- и Y-координатам снимаются в различных условиях и при слегка отличающихся характеристиках пучка. Малость этих изменений контролируется по полному току пучка ионов H<sup>+</sup>, регистрируемому на коллекторе 1.

Полный профиль пучка в одном направлении (30 шагов СРП) снимается в течение 15-20 мин. Поддержание стабильности параметров источника во время регистрации также проводится по полному току пучка. В случае его существенного изменения или срыва разряда серия экспериментов проводится заново.

## **3.2 Обработка сигналов и определение эмиттанса**

### **3.2.1 Обработка сигналов**

Записанный в каждой из 30 точек координатного смещения СРП усредненный сигнал коллектора 2 подвергается следующей цифровой обработке:

- Дополнительное сглаживание сигнала с усреднением по 30 соседним точкам распределения;
- Вычитание НЧ наводок;
- Вычитание «нулевого уровня», обусловленного вторичными частицами;
- Пересчет напряжения сканирования в угловое смещение струйки.

При указанном дополнительном сглаживании сигнал, содержащий 4000-10000 отсчетов по временной координате, усредняется по 30 соседним точкам распределения.

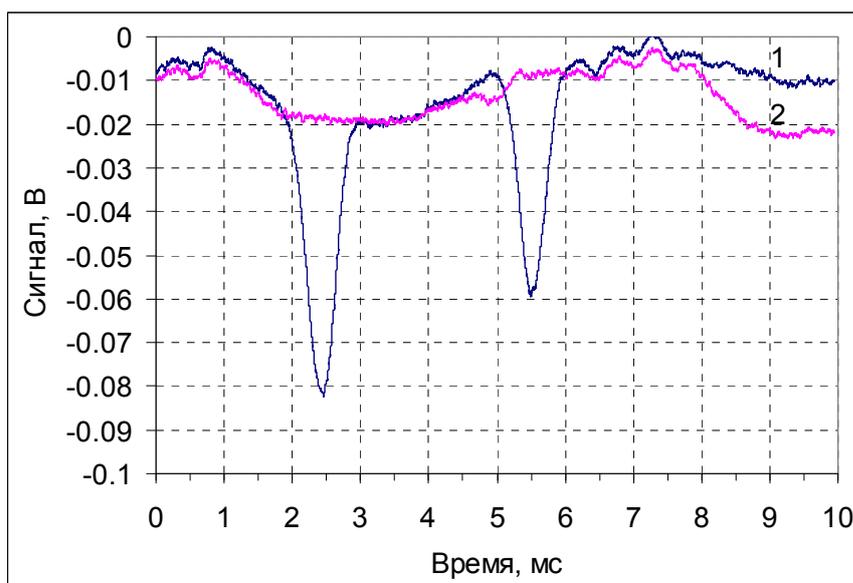


Рис. 5. Сигналы коллектора 2 на периферийной части пучка (1) и при отсутствии пучка на коллиматоре (2).

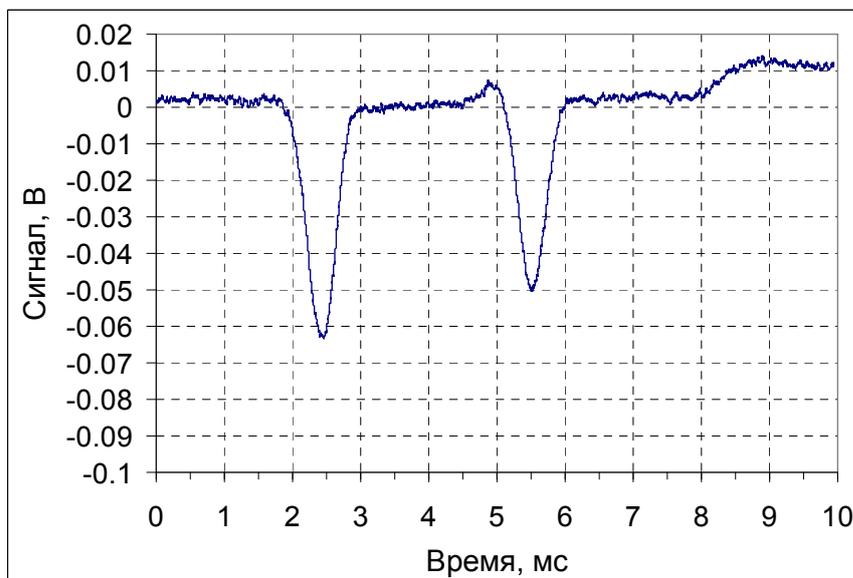


Рис. 6. Сигнал плотности тока струйки на периферийной части пучка после вычета НЧ наводки.

