

УДК: 533.9, 621.455.4

## **Использование системы измерения эмиттанса для диагностики ионного двигателя**

**Мюллер А.<sup>1</sup>, Смирнова М.Е.<sup>2</sup>, Фейли Д.<sup>3</sup>,**

**Хартов С.А.<sup>2\*</sup>, Хольсте К.<sup>1</sup>, Шиперс С.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт атомной и молекулярной физики, Университет Юстаса-Либига,  
Ляйхгеистернер Вег, 217, Гиссен, 35392, Германия*

<sup>2</sup>*Московский авиационный институт (национальный исследовательский  
университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993,  
Россия*

<sup>3</sup>*Университет Саутгемптона, Юниверсити Роад,  
Саутгемптон, SO17 1BJ, Великобритания*

*\*e-mail: k208@mai.ru*

### **Аннотация**

Изучение траекторий ионов может предоставить множество информации о рабочем процессе в ионном двигателе (ИД). Предложенный метод предполагает, что сравнение результатов моделирования ионных траекторий с результатами эксперимента по измерению эмиттанса позволяют восстановить локальные параметры плазмы в разрядной камере. Измерения эмиттанса на разных расстояниях от среза двигателя в купе с измеренной энергией ионов определяют направление вектора тяги и его вариации, а также форму пучка, и, в перспективе, могут позволить оценить распределение объемного заряда в нем. Кроме того, использование предложенного метода для «оптимизации» элементарного отверстия ионно-

оптической системы по параметрам извлеченного тока, расходимости траекторий ионов и, соответственно, ресурса электродов позволит повысить характеристики двигателя.

**Ключевые слова:** эмиттанс, ионный двигатель, ионно-оптическая система, ионный пучок

## Введение

Концепция фазового пространства ионного пучка и связанного с ним эмиттанса широко используется в физике ускорителей для описания динамики ионного пучка [1]. Эмиттанс пучка является надежной характеристикой качества пучка, которая позволяет оценить его форму и ее взаимосвязь с геометрическими параметрами извлекающей системы и плазмы разряда [2]. Исследование этих взаимосвязей может позволить проводить оптимизацию элементарной ячейки ионно-оптической системы по результатам предложенной в статье экспериментальной методики.

Для электроракетных двигателей диагностика пучка является важным и обязательным фактором оценки их эффективности для космических миссий. В настоящий момент измерение плотности тока в основном производится с помощью зондов Фарадея (как правило, массива датчиков), которые позиционируются системами перемещения в разных поперечных сечениях пучка, что позволяет оценить его угловую расходимость. Использование систем измерения эмиттанса позволило бы оценить этот параметр, перемещая один простой зонд-коллектор тока вдоль одной координаты в одном сечении в непосредственной близости от среза двигателя.

Диагностирование же в нескольких сечениях может предоставить дополнительную информацию о параметрах пучка:

- об объемном заряде, для чего кроме эксперимента необходимо проведение численного моделирования;
- о векторе тяги ИД, для чего нужно провести дополнительное измерение энергии извлеченных ионов.

Предложенный метод предполагает, что сравнение результатов моделирования траекторий ионов с результатами эксперимента по измерению эмиттанса могут восстановить параметры плазмы в разрядной камере такие, как температура электронов и плотность плазмы, для изучения которых требуется использование электростатических зондов, вносящих существенные возмущения в исследуемую плазму. Изучение свойств плазмы является важной частью исследований процессов в ионных двигателях в общем и оценки эффективности разряда в конкретных устройствах, что может способствовать улучшению их конструкции. [3]

### **Эмиттанс ионного пучка**

Каждая частица пучка, характеризуется в каждый момент времени положением  $(x, y, z)$  и импульсом  $(p_x, p_y, p_z)$ . В соответствии с теоремой Лиувилля, объем в фазовом шестимерном пространстве координат и импульсов всех частиц является инвариантом для стационарной комбинации электрического и магнитного поля. Такой шестимерный объем, который в фазовом пространстве занимает пучок, называют эмиттансом. Предполагая, что ионы движутся под малыми углами к оси  $Z$ , т.е.  $p_z \gg p_{x,y}$ , и проходят

одинаковую разность потенциалов удобно:

- во-первых, заменить значения импульсов  $p_x$  и  $p_y$  значениями их углов относительно направления  $Z$ :

$$x' = \frac{p_x}{p_z}, y' = \frac{p_y}{p_z} \quad (1);$$

- во-вторых, считать разброс по скорости  $v_z$  минимальным, а значит инвариантом, что позволит перейти к инвариантности и четырехмерного фазового объема, называемого поперечным эмиттансом. Кроме того, считая движения по  $X$  и  $Y$  координатам независимыми, можно также дополнительно рассматривать фазовые подпространства  $\{x, x'\}$  и  $\{y, y'\}$ . [4]

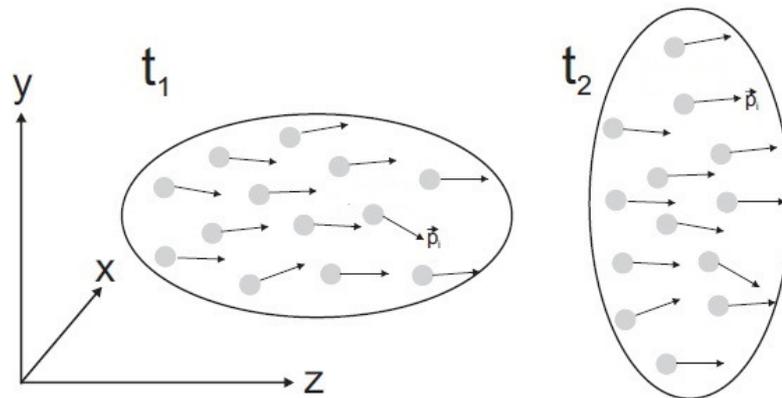


Рис. 1.  $\{y, y'\}$  эмиттанс пучка.

