



Ордена Ленина

ИАЭ-3024

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

SI 49 03398

*В. Г. Григорьян, Л. А. Латышев, В. А. Обухов,
А. А. Панащенко, Н. Н. Семашко*

**Распределение потоков
вторичных заряженных частиц
в ячейке ионно-оптической системы
ионного источника**

Москва 1978

ОРДЕНА ЛЕНИНА
ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ им. И.В. КУРЧАТОВА

В.Г. Григорьян, Л.А. Латышев, В.А. Сбухов,
А.А. Павасенков, Н.Н. Семашко

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ
ВТОРИЧНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В ЯЧЕЙКЕ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ИОННОГО ИСТОЧНИКА

Москва
1978

В.Г. Григорьян, Л.А. Латышев, В.А. Обухов - Московский
авиационный институт им. С. Орджоникидзе.

А.А. Панасенков, Н.Н. Семашко - Институт атомной энергии
им. И.В. Курчатова.

Рассмотрено движение вторичных ионов, образующихся в объеме ионно-оптической системы источника ионов в результате перезарядки и ионизации, а также электронов, рождающихся на ускоряющем электроде под действием ион-электронной эмиссии. На интеграторе типа "электролитическая ванна" построены траектории заряженных частиц и определены распределения тепловых потоков по электродам.

Показано влияние конфигурации электродов и формы границы вторичной плазмы вблизи выходного электрода на распределение тепловой нагрузки по электродам.

1. ВВЕДЕНИЕ

При решении проблемы управляемого термоядерного синтеза одной из важнейших задач является создание эффективных инжекторов мощных потоков атомов водорода, предназначенных для нагрева плазмы до термоядерных температур [1].

В связи с этим весьма актуальным становится вопрос о разработке ионно-оптической системы (ИОС) плазменного источника ионов, позволяющей получать стационарные пучки заряженных частиц с эмиссионной плотностью тока около $0,5 \text{ А/см}^2$ при энергии в несколько десятков килоэлектронвольт.

Существенное влияние на работоспособность ИОС оказывают потоки вторичных заряженных частиц, образующихся в ее объеме, на электродах и в камере перезарядки пучка.

Эти потоки несут большую энергию на электроды ИОС, что при длительности импульсов свыше 1 с требует разработки ИОС с охлаждаемыми электродами. Для того чтобы успешно решать возникающие проблемы, необходимо рассчитывать потоки частиц в ИОС.

В настоящее время разработаны программы для расчета на ЭВМ траекторий заряженных частиц в ИОС с учетом их объемного заряда [1, 2]. Эти программы позволяют с высокой точностью определять траектории частиц и угол расходимости пучка на выходе из системы. В работе [3] приведен результат расчета на ЭВМ потоков вторичных частиц из объема пучка и камеры перезарядки, однако граница вторичной плазмы со стороны перезарядной камеры задавалась плоской, кроме того, не учитывался объемный заряд вторичных частиц, покидающих эту границу. Как будет показано ниже, эти факторы играют большую роль в распределении потоков вторичных частиц в ячейке ИОС.

В данной работе для расчета траекторий ионов использовался электронинтегратор типа "электролитическая ванна". Выбор электронинтегратора связан с тем, что требования по точности расчета траекторий вторичных частиц могут быть ниже, чем при расчете конфигурации основного пучка. Использовать электролитическую ванну особенно удобно в случаях, когда расчет связан с перебором вариантов форм ускоряющего и выходного электродов ИОС, при которых конфигурация первичного пучка остается практически неизменной.