При сканировании струйки, вырезанной в периферийных областях пучка с низкой плотностью тока ионов  $H^-$ , записываемые сигналы искажаются из-за низкочастотных наводок, вызванных системами питания источника и сканирующим напряжением СРП. Пример периферийного сигнала плотности тока струйки и сигнала НЧ наводки показан на рис. 5 (сигнал НЧ наводки записывается отдельно при таком смещении СРП, что пучок не попадает в отверстие коллиматора). На рис. 6 показан результат вычитания НЧ наводки. В рабочей области сканирования 0-8 мс смещение нулевого уровня распределения составляет не более 5% от амплитуды периферийного сигнала (или 0,3% от максимальной плотности тока элементарной струйки в центре пучка, величина которой порядка 1 В

(рис. 4)). Причины повышения уровня НЧ наводки в интервале от 8 до 10 мс (см. рис. 6), лежащего вне рабочей части области сканирования и не влияющего на результаты расчетов, пока не выяснены.

Полученный после вычитания НЧ наводки «нулевой уровень» сигнала фиксировался для трех характерных точек (когда элементарная струйка смещена за пределы щелей, т.е. на левом краю, в центре между пиками и на правом краю рабочей области распределения). Усредненный таким образом нулевой уровень дополнительно вычитался из сигнала распределения.

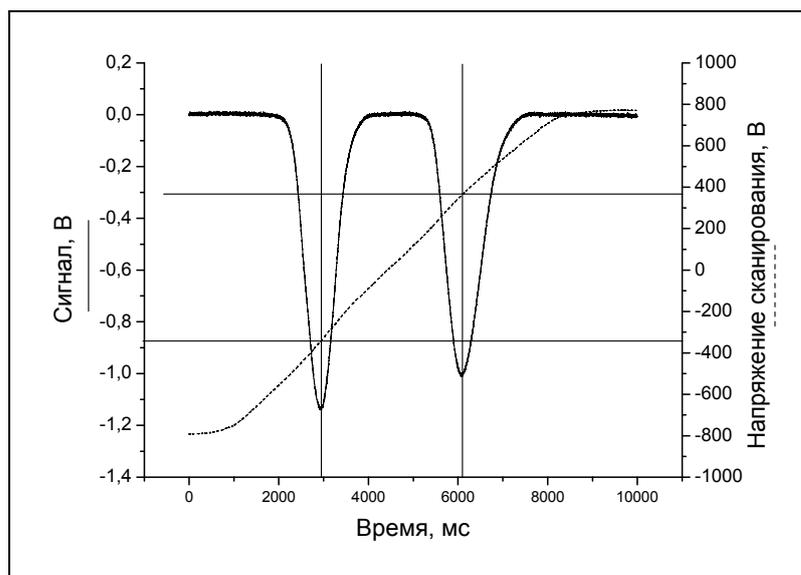


Рис. 7 (а). Осциллограммы плотности тока элементарной струйки (сплошная линия) и напряжения сканирования (пунктир).

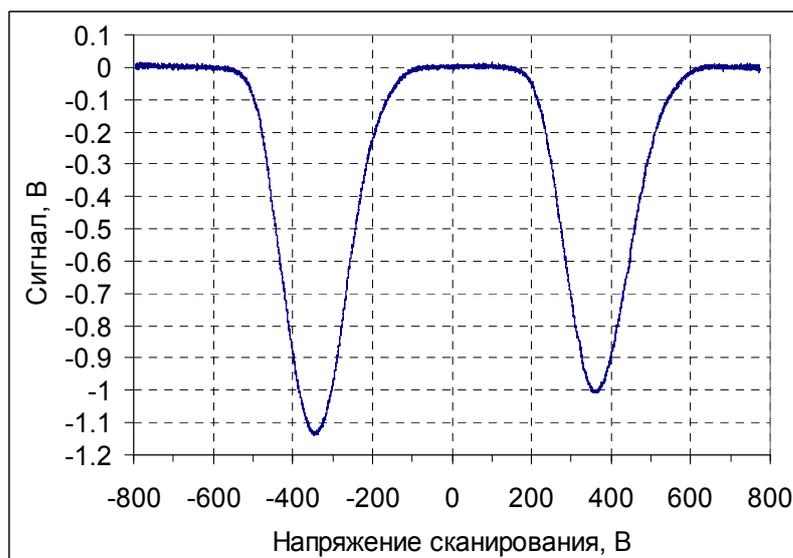


Рис. 7 (б). Осциллограмма плотности тока элементарной струйки в развертке по напряжению сканирования

Рисунок 7 (а) иллюстрирует процедуру пересчета напряжения сканирования в угловое смещение струйки. На нем сплошной линией приведена осциллограмма плотности тока (отсчитываемой в вольтах при величине нагрузочного сопротивления 200 кОм) элементарной струйки, сканируемой относительно двух щелей, а пунктирной линией – сканирующее напряжение, пропорциональный которому сигнал регистрируется на втором канале осциллографа. Осциллограммы на рис. 7 представлены в развертке по времени, в том виде, как они записываются осциллографом.