Геометрически двухмерный объем будет в этом случае являться площадью (пример представлен на рис. 1) в соответствующих координатах и значения

эммитанса будут определяться по формулам:

$$\epsilon_x = \frac{1}{\pi} \iint_{area} dx \times dx', \quad \epsilon_y = \frac{1}{\pi} \iint_{area} dy \times dy' \quad (2).$$

Эти значения в соответствии с теоремой Лиувилля должны также оставаться постоянными в случае консервативных сил в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ . Но для современных ионных двигателей нельзя пренебрегать возмущением, вносимым объемным зарядом, который нарушает указанную консервативность. В этом случае абсолютные значения эммитанса не будут сохраняться, но это также даст возможность оценить величину объемного заряда при измерениях в нескольких поперечных сечениях, если удастся найти аналитические зависимости для описания этого явления.

Так как частицы в поперечном сечении распределены неравномерно, то фигура, описанная вокруг множества точек, с одной стороны не учитывает характера их распределения, а с другой – чувствительна к выбросам, что затрудняет правильное определение области интегрирования по формулам 2. Поэтому принято определять только область, содержащую некоторый процент частиц пучка. Способ численной статистической обработки таких экспериментальных результатов был предложен Лапостолем [5]. Частицы внутри двумерного пространства  $\{x, x'\}$  (то же справедливо и для  $\{y, y'\}$ ) могут быть рассмотрены как статистическое распределение со средними

значениями  $\langle x \rangle$  и  $\langle x' \rangle$ . В этом случае эмиттанс как область определяется стандартными отклонениями от этих средних значений. Тогда среднеквадратичный эмиттанс  $\epsilon_{rms}$  ионного пучка выражается, как:

$$\epsilon_{rms} = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}, \quad (3)$$

где  $\langle x^2 \rangle$ ,  $\langle x'^2 \rangle$  и  $\langle xx' \rangle$  центральные моменты второго порядка. Детальный анализ этой статистической модели представлен в отчете Чанга [6]. Далее в работе все экспериментальные данные представляют собой среднеквадратичные эмиттансы, рассчитанные в рамках этого математического формализма.

### **Измерение эмиттанса пучка высокочастотного ионного источника**

#### **Принцип**

Одним из важных аспектов представленной работы является попытка показать возможность применения существующей концепции измерения и расчета эмиттанса высокоэнергетических пучков к ионным двигателям со сравнительно небольшими энергиями частиц и извлечения максимума информации о параметрах разряда и струи ИД. Экспериментальные методики имеют некоторые различия, но сводятся к тому, что небольшая часть ионного пучка «обрезается» на известном расстоянии от среза с помощью маски, которая может иметь разные конфигурации, а затем

сканируется на расстоянии, определяемом энергией ионов. Результатом измерения является кривая распределения тока расщепленного пучка ионов в направлении одной из поперечных координат. Этой информации достаточно, чтобы рассчитать угловое распределение частиц.

### Система измерения эмиттанса

Наиболее простой реализацией методики является использование щелевого распределителя и проводного сканера. Именно эта система и была взята за основу для данного исследования (Рис. 2). Ее практическая реализация представлена на рисунке 3.

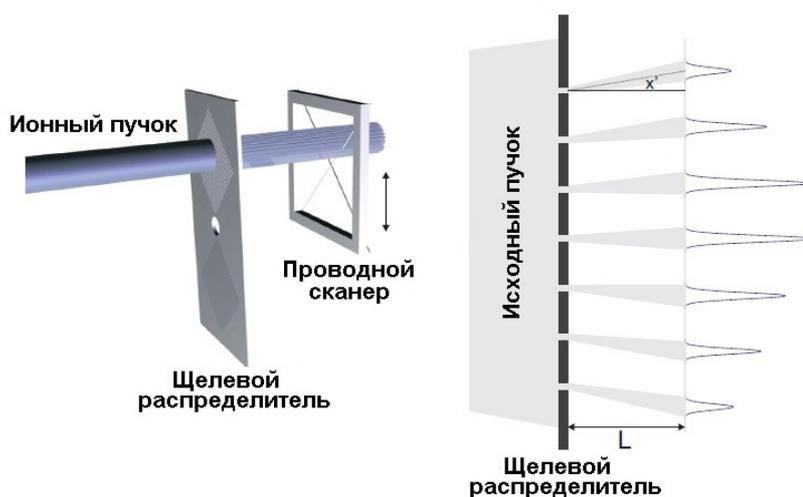


Рис. 2. Щелевой распределитель и проводной сканер для измерения эмиттанса пучка и принципиальная схема измерения.

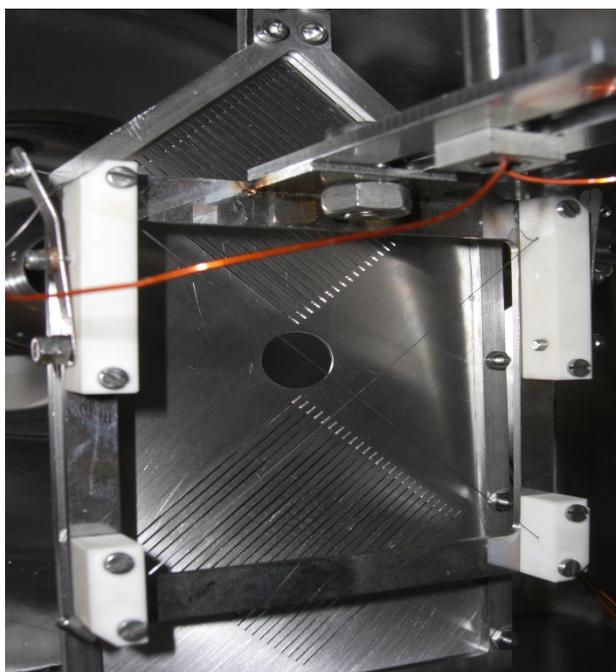


Рис. 3. Система измерения эмиттанса.