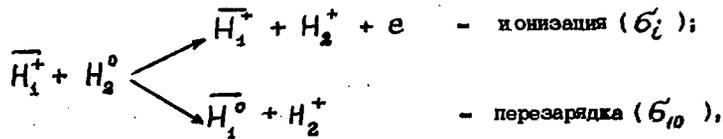
2. ИОС ИСТОЧНИКА ИОНОВ И ХАРАКТЕРИСТИКА ВТОРИЧНЫХ ПОТОКОВ

В качестве исходной была выбрана геометрия ИОС источника без внешнего магнитного поля (ИБМ), обеспечивающего получение пучка ионов водорода с током около 35 А и энергией до 40 кэВ при длительности импульса десятки микросекунд [4]. Источник имеет разрядную камеру, в которой зажигается низковольтный разряд, обеспечивающий однородную поставку ионов на эмиссионную границу плазмы с плотностью тока около $0,5 \text{ А/см}^2$, и многощелевую трехэлектродную ИОС, которая позволяет извлекать и формировать пучки ионов с эмиссионной плотностью тока до $0,5 \text{ А/см}^2$ при угле расходимости элементарного пучка из одной ячейки ИОС около $\pm 1,3^\circ$. Геометрия ячейки ИОС на 40 кВ представлена на рис. 1. Эмиссионный (ЭЭ), ускоряющий (УЭ) и выходной (ВЭ) электроды выполнены в виде молибденовых решеток, длина щелей которых много больше их ширины.

Давление водорода в разрядной камере $(1 + 1,5) \cdot 10^{-2}$ торр. Поскольку газовая эффективность источника составляет $\sim 30\%$, из источника в ИОС вытекает поток холодного молекулярного водорода. Перезарядка ионного пучка в пучок атомов осуществляется на этом газе в камере перезарядки, которая представляет собой прямоугольную трубу, пристыкованную к источнику и обеспечивающую при длине ~ 70 см необходимую толщину перезарядной мишени.

Оценки показывают, что концентрация молекул водорода в разрядной камере, ускоряющем промежутке (между ЭЭ и УЭ), замедляющем промежутке (между УЭ и ВЭ) и в камере перезарядки вблизи ИОС составляет $4 \cdot 10^{14}$, $3 \cdot 10^{14}$, $2 \cdot 10^{14}$ и $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ соответственно.

Первичный пучок ионов при своем движении в ИОС и в камере перезарядки рождает вторичные ионы и электроны в результате перезарядки и ионизации водорода. Расчеты потоков вторичных частиц на электроды ИОС велись в предположении, что из разрядной камеры источника выходят только ионы H_i^+ и вторичные частицы образуются согласно реакциям



где σ_i и σ_{i0} - сечения процессов, зависящие от энергии частиц (рис. 2) [5]. В расчетах учитывались:

- 1) поток вторичных ионов, образующихся в объеме ИОС;
- 2) поток ионов из вторичной плазмы, образующейся в камере перезарядки;
- 3) потоки электронов, образующихся на ускоряющем электроде в результате вторичной ион-электронной эмиссии.

Ток вторичных ионов, образующихся в ИОС в элементарном объеме $\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot l$, определяется выражением

$$\Delta I'_+ = (\sigma_i + \sigma_{i0}) n_0 j_1 \Delta V. \quad (1)$$

Здесь x - направление, параллельное, а y - перпендикулярное плоскости симметрии ячейки ИОС; n_0 - концентрация молекул водорода; j_1 - плотность тока первичного пучка.

Отрицательный потенциал УЭ по отношению к ВЭ (по модулю примерно 10% от потенциала ЭЭ) необходим для предотвращения обратного потока электронов из вторичной плазмы, образующейся за ИОС. Поток вторичных ионов из плазмы на УЭ представляет собой ионный ток насыщения, отбираемый с поверхности обратного мениска:

$$\Delta I''_+ \approx 0,4 e n_+ \sqrt{2 T_e / M_+} \Delta S, \quad (2)$$

где n_+ - концентрация ионов вторичной плазмы; T_e - температура электронов; M_+ - масса иона. Оценка концентрации n_+ вблизи ИОС источника дает величину $(1+2) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, величина T_e может составлять примерно 1 эВ [6], поэтому плотность тока ионов с поверхности вторичной плазмы взята равной 18 мА/см^2 .

Ток вторичных электронов с поверхности УЭ, образующихся вследствие ион-электронной эмиссии, равен

$$\Delta I_E = K \Delta I_+. \quad (3)$$

где ΔI_+ - ток ионов на УЭ; K - коэффициент ион-электронной эмиссии, который зависит от энергии ионов и от угла их падения на поверхность [7].

Мощность, выделяющаяся на электроде при попадании на него элементарного тока ΔI , определяется выражением

$$\Delta N = \Delta I \cdot \Delta U, \quad (4)$$

где ΔU - разность потенциалов между точками рождения и выпадения частиц.