Два пика на осциллограмме плотности тока (рис. 7 (а), сплошная линия) соответствуют моментам прохождения максимума элементарной струйки через центры двух соседних щелей. Расстояние между пиками пропорционально расстоянию между центрами щелей  $d = 10$  мм, которому соответствует «базовое» угловое смещение струйки между щелями

$$\Delta\varphi \approx \operatorname{tg}(\Delta\varphi) = \frac{d}{L} \approx 45 \text{ мрад},$$

где  $L = 220$  мм – расстояние от коллектора 1 до крышки с диафрагмами.

«Базовое» угловое смещение струйки, достигаемое при разности напряжений сканировки  $\Delta U = 750$  В (рис. 7) при малых смещениях однозначно определяет связь углового смещения и напряжения сканирования:

$$\varphi = \frac{\Delta\varphi}{\Delta U} U.$$

С учетом этой связи для каждой точки распределения вычисляется локальная угловая расходимость  $X'$  (или  $Y'$ , в зависимости от выбора направления измерений). Максимуму распределения приписывается «центральное» угловое смещение центра коллиматора относительно эмиссионного отверстия, равное

$$X'_{0i} = \frac{X_i}{Z},$$

где  $Z = 125$  мм – расстояние от источника до коллиматора.

Результатом эксперимента является набор из 30 распределений плотности тока элементарной струйки, снятых в каждой точке координатного смещения СРП, с двумя или тремя пиками. Для построения профиля плотности тока пучка и диаграмм берется только один из пиков, полностью прописанных на осциллограмме (рис. 7 (а), сплошная линия). Видно, что для распределения, представленного на рисунке, левый пик интенсивнее правого, но меньше по ширине. Первое (различие по интенсивности) объясняется неравенством щелей по ширине и учитывается соответствующим домножением на коэффициент, равный отношению ширины щелей. Второе вызвано нелинейностью углового смещения струйки во времени, так как оно пропорционально напряжению

сканирования. На рис. 7 (б) показано то же распределение плотности тока струйки, что и на рис. 7 (а), но в развертке по сканирующему напряжению. На нем различия пиков по ширине, соответственно, нет.

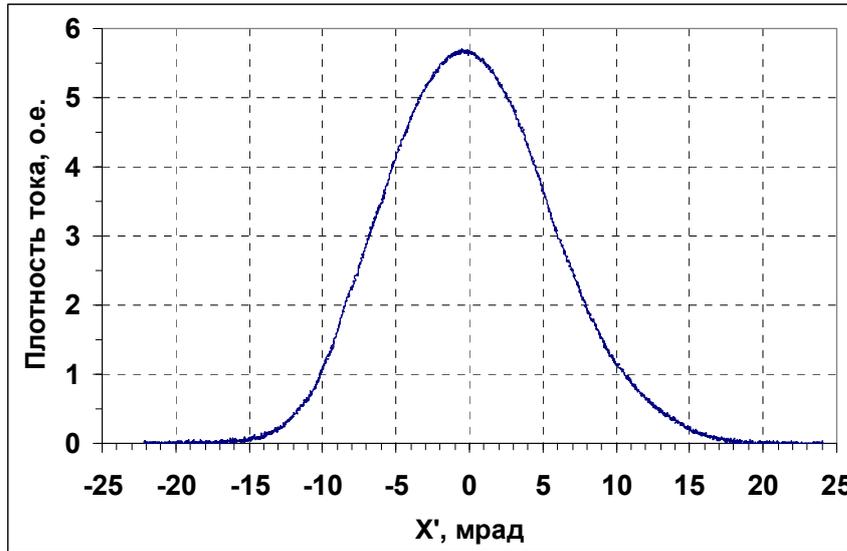


Рис. 8. Угловое распределение элементарной струйки.

На рис. 8 представлено типичное распределение плотности тока струйки в зависимости от рассчитанного угла расходимости  $X'$  относительно центра струйки. Показан типичный выбранный для расчетов и построения диаграмм пик.

### 3.2.2 Расчет эмиттанса

Эмиттанс является важной характеристикой сформированного пучка, определяющей его размеры и локальный угловой разброс. Согласно определению, обычным эмиттансом пучка является деленная на  $\pi$  площадь, занятая представляющими точками на фазовой плоскости [9,10]:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{\pi} \iint dx dx',$$

где  $X$  – поперечная координата по профилю пучка,  $X'$  – угол, под которым направлена частица. Эмиттанс в данном виде не остается постоянным при изменении энергии частиц, поэтому на практике обычно пользуются нормализованным эмиттансом:

$$\varepsilon_n = \beta \gamma \varepsilon_x,$$

где  $\beta = \frac{V}{c}$  – нормированная скорость частицы,  $c$  – скорость света, а  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$  – релятивистский фактор.