Суть диагностики эмиттанса в рамках этого метода сводится к следующему: исходный ионный пучок разлагается на 25 «струй» (единичных пучков) щелевым распределителем, покрытым тонким слоем графита и состоящим из 25 щелей шириной 0,4мм с расстоянием между ними 2мм. Затем на расстоянии 15мм измеряется ток ионов на параллельный щелям распределителя тонкий провод, перемещаемый в одном из поперечных направлений линейным двигателем с относительной точностью позиционирования 0,15%.

Позиция провода в пучке измерялась точным потенциометром, ток ионов – пикоамперметром Keithley 6485 с минимальным разрешением 10 фА. В данном эксперименте максимум тока принимался за значение центральной позиции, но для определения точной формы струи относительно оси

двигателя необходимо измерять также абсолютную позицию сканера. Таким образом, каждый единичный пучок может быть связан с конкретным распределением (Рис. 2), что облегчает расчет углового распределения для каждой щели, которая соотносится с позицией  $X$ . Результат одного из экспериментов представлен на рис. 4. Принимая во внимание распределение тока, связанное с каждой конкретной точкой, можно построить трехмерный график тока в фазовом пространстве  $\{x, x'\}$  (Рис. 5а) или его двумерную проекцию на плоскость  $\{x, x'\}$  (Рис. 5б) [5].

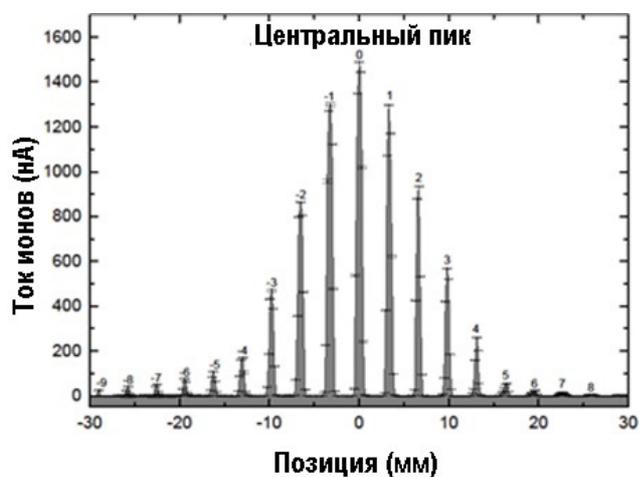


Рис. 4. Пример данных снятых системой измерения эмиттанса.

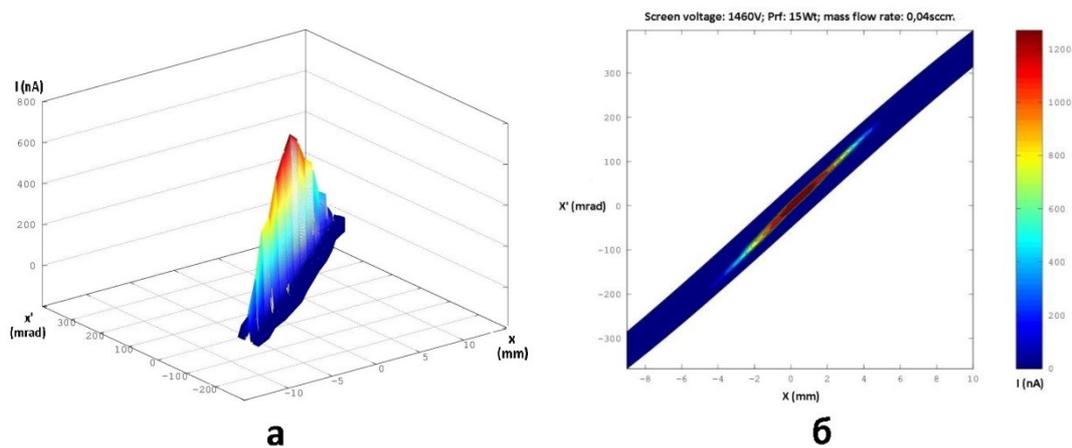


Рис. 5. Примеры а - трехмерного графика распределения тока ионов в фазовом пространстве  $\{x, x'\}$  и б – проекции распределения тока ионов на плоскость  $\{x, x'\}$ .

### Высокочастотный источник ионов (ВЧИИ)

В рамках, представленных в работе экспериментов, в качестве источника ионов использовался четырехсантиметровый высокочастотный ионный источник (ВЧИИ-4) со сферической газоразрядной камерой и специально сконструированной трехэлектродной одноапертурной ионно-оптической системой (ИОС), формирующей исследуемый ионный пучок. Разряд инициировался с помощью охлаждаемого высокочастотного генератора (ВЧГ) фирмы APCON – RFG40 NTR #003 с рабочей частотой 2,6МГц и мощностью до 70Вт, расход ксенона регулировался с помощью расходомера фирмы Bronkhorst в диапазоне от 0,02 до 1,5 ст. куб. см. Принципиальная схема источника ионов представлена на рис. 6. Общий вид экспериментального оборудования: ИИ со смонтированной системой

измерения эмиттанса в рабочем объеме вакуумной камеры - представлен на рис. 7.