3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Расчет ИОС на электролитической ванне позволяет по заданным параметрам плазмы, геометрии электродов и распределению на них потенциалов определить траектории ионов первичного пучка, вторичных частиц и конфигурацию плазменных менисков: прямого (плазма разрядной камеры) и обратного (плазма в камере перезарядки). Этот расчет сводится к решению системы уравнений:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \operatorname{grad} U = - \frac{en + en'}{\epsilon_0}; \\ \mu \frac{d\vec{v}}{dt} = -e \operatorname{grad} U; \\ \operatorname{div}(en\vec{v} + en'\vec{v}') = 0, \end{cases}$$

где U - потенциал; e - заряд; μ - масса; \vec{v} - скорость заряженной частицы; ϵ_0 - диэлектрическая постоянная. Параметры, обозначенные штрихом, относятся к вторичным частицам.

Необходимость расчета конфигураций плазменных менисков значительно усложняет решение задачи. Как показано в [8], при использовании интеграторов условие на плазменной границе удобно свести к виду

$$nkT_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 A(u^*) \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)^2 \Big|_{u=u^*}.$$

Величина $A(u^*)$ зависит от выбора величины u^* , которая должна быть порядка $\frac{kT_e}{e}$. В процессе расчета положение границы плазмы определялось методом последовательных приближений.

Для расчета потоков частиц на электроды область пучка разбивалась на объемы ΔV_i , а поверхности - на площадки ΔS_i . Из центров выделенных элементов графоаналитическим методом строились траектории "средних" частиц. Токи и энергия, выделяемые на каждом элементе, рассчитывались по формулам (1)-(4).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПОТОКОВ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ В ИСХОДНОЙ ЯЧЕЙКЕ ИОС

Результаты расчета распределения потенциалов, плазменных границ, формы пучка в исходной ячейке ИОС, проведенного с помощью электролитической ванны, показаны на рис. 3. На рис. 4 схематично изображены различные области основного пучка.

Медленные ионы, образовавшиеся в области 1, покидают ИОС, не претерпев столкновений с электродами. Из области 2 ионы со средней энергией около 5 кэВ попадают

на УЭ, а из области 3 - на ВЭ. УЭ подвергается также бомбардировке ионами с обратного мениска.

Расчеты показали существенное влияние конфигурации обратного мениска на объем области 2 и на траектории вторичных ионов, выпадающих на УЭ. Поэтому для повышения точности получаемых результатов участок ячейки ИОС, в котором происходит торможение пучка, моделировался отдельно. На рис. 5 приведены траектории ионов с обратного мениска, а на рис. 6 и 7 - траектории ионов, которые образовались в объеме ячейки и попали на УЭ.

Анализируя траектории вторичных электронов с поверхности УЭ (рис. 8), можно выделить границу, разделяющую поверхность электрода на две зоны. Вторичные электроны из зоны I выпадают на ЭЭ с энергией 45 кэВ, а из зоны II - на ВЭ с энергией 5 кэВ.

В сводной таблице приведены значения токов и мощностей на единицу длины перемычек в электродах и их доли в процентах по отношению к параметрам первичного пучка (0,15 А/см и 6 кВт/см).

Как видно из таблицы, в исходной ИОС (система 1,а) распределение тепловых потоков существенно неравномерно. Вторичные ионы, родившиеся в области пучка в ИОС, выпадают на УЭ главным образом в зоне II. Ток ионов с обратного мениска в 1,3 раза больше, причем большая часть этих ионов выпадает в зоне I вследствие "невыгодной" кривизны обратного мениска. В результате почти половина вторичных электронов с УЭ попадает с полной энергией на ЭЭ, выделение мощности на нем в 5 раз превышает выделение мощности на УЭ и достигает 6% мощности первичного пучка.

5. ОПТИМИЗАЦИЯ ИОС ПО ТЕПЛОВЫМ ПОТОКАМ

Оптимизация ИОС по минимальным тепловым потокам на электроды заключается в подборе таких конфигураций, которые обеспечивали бы равномерную нагрузку на все три электрода. Тепловыделение на эмиссионном электроде можно уменьшить, перераспределив таким образом поток выпадающих на УЭ вторичных ионов, чтобы потоки в зону I были минимальными. Свойства ИОС по извлечению и фокусировке пучка определяются распределением потенциала вблизи ЭЭ, в то время как траектории вторичных ионов и электронов зависят от распределения потенциала в области между УЭ и ВЭ. Изменяя потенциал УЭ, а также форму и относительное расположение УЭ и ВЭ, можно в определенных пределах оптимизировать потоки вторичных частиц без ухудшения фокусировки первичного пучка.