Также используют понятие «нормализованный среднеквадратичный эмиттанс», который определяется выражением [11]:

$$\varepsilon_{nRMS} = \beta\gamma \left[ \overline{(x^2 x'^2)} - (\overline{xx'})^2 \right]^{1/2},$$

где средние значения  $\overline{(x^2 x'^2)}$ ,  $\overline{(xx')^2}$  вычисляются с учетом плотности тока ионов  $j(x, x')$  в различных точках фазовой диаграммы пучка:

$$\overline{(x^2 x'^2)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} j(x, x') \cdot x^2 x'^2 dx dx'}{\int_{-\infty}^{\infty} j(x, x') dx dx'}, \quad \overline{(xx')} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} j(x, x') \cdot xx' dx dx'}{\int_{-\infty}^{\infty} j(x, x') dx dx'}$$

В настоящей работе рассчитаны величины всех указанных эмиттансов. Для расчета сигналы с коллектора 2 (рис. 4), зарегистрированные в 30 координатных точках путем перемещения СРП с шагом 1 мм, подвергаются вышеописанной обработке. Полученные зависимости плотности тока элементарных струек от угла (рис. 8) пересчитываются в единый двумерный массив данных размером 100x100 точек. Массив эквивалентен фазовой плоскости  $XX'$ . Элементу массива  $A_{ij}$  с индексами  $i$  и  $j$  присваивается значение плотности тока элементарной струйки, проходящей через поперечную координату  $X_i$  и направленную под углом  $X'_j$ . Для рассчитанного двумерного массива данных с помощью стандартных подпрограмм, входящих в пакет программы PV-WAVE, строится фазовая диаграмма пучка. Полный ток пучка равен интегралу от плотности тока по всему диапазону углов и координат, занимаемых представляющими точками на фазовой плоскости. Вычисляется сумма всех элементов массива  $A_{ij}$ , которая пропорциональна этому интегралу. Для каждого из контуров равного уровня плотности тока рассчитывается сумма элементов массива, попадающих в область, очерченную этим контуром. Эта сумма соответствует току в данной области. Полученная ранее величина суммы всех элементов массива используется для нормировки доли тока пучка, охватываемой контуром. Площадь охваченной контуром области равна числу элементов массива, попадающих в нее, умноженному на фазовый объем массива данных. Обычный эмиттанс, в соответствии с приведенной выше формулой, равен этой площади, деленной на  $\pi$ . Среднеквадратичный эмиттанс рассчитывается с весом всех ячеек по плотности тока.

### **3.3 Преимущества усовершенствованной методики регистрации и обработки данных**

В ранее применявшейся системе регистрации параметров пучка сканирование струйки осуществлялось с амплитудой напряжения пластин дефлектора 400 В. Струйка в этом случае проходила только одну диафрагму, в результате возникала трудность с абсолютной калибровкой углового смещения струйки и определением нуля сигнала. С

учетом этого в настоящей работе удвоена амплитуда напряжения дефлектора, для чего был установлен новый трансформатор и усилено экранирование проводки СРП.

Цифровая регистрация сигналов с коллектора 2 – существенное преимущество в сравнении с прежней методикой. Ранее профиль плотности тока пучка снимался по 15-20 точкам, а время измерения было больше в 2-3 раза. Следы элементарной струйки срисовывались с экрана осциллографа, построение контурной диаграммы эмиттанса проводилось вручную. В усовершенствованной методике регистрации профиль плотности тока пучка снимается с более высоким разрешением, а непосредственно зарегистрированный след элементарной струйки сохраняется в цифровом виде и пригоден для обработки с помощью программных средств. Разработанная в нашей лаборатории программа обработки сигналов дает большие возможности в работе с данными и постоянно совершенствуется с учетом опыта, приобретаемого в текущих исследованиях.

## 4 Результаты

### 4.1 Интенсивность тока и профили плотности пучка

Для источника при каждой из перечисленных ИОС достигался наибольший возможный ток ионов  $H^+$  при условии стабильной работы источника в режимах с низкими значениями токов вытягивающего и ускоряющего промежутков ( $< 70$  мА). При аксиально-симметричных ионно-оптических системах на источнике измерения проводились только в направлении X, так как в ходе экспериментальной работы в нашей лаборатории с такими ИОС было определено, что  $YY'$ -эмиттанс пучка незначительно отличается от  $XX'$ -эмиттанса для этого типа ИОС. Параметры, полученные при работе экспериментального источника с исследованными конфигурациями его ионно-оптических систем представлены в таблице 2.

<i>Таблица 2. Ток пучка ионов <math>H^+</math> и токи зазоров при стабильной работе источника.</i>				
<i>Параметр</i>	<i>Акс.-симм. ИОС 3,5-3,5-4,5</i>	<i>Акс.-симм. ИОС 3,5-4-4,5</i>	<i>Щелевая ИОС, эксперимент 1</i>	<i>Щелевая ИОС, эксперимент 2</i>
Ток пучка $H^+$ , мА	11,7	15	9,4	8,3
Ток в выт. зазоре, мА	42	54	46	17
Ток в ускор. зазоре, мА	37	43	66	45

На источнике с конфигурацией ИОС 3,5-3,5-4,5 со стандартным отверстием вытягивающего электрода ток пучка ионов  $H^-$  был более 11 мА с токами 42 и 37 мА в вытягивающем и ускоряющем промежутках соответственно. При переходе к ИОС с увеличенным отверстием экстрактора перехват тока пучка на вытягивающий электрод понизился, что позволило избежать перегрева ИОС и стабильно работать при токе ионов  $H^-$  15 мА и допустимых токах вытягивающего и ускоряющего промежутков.