Вакуумная камера представляла из себя куб со стороной 38см. Откачка производилась посредством двух диффузионных насосов со скоростью 760л/с по азоту и форвакуумного насоса со скоростью 14м<sup>3</sup>/ч. Статический вакуум достигал значений 2-3×10<sup>-7</sup>мбар, динамический – 6×10<sup>-6</sup>мбар.

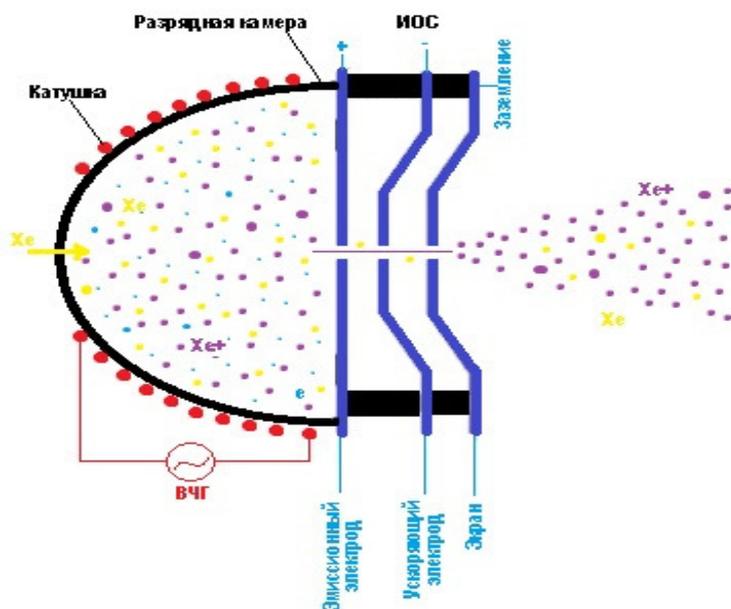


Рис. 6. Принципиальная схема источника ионов.

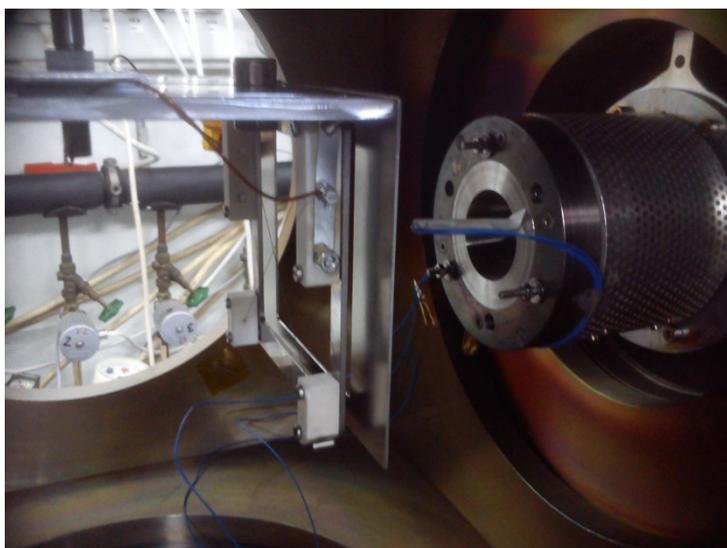


Рис. 7. ВЧИИ-4 с системой измерения эмиттанса.

Проведение исследования требовало предварительного изучения рабочих характеристик ИИ для определения параметров, при которых была возможна стабильная работа источника. Для этого к эмиссионному электроду прикладывался потенциал 750В, к ускоряющему - 150В и подбирались соотношения расхода ксенона и подаваемой высокочастотной мощности, которые позволяли извлекать токи в 200, 300 и 400 мкА. Карта характеристик ВЧИИ-4 представлена на рис. 8.

По результатам этих измерений были выбраны три рабочие точки для последующих исследований, соответствующие трем различным параметрам разрядной плазмы: 15Вт – 0,02ст.куб.см.; 20Вт – 0,04ст.куб.см.; 23Вт – 0,06ст.куб.см. В ходе работы третья комбинация была удалена из рассмотрения из-за нестабильности работы ИОС источника, межэлектродный промежуток которой пробивал разряд при превышении некоторого предела приложенного напряжения в силу чрезмерного давления нейтрального газа из-за применения единичной апертуры.

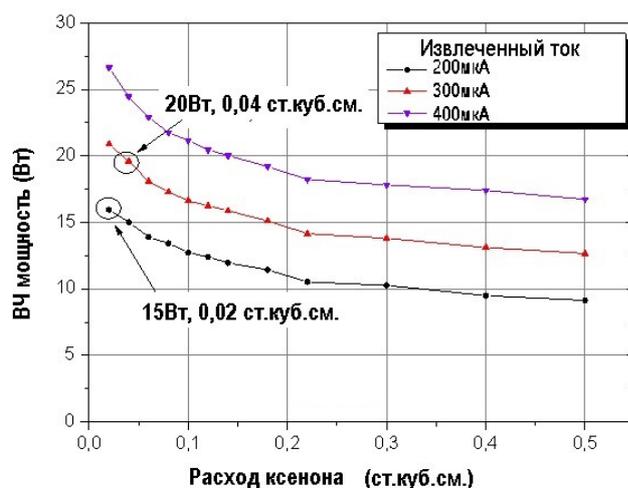


Рис. 8. Карта характеристик ВЧИИ-4.

Итак, эмиттанс пучка измерялся при двух соотношениях мощности ВЧГ и расхода ксенона. Для каждой рабочей точки измерения проводились при нескольких соотношениях эмиссионного и ускоряющего потенциалов: напряжения на эмиссионном электроде изменялись в диапазоне 250 – 1500 В с шагом 250В, на ускоряющем - 5, 10, 20, 50, 100 и 150 % относительно значений на эмиссионном. Для обработки экспериментальных данных и расчета среднеквадратичного значения эмиттанса для 90% ионного тока использовалась Система Анализа Эмиттанса [7].