Уменьшение по абсолютной величине потенциала УЭ (U_{y3}) от -5 до -3 кВ приводит к уменьшению области в ИОС, из которой вторичные ионы идут на УЭ, а также к

изменению положения и, главное, формы границы плазмы вблизи ВЭ (рис. 9). Обратный мениск становится выпуклым, все ионы с него идут в зону $\overline{\text{II}}$ УЭ (граница между зонами $\overline{\text{I}}$ и $\overline{\text{II}}$ остается практически на прежнем месте), т.е. ЭЭ оказывается разгруженным при незначительных нагрузках на УЭ и ВЭ (система 1,6 в таблице). При $|\mathcal{U}_{\text{УЭ}}| < 2,5$ кВ происходит прорыв "креста", запирающего электроны вторичной плазмы.

Таким образом, уменьшая в определенных пределах $|\mathcal{U}_{\text{УЭ}}|$, можно эффективно перераспределять вторичные потоки и разгружать ЭЭ.

Было рассмотрено влияние конфигурации УЭ и ВЭ на распределение вторичных потоков при заданном $\mathcal{U}_{\text{УЭ}} = -5$ кВ.

При использовании УЭ с перемычками треугольного сечения граница между зонами $\overline{\text{I}}$ и $\overline{\text{II}}$ смещается влево и протяженность зоны $\overline{\text{I}}$ у такого электрода оказывается меньше, чем в исходной системе (рис. 10).

Расчеты показали, что все ионы с обратного мениска приходят только в зону $\overline{\text{II}}$; следовательно, эмиссионный электрод оказывается полностью, в пределах точности расчетов, разгруженным от потоков вторичных частиц.

Снижение абсолютной величины тока ионов с обратного мениска может быть достигнуто за счет сокращения его протяженности, т.е. за счет уменьшения ширины щели в ВЭ (рис. 11). При этом область 3 возрастает (область 3' на рис. 4), однако связанное с этим увеличение энерговыделения на ВЭ практически компенсируется уменьшением тепловых потоков от вторичной электронной эмиссии с УЭ на ВЭ.

В таблице эти системы представлены соответственно под номерами 2 и 3.

Если использовать УЭ с перемычками круглого сечения, то намного проще становятся вопросы технологии изготовления и организации принудительного охлаждения электродов. Для такой системы на рис. 12 представлены траектории ионов с обратного мениска, а результаты расчета приведены в таблице (система 4). Эта система по распределению нагрузки мало отличается от исходной.

Все предыдущие расчеты показывают существенное влияние формы обратного мениска на вторичные потоки, поэтому дополнительно были исследованы системы 5, 6.

В системе 5 расстояние между ВЭ и УЭ устанавливалось таким, чтобы обратный мениск имел форму выпуклую в сторону УЭ (рис. 13). При этом основная доля ионного тока из области нейтрализации выпадает в зону $\overline{\text{II}}$ УЭ, причем нагрузка на УЭ возрастает на 20%, а мощность, выделяемая на ЭЭ, снижается на 75%. В этой системе электроды нагружены практически равномерно.

Уменьшение ширины щели ВЭ в системе 6 (рис. 14), как и в системе 3, позволяет снизить уровень выделяемых мощностей при достаточно равномерной нагруженности электродов.

Выводы

1. Распределение тепловых потоков на электроды исходной ИОС неравномерно. Так, тепловыделение на эмиссионном электроде примерно в 5 раз выше, чем на ускоряющем, и в 9 раз выше, чем на выходном электроде.

2. Распределение потоков определяется конфигурацией эквипотенциалей в промежутке между УЭ и ВЭ и главным образом формой поверхности вторичной плазмы (обратного мениска).

3. Уменьшением по абсолютной величине потенциала УЭ до некоторого определенного значения (чтобы не произошло прорыва "креста") можно получить выпуклый в сторону УЭ обратный мениск, существенно перераспределить потоки вторичных частиц и практически разгрузить эмиссионный электрод.