При работе со щелевой ИОС ток пучка был на 40% ниже достигнутого максимума в случае аксиально-симметричных ИОС, при этом нагрузка вытягивающего и ускоряющего промежутков имела сравнимую величину (табл. 2). Поскольку эмиттансы пучков, получаемых из аксиально-симметричных и щелевых систем, различаются незначительно (табл. 3), можно сделать вывод о малой перспективности использования щелевых ИОС с низким аспектным отношением.

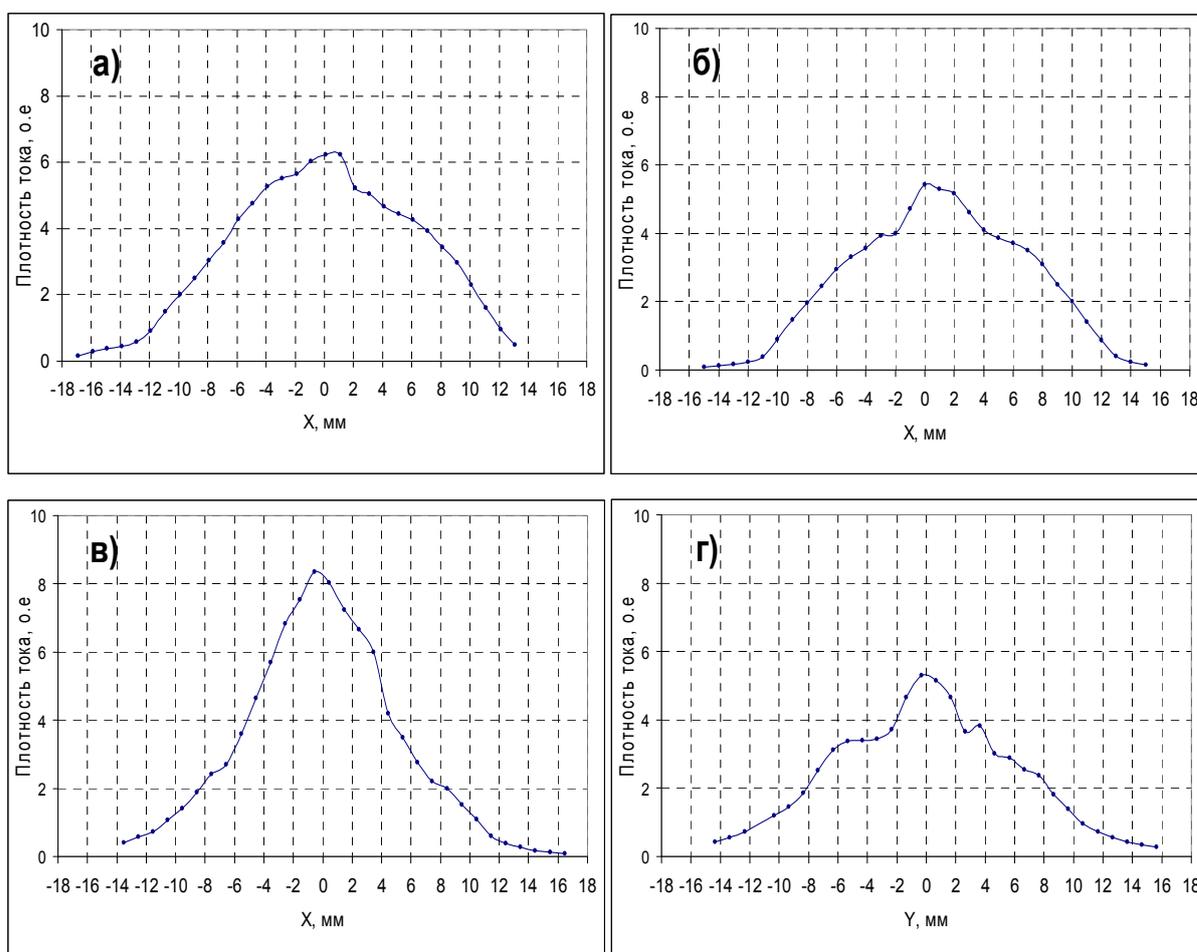


Рис. 9. Распределение плотности тока пучка по сечению.

- а) По оси X для акс.-симм. ИОС с размерами 3,5-3,5-4,5, ток  $H^- = 11,7$  мА;
- б) По оси X для акс.-симм. ИОС с размерами 3,5-4,0-4,5, ток  $H^- = 15$  мА;
- в) По оси X для щелевой ИОС, ток  $H^- = 9,4$  мА;
- г) По оси Y для щелевой ИОС, ток  $H^- = 8,3$  мА.