### Результаты эксперимента

Экспериментальные величины среднеквадратичных эмиттансов для всех соотношений параметров представлены на графиках на рис. 9. Погрешность измерений была условно оценена в 10%.

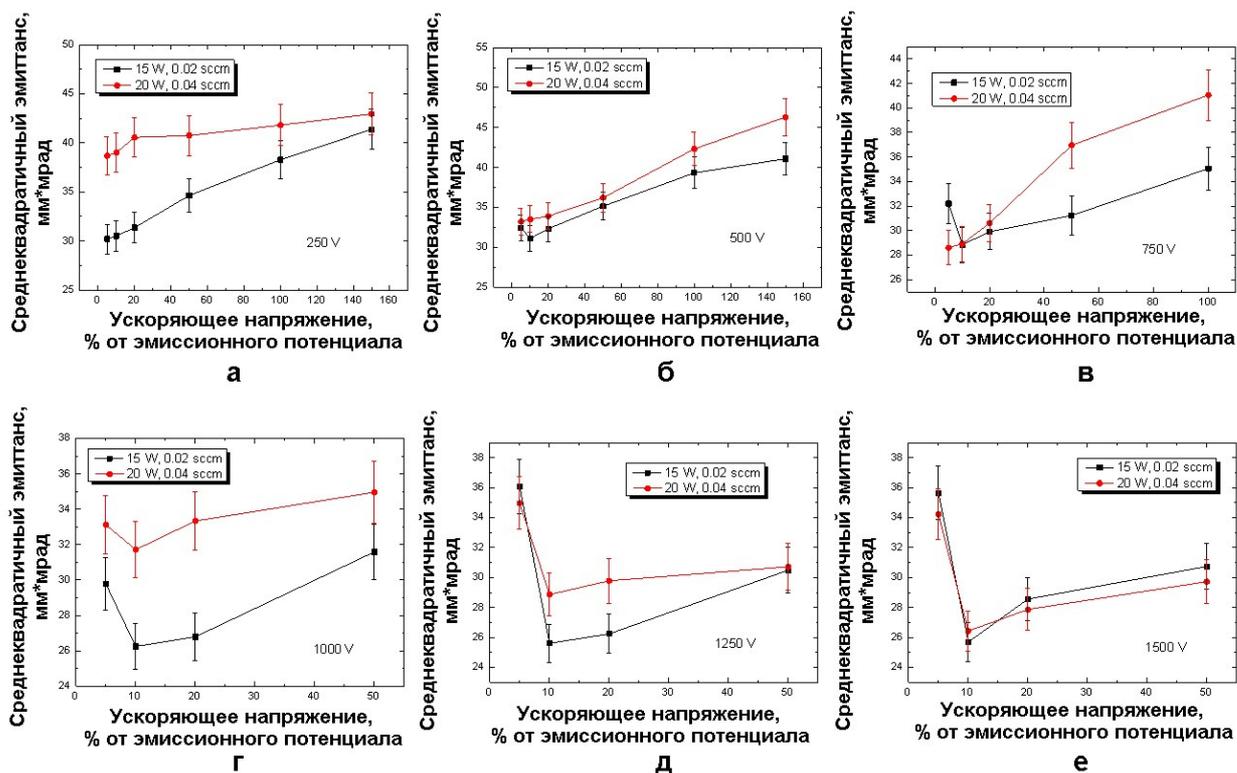


Рис. 9. Результаты измерения среднеквадратичного эмиттанса пучка для значений потенциалов эмиссионного электрода а – 250В, б – 500В, в – 750В, г – 1000В, д – 1250В, е – 1500В.

Полученные данные могут служить некоторым доказательством возможности и целесообразности применения описанного метода к исследованию источников ионов, т.к.:

1. Порядок величин среднеквадратичных эмиттансов один и тот же для всех рабочих точек.
2. Для каждого рабочего потенциала эмиссионного электрода прослеживается некоторый тренд к увеличению значений при работе с большими расходами и мощностями ВЧГ без изменения характерного вида кривой за исключением случая е (1500В на

эмиссионном электроде). Это, в свою очередь, может служить показателем эффективности данной геометрии ячейки ИОС при работе на данном напряжении в некотором диапазоне параметров плазмы в разрядной камере (ИОС была оптимизирована для работы с напряжением порядка 1500В).

3. Можно говорить о существовании минимума для всех кривых в случае, когда к ускоряющему электроду приложен потенциал в районе 10% от эмиссионного (более точное определение требует измерений в большем количестве точек), что также согласуется с общими представлениями о работе ИОС.

Как упоминалось выше, объемный заряд может влиять на использование эмиттанса как эффективной характеристики качества струи. Возможным решением этой проблемы может быть нормализация значений среднеквадратичного эмиттанса по извлеченному току, что ставит вопрос об оценке этого тока. В рамках поставленного эксперимента измерялись токи на эмиссионном ( $I_{эм}$ ), ускоряющем электродах ( $I_{уск}$ ) и щелевом распределителе ( $I_{щр}$ ). Ток на щелевой распределитель можно было бы считать хорошим идентификатором тока пучка, но, очевидно, часть тока теряется на отверстиях в распределителе. Ток на эмиссионном электроде измерялся гораздо точнее по падению напряжения на точном 100кОм сопротивлении, но, к сожалению, его нельзя считать адекватной характеристикой тока пучка. В рамках проведенного эксперимента наиболее точно оценить извлеченный ток можно получив разницу между извлеченным

из плазмы током эквивалентом току на эмиссионном электроде и током перехвата на ускоряющий электрод. На рис. 10 представлены результаты нормализации для всех трех возможных значений для одного из измерений.