4. Изменением геометрии ИОС в районе УЭ и ВЭ также можно добиться снижения тепловыделения на ЭЭ при равномерном и умеренном тепловыделении на всех электродах.

Авторы выражают благодарность Р.К. Чуяну за полезное участие в обсуждении полученных результатов, Е.К. Поповой и Г.А. Гаврилину за большую помощь в проведении расчетов и оформлении работы.

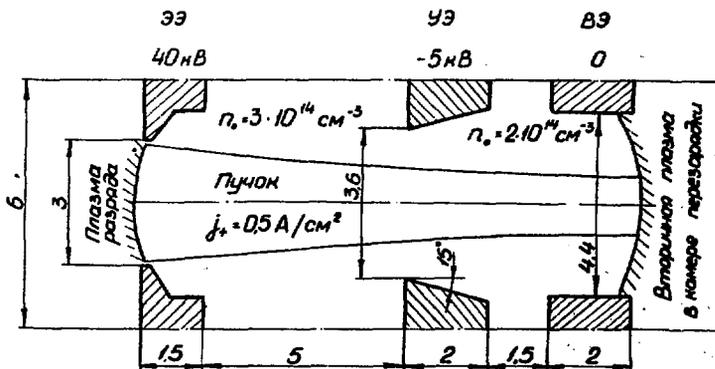


Рис. 1. Геометрия щелевой ячейки ИОС на 40 кВ: ЭЭ - эмиссионный электрод; УЭ - ускоряющий электрод; ВЭ - выходной электрод

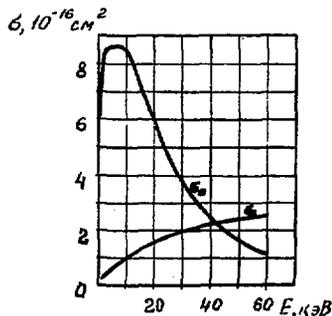


Рис. 2. Сечения перезарядки (σ_{10}) и ионизации (σ_i) для протонов в водороде в зависимости от энергии протонов

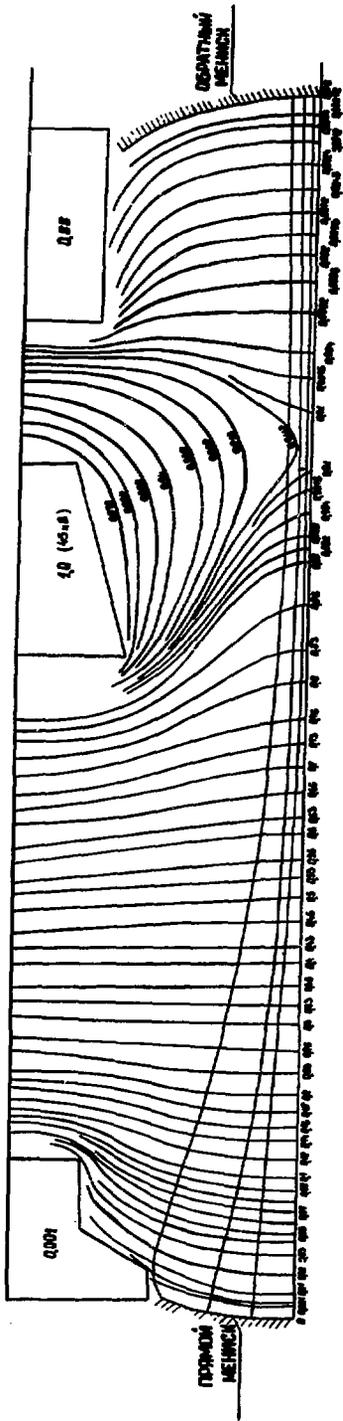


Рис. 3. Конфигурация плазменных границ, пучка и распределение потенциалов в исходной ячейке ИОС