Распределения плотности тока пучка по сечению (составленные в соответствии с максимумами распределений плотности тока элементарных струек) для исследованных ионно-оптических систем приведены на рис. 9. Погрешности определения величины плотности тока, возникающие из-за наводок на измерительные цепи и влияния паразитных токов вторичных частиц, уменьшены в результате описанной выше процедуры цифровой обработки данных и не превышают величину 1% от максимального значения.

Для источника при ионно-оптической системе со стандартным отверстием вытягивающего электрода (рис. 9, а)) максимальное значение плотности тока выше, чем при ИОС с диаметром отверстия экстрактора 4,0 мм (рис. 9, б)), в то время как полный ток пучка отрицательных ионов меньше. Это объясняется более высоким локальным угловым разбросом для пучка из источника при конфигурации ИОС с размерами 3,5-4,0-4,5, приводящей к большей величине интегрального тока.

На распределениях плотности тока пучка, представленных на рис. 9 а), б), и г) есть небольшие локальные максимумы в центрах профилей. Предположительно, они вызваны контрагированием плазмы (о котором свидетельствует профиль плотности тока пучка для щелевой ИОС в направлении измерений  $Y$ , рис. 9, г)) в отверстиях полых катодов и повышением плотности плазмы между их центрами. На профиле пучка для щелевой ИОС, снятом вдоль короткой стороны щели шириной в 1,5 мм (рис. 9 в)), подобный локальный максимум практически не проявляется. Это связано с тем, что область плотной плазмы («ядро») по поперечному размеру больше ширины щели.

## 4.2 Эмиттансы пучка

На рис. 10-13 представлены контурные диаграммы эмиттанса пучка. На каждом рисунке проведены линии равного уровня плотности тока, содержащие 60%, 80% и 90% от полного тока, рассчитанного как описано в п. 3.2.2. Числовые значения эмиттансов приведены в табл. 3. В целом диаграммы показывают, что для источника при всех ИОС регулярная расходимость пучка ионов  $H^-$  довольно большая и составляет  $\pm 0,1$  рад.

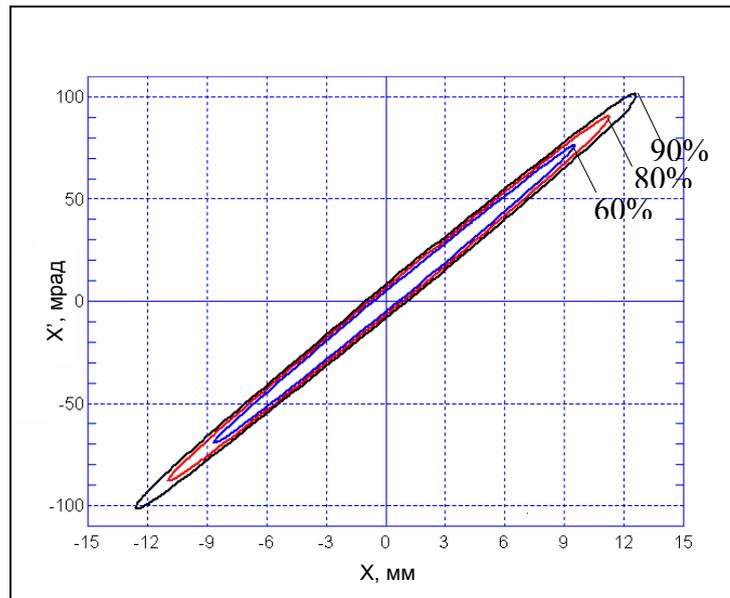


Рис. 10. Контурная диаграмма  $XX'$ -эмиттанса для источника с аксиально-симметричной ИОС 3,5-3,5-4,5.

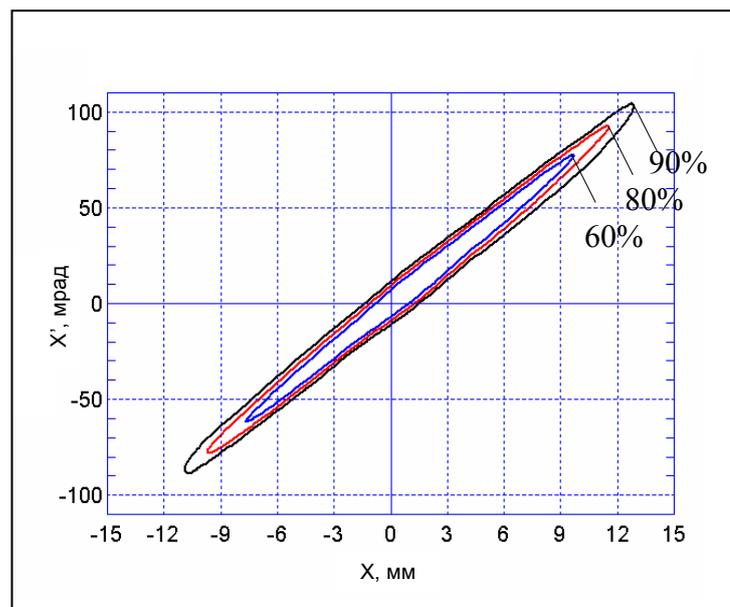


Рис. 11. Контурная диаграмма  $XX'$ -эмиттанса для источника с аксиально-симметричной ИОС 3,5-4,0-4,5.