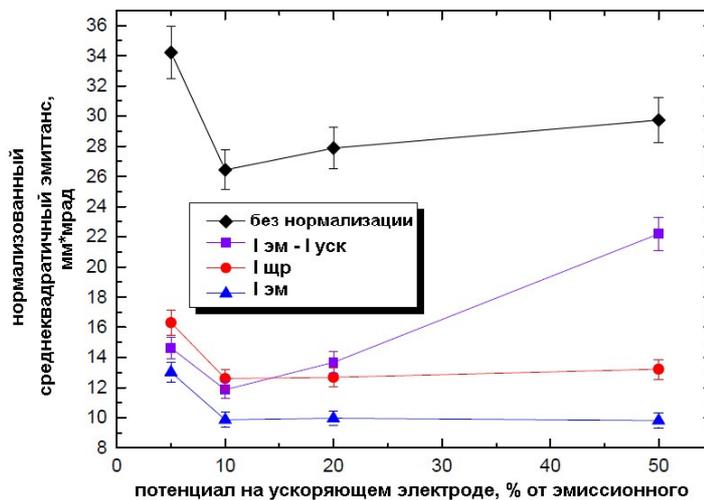


Рис. 10. Нормализованный среднеквадратичный эмиттанс для ускоряющего напряжения 1500В (20Вт, 0,04ст.куб.см.)

Как видно из графика в случае использования для нормирования извлеченного из плазмы тока (эквивалентного току на эмиссионный электрод) и общего тока приходящего на щелевой распределитель кривые качественно выглядят идентично. При этом абсолютные значения в случае Iщр несколько выше, что также объяснимо с точки зрения общих представлений о процессах ускорения посредством ИОС и позволяет сделать предположение о незначительном влиянии объемного заряда в рамках предложенной методики диагностики низкоэнергетических пучков. Тем не менее, конкретный вывод о влиянии объемного заряда требует более

тщательного исследования и подробного обсуждения результатов экспериментов.

## **Численное моделирование формирования пучка**

### **Программный пакет КОBRA3-INP**

Для моделирования извлечения ионного пучка из плазмы ячейкой ионно-оптической системы был использован программный продукт КОBRA3-INP [8]. Он использует метод Власова для решения уравнений Пуассона. Затем в процессе отслеживания траекторий строится карта объемного заряда. Это распределение частиц включается в следующий итеративный шаг до достижения самосогласованного распределения частиц в электростатическом поле. КОBRA3-INP позволяет моделировать трехмерные несимметричные задачи, поэтому его использование может помочь при исследовании эффектов влияния смещения отверстий электродов ИОС друг относительно друга на формирование пучка и смещение вектора тяги. Сравнение результатов численного моделирования с результатами экспериментальных измерений эмиттанса (который также однозначно связан с формой пучка) на данном этапе позволит оценить эффективность, как компьютерного моделирования, так и методов диагностики, внести в них улучшения, а в дальнейшем получить возможность расчета параметров разрядной плазмы ионных двигателей, используя решение обратной задачи по результатам измерения эмиттанса.

Численное моделирование процессов извлечения ионов из плазмы в ИОС является комплексной задачей, требующей большого числа исходных

данных, к которым наряду с геометрией относятся потенциал плазмы ( $\phi_{пл}$ ), электронная температура ( $T_e$ ), концентрация плазмы ( $n_e$ ), а также граничные условия. Для определения параметров плазмы был проведен ряд дополнительных измерений.

### Формирование исходных данных для моделирования

Энергия ионов пучка непосредственно связана с разницей потенциалов, которую они проходят, ускоряясь с плазменной границы, имеющей потенциал плазмы, до выходного электрода ИОС. Поэтому для оценки потенциала плазмы достаточно было измерять энергию ионов в пучке многосеточным зондом – энергоанализатором. Его внешний вид представлен на рис. 11, результат одного из измерений – на рис. 12.



Рис. 11. Энергоанализатор.

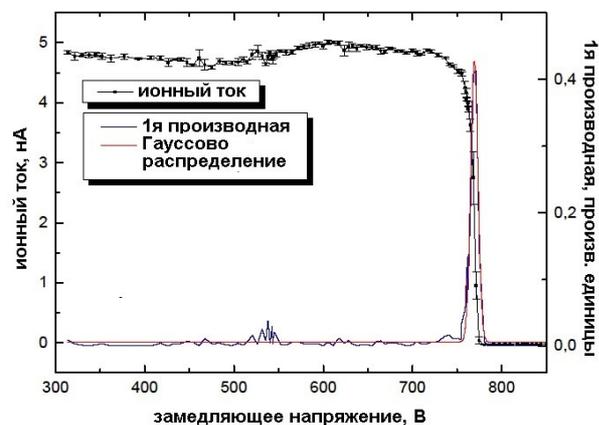


Рис. 12. Пример измерений энергоанализатором. Потенциал эмиссионного электрода 750В (15Вт, 0,02ст.куб.см.), максимум первой производной 769,4В, потенциал разрядной плазмы 19,4В.



Рис. 13. Тройной зонд Лэнгмюра.

Для определения температуры электронов и концентрации плазмы в разрядную камеру через ИОС был введен тройной зонд Лэнгмюра. Его внешний вид представлен на рис. 13. Для случая 750В на эмиссионном электроде, 15Вт поданной с ВЧГ мощности, 0,02ст.куб.см. расхода ксенона результатом измерений стали значения параметров плазмы:  $T_e = 7эВ$  и  $n_e = 1,66 \times 10^{17} м^{-3}$ .