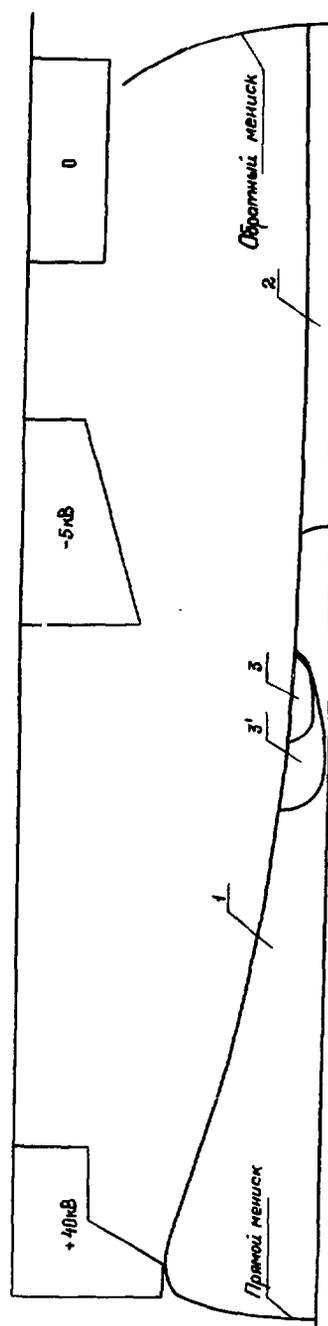


Рис. 4. Различные области в первичном пучке в ИОС, из которых вторичные ионы ускоряются и проходят в отверстии ВЭ (1), попадают на УЭ (2), попадают на ВЭ (3), попадают на ВЭ (3') в случае уменьшенной ширины щели в ВЭ

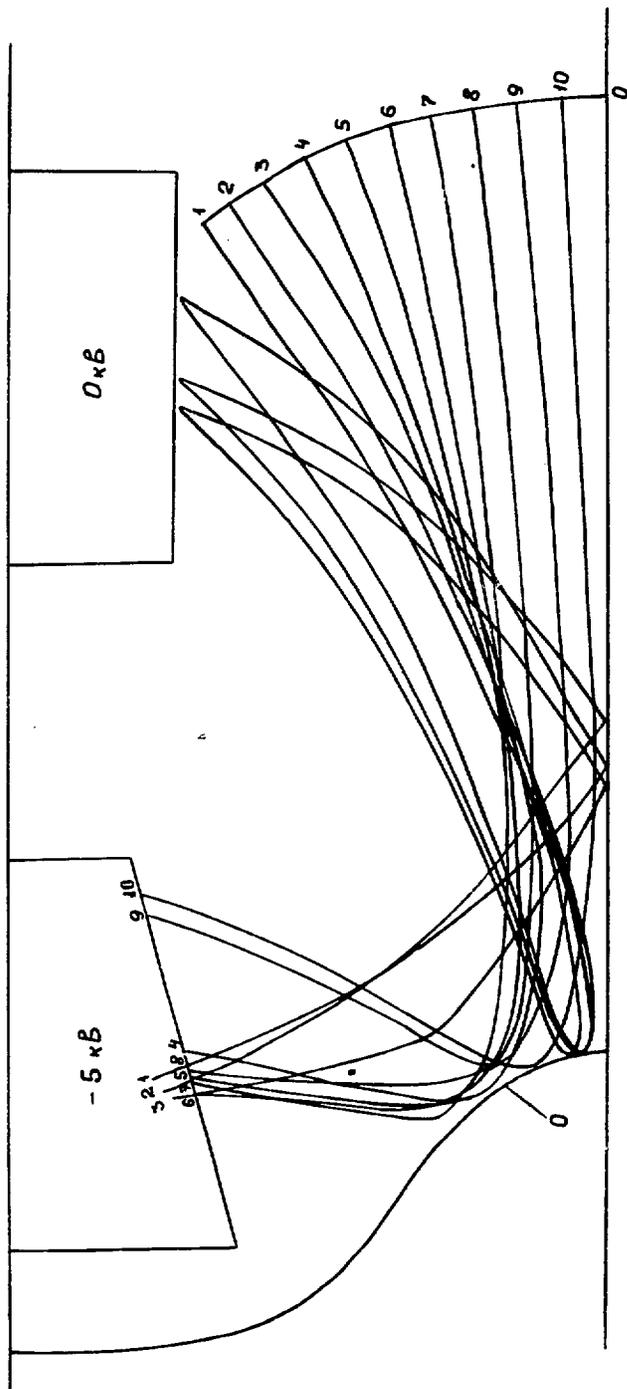


Рис. 5. Траектории вторичных ионов с обратного мениска