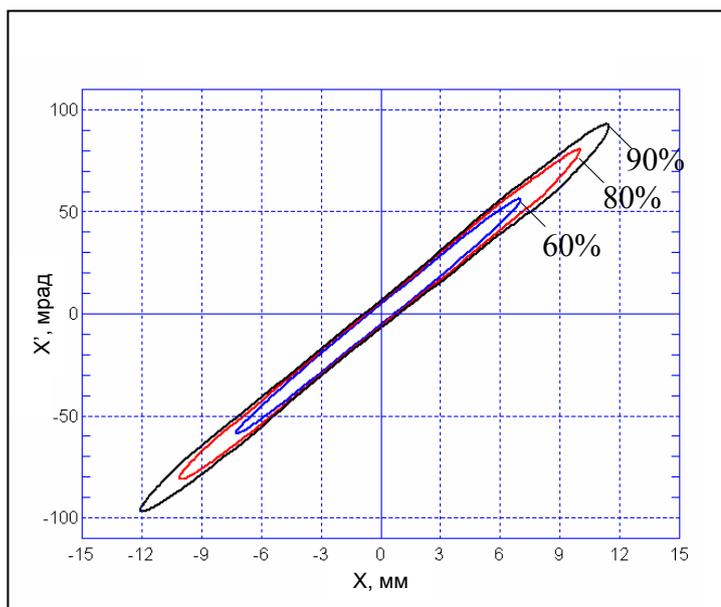


Рис. 12. Контурная диаграмма  $XX'$ -эмиттанса для источника со щелевой ИОС.

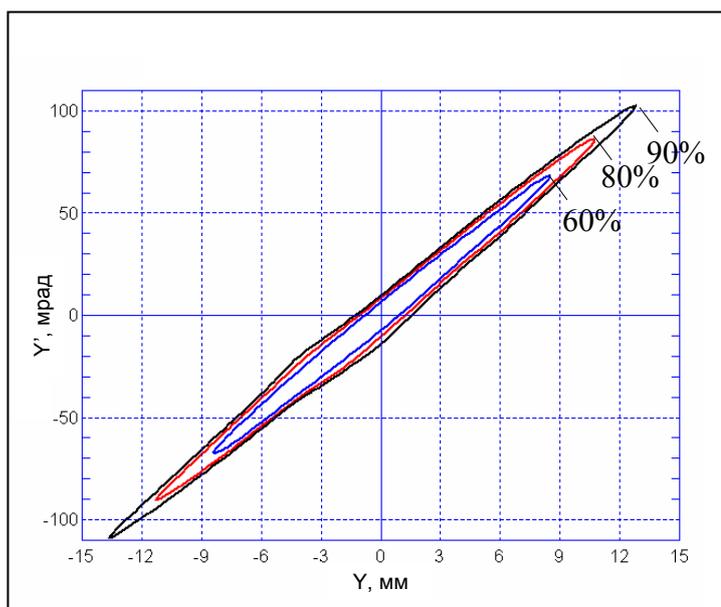


Рис. 13. Контурная диаграмма  $YY'$ -эмиттанса для источника со щелевой ИОС.

На рис. 10 и 11 представлены контурные диаграммы эмиттанса пучка для источника с исследованными аксиально-симметричными ионно-оптическими системами. Контурные линии на диаграммах по форме близки к эллипсам. Для контура, охватывающего 90% тока, в точке  $x = 0$  угловой разброс составляет  $\pm 9$  мрад и  $\pm 12$  мрад соответственно. Большая величина углового разброса при конфигурации ИОС 3,5-4,0-4,5 определяет большую величину эмиттанса пучка ионов (табл. 3). В случае щелевой ИОС на источнике, диаграммы для которой представлены на рис. 12 и 13, форма контурных линий отличается от эллиптической. Наиболее сильные отклонения наблюдаются на контурах,

соответствующих 90% от полного тока пучка. Большая ширина контура при  $x$  в интервалах от -12 до -5 и от 4 до 11 мм на  $XX'$ -диаграмме при щелевой ИОС объясняется значительным увеличением локальной угловой расходимости вблизи границы пучка. Это вызвано, вероятно, краевыми эффектами у кромок щели. Угловой разброс в центре сравним с полученным при аксиально-симметричной ИОС 3,5-3,5-4,5 и равен  $\pm 7$  мрад. На  $YY'$ -диаграмме (рис. 13) контур 90% пучка, напротив, шире в центре, и угловой разброс составляет  $\pm 12$  мрад.