Приведем сводную таблицу исходных данных для численного моделирования:

Таблица 1.

Параметр	Обозначение	Значение
Толщина эмиссионного электрода	$t_s$	0,15мм
1-ый межэлектродный промежуток	$l_{sa}$	0,5мм
Толщина ускоряющего электрода	$t_a$	1,5мм
2-й межэлектродный промежуток	$l_{ad}$	0,5мм
Толщина экрана	$t_d$	1мм

Температура электронов	$T_e$	7эВ
Концентрация плазмы	$n_e$	$1,66 \times 10^{17} \text{ м}^{-3}$
Потенциал плазмы	$\varphi_{\text{пл}}$	19,4В

## Результаты моделирования

На рис. 14 представлен результат моделирования для описанных выше условий.

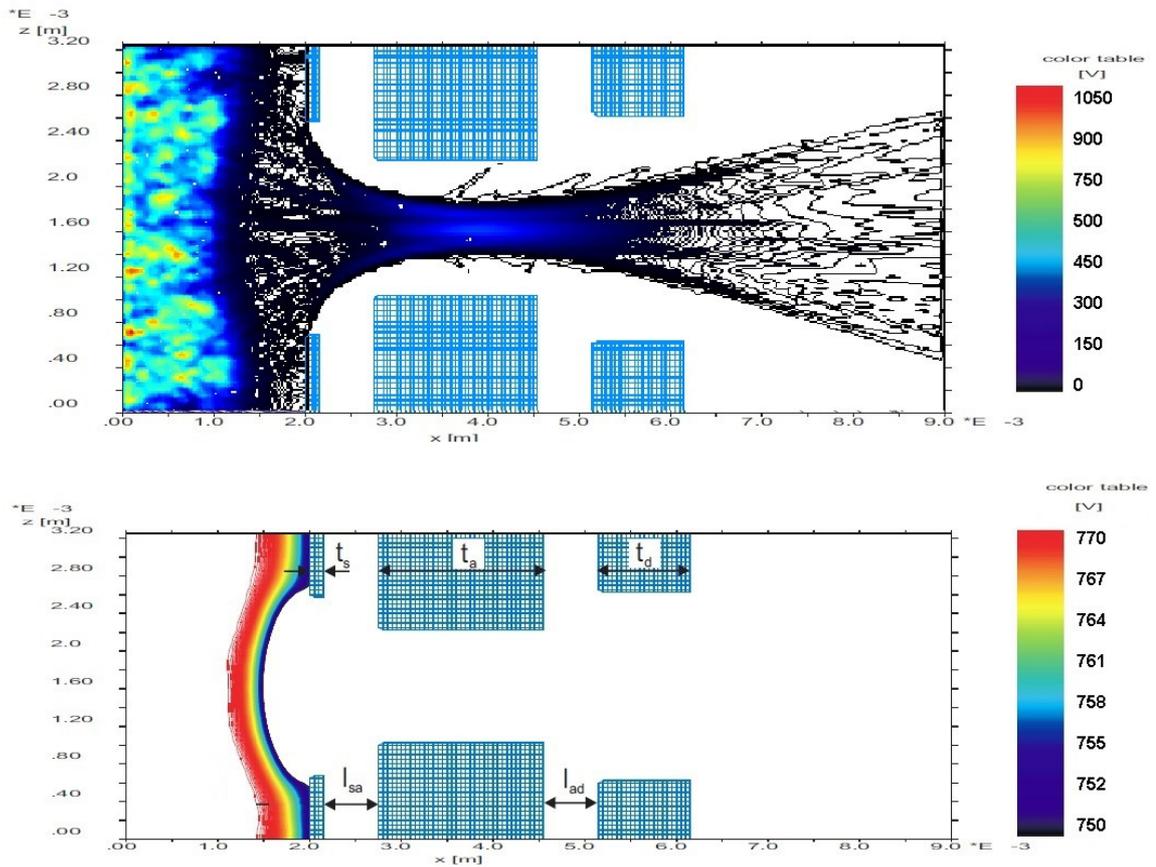


Рис. 14. Результаты моделирования извлечения пучка посредством ИОС.

Потенциал на эмиссионном электроде – 750В.

Среднеквадратичный эмиттанс пучка на выходе из ИОС по результатам расчетов достигает значения  $10,19\text{мм}\cdot\text{мрад}$ . В силу наличия объемного заряда эта величина должна возрастать как функция расстояния от среза двигателя, поэтому было проведено дополнительное моделирование на основании данных о параметрах пучка, полученных в ходе решения исходной задачи. На расстоянии 4 см, эквивалентном позиции сканера, среднеквадратичный эмиттанс возростал до  $149,6\text{мм}\cdot\text{мрад}$ , тогда как экспериментальное значение для этого случая дает значение –  $28,8\text{мм}\cdot\text{мрад}$ .

Возможным объяснением полученного несоответствия является частичная самокомпенсация объемного заряда в пучке вследствие большого числа вторичных процессов в области ИОС и за ее срезом, а, как следствие, появления большого числа электронов. Образование электронов возможно в процессе столкновений быстрый ион – нейтральный атом, а также, в большей степени, в процессе ионной бомбардировки электродов. В случае, промоделированном в КОBRA3-INP, ток перехвата на ускоряющий электрод составлял порядка 17% от извлеченного ионного тока из плазмы. Какая-то часть ионного потока безусловно также бомбардировала замедляющий электрод - экран, что, к сожалению, не фиксировалось в рамках эксперимента. Чтобы учесть вторичные процессы и частичную нейтрализацию потока ионов, было проведено моделирование с применением метода нижней релаксации объемного заряда, что эквивалентно наличию электронов в пучке. Полученное значение среднеквадратичного эмиттанса в этом случае равнялось  $35\text{мм}\cdot\text{мрад}$ , что значительно лучше

согласуется с экспериментальными данными. Тем не менее, необходимо дальнейшее изучение процессов в области ИОС, учет вторичных процессов для улучшения возможностей численного моделирования и совершенствование экспериментальной методики.