<i>Таблица 3. Ток пучка ионов и эмиттансы.</i>				
<i>Параметр</i>	<i>Акс.-симм. 3,5-3,5-4,5 (XX')</i>	<i>Акс.-симм. 3,5-4-4,5 (XX')</i>	<i>Щелевая, эксперимент 1 (XX')</i>	<i>Щелевая, эксперимент 2 (YY')</i>
$\Gamma$ , мА	11,7	15	9,4	8,3
$\varepsilon_n$ (90%), $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	0,9	1,0	0,8	1,0
$\varepsilon_{nRMS}$ (100%), $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	0,18	0,32	0,15	0,20

Как видно из табл. 3, наименьшим оказался  $XX'$ -эмиттанс для пучка из источника при его щелевой ИОС. Но все же он незначительно отличается от определенного при аксиально-симметричной ИОС 3,5-3,5-4,5. Вопреки ожиданиям,  $YY'$ -эмиттанс при щелевой ИОС относительно большой и равен полученному для источника с аксиально-симметричной ИОС 3,5-4,0-4,5. Это, как уже упоминалось, свидетельствует о малой перспективности использования щелевого вытягивания с небольшим аспектным отношением. В целом, эмиттансы для источника при всех его исследованных ИОС сопоставимы. Ввиду того, что при этом для аксиально-симметричной ИОС 3,5-4,0-4,5 получен наибольший полный ток пучка ионов, данную ионно-оптическую систему можно признать наилучшей из рассмотренных.

## 5 Заключение

- Усовершенствована многощелевая коллекторная система регистрации локальной угловой расходимости пучка.
- Применена цифровая запись сигналов и цифровая обработка данных.
- С применением новой методики исследован стационарный пеннинговский поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов водорода с тремя вариантами его ионно-оптической системы.
- Определена конфигурация аксиально-симметричной ионно-оптической системы источника с увеличенным пропусканием пучка отрицательных ионов водорода и улучшенная по токам в вытягивающем и ускоряющем промежутках.
- Показано, что источник со щелевой ионно-оптической системой при малом аспектном отношении щели не имеет преимуществ по сравнению с источником с аксиально-симметричной ИОС.

*Благодарю моего научного руководителя, Санина Андрея Леонидовича, за время, уделенное работе со мной, и поддержку. Я рад, что работаю под его руководством.*

*Особую признательность хочу выразить Бельченко Юрию Ивановичу, множественным ценным советам оказавшему огромную помощь в исследовании и направившему меня на верный путь в понимании «физики» источника.*

## Список использованной литературы

- 1) *Н.Н. Семашко, А.Н. Владимиров, В.В. Кузнецов, В.М. Кулыгин, А.А. Панасенков*, «Инжекторы быстрых атомов водорода» // Энергоиздат, (1981) – 168 с.
- 2) *Г.И. Димов, Ю.И. Бельченко, Г.С. Крайнов, Р.А. Салимов, Н.К. Куксанов, Г.И. Сильвестров, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, М.А. Туунов, Д.К. Топорков, В.В. Широков*, «Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией для борнейтронозахватной терапии и обнаружения взрывчатых веществ методом резонансного поглощения  $\gamma$ -излучения» // Атомная энергия, 94, 2 (2003), 155-159.
- 3) *Yu. Belchenko, I. Gusev, A. Khilchenko, A. Kvashnin, V. Rashchenko, A. Sanin, V. Savkin, and P. Zubarev*, «Advanced direct current negative-ion source for accelerator use» // RSI 77, 1 (2006), 03A527.
- 4) *Ю.И. Бельченко, Г.И. Димов, В.Г. Дудников*, «Физические основы поверхностно-плазменного метода получения пучков отрицательных ионов» // ИЯФ 77-56 (1977).
- 5) *Под ред. Б.Я. Мойжеса, Г.Е. Пикуса*, «Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма» // Наука (1973) – 480 с.
- 6) *Б.И. Москалев*, «Разряд с полым катодом» // Энергия (1969) – 184 с.
- 7) *Г.Е. Деревянкин, В.Г. Дудников, М.Л. Трошков*, «Особенности формирования пучков ионов  $H^-$  в поверхностно-плазменных источниках для ускорителей» // ИЯФ, 82-110 (1982).
- 8) *Yu. Belchenko and V. Savkin*, «Direct current  $H^-$  source for the medicine accelerator» // RSI, 75, 5 (2003).
- 9) *Под ред. Я. Брауна*, «Физика и технология источников ионов» // Мир (1998) – 496 с.
- 10) *М.Д. Габович*, «Физика и техника плазменных источников ионов» // Атомиздат (1972) – 304 с.
- 11) *P. Lapostolle* // IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-18, 1101 (1971).