Еще одной возможностью сравнения экспериментальной методики с результатами моделирования являлось построение формы поперечного сечения струи в позиции щелевого распределителя. Моделирование демонстрировало звездообразную структуру (Рис. 15а), которая также отчетливо может быть видна на фотографии (Рис. 15б), демонстрирующей щелевой распределитель после проведенных экспериментов.

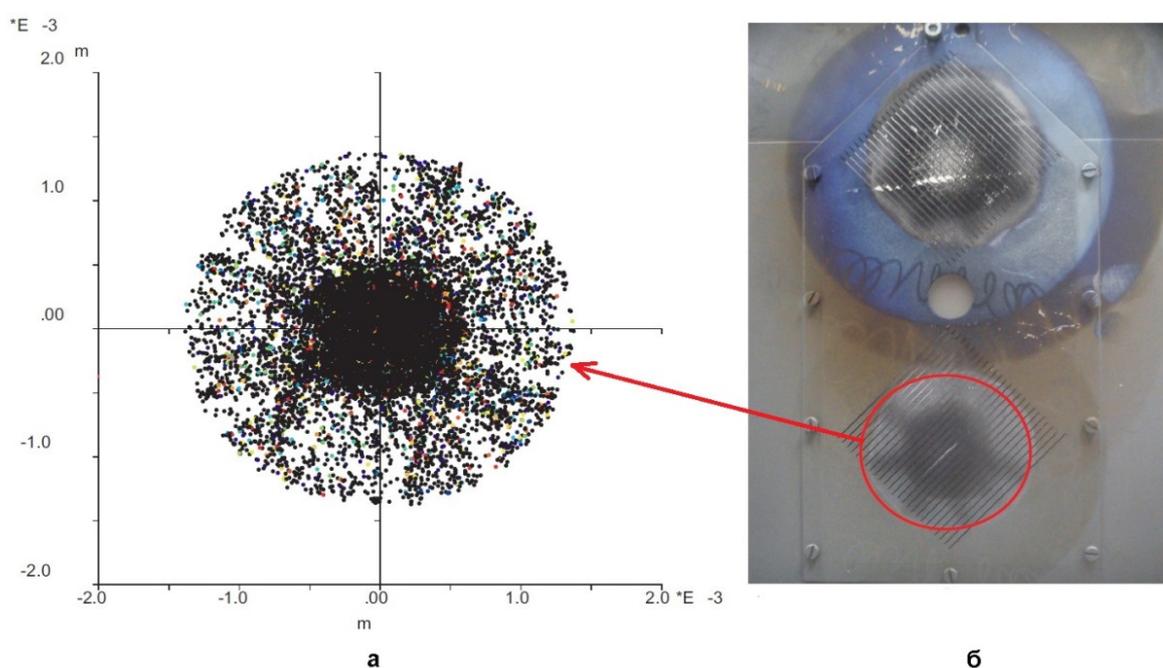


Рис. 15. Структура поперечного сечения пучка полученная в ходе а – моделирования и б – прямого эксперимента.

## **Выводы**

В работе представлены результаты первых экспериментов с системой диагностики эмиттанса пучка, разработанной для пучков низких энергий. Как показано выше результаты экспериментальных исследований находятся в согласовании с результатами численного моделирования с использованием программного пакета КОБРАЗ-ИПР при условии учета влияния объемного заряда и вторичных процессов. Эксперименты показывают возможность использования приведенной выше методики для оптимизации ИОС ИД и характеристики пучков. Тем не менее, необходимы дальнейшие исследования для определения границ применения методики и ее эффективности.

## **Библиографический список**

1. Buon J. Beam phase space and emittance. // CAS-CERN Accelerator School: 5th General Accelerator Physics Course, 1992. - pp. 89-116.
2. Allison P., Sherman J.D., Smith H.V.Jr. Comparison of measured emittance of an H<sup>-</sup> ion beam with a simple theory. - Los Alamos National Lab, Los Alamos. - Technical Report. - 1981. - pp. 1-12.
3. Hobein M., Liu Y., Solders A., Suhonen M., Kamalou O., Schuch R. A compact time-resolving pepperpot emittance meter for low-energy highly charged ions. // Physica Scripta, T144 (2011) 014062, 2011. – 4p, <http://iopscience.iop.org/1402-4896/2011/T144/014062/refs>.
4. Форрестер А.Т. Интенсивные ионные пучки: Пер. с англ. – М.: Мир. -1991. с. 117-120.
5. Lapostolle P.M. Possible Emittance Increase through Filamentation Due to Space Charge in Continuous Beams. // Nuclear Science, IEEE Transaction on, 18, 3, 0018-9499, 1971. – 4p.

[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4326292&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D4326292](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4326292&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4326292),

6. Zhang M. Emittance Formula for Slits and Pepper-pot Measurements. – Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia. - Fermilab-TM-1988. - 1996. – 10p.

7. Stockli Martin P., Welton R.F., Keller R., Letchford A.P., Thomae, R.W., Thomason J.W.G. Accurate estimation of the RMS emittance from single current amplifier data. // Lawrence Berkeley National Laboratory, 31/05/2002. – 25p., <http://escholarship.org/uc/item/7pn7h888>

8. Spaedtke P. Computer simulation of extraction / in the book: “The physics and technology of ion sources”, edited by I.G.Brown.- Berlin: Wiley-VCH, 2004, pp.41-60, ISBN: 978-3-527-40410-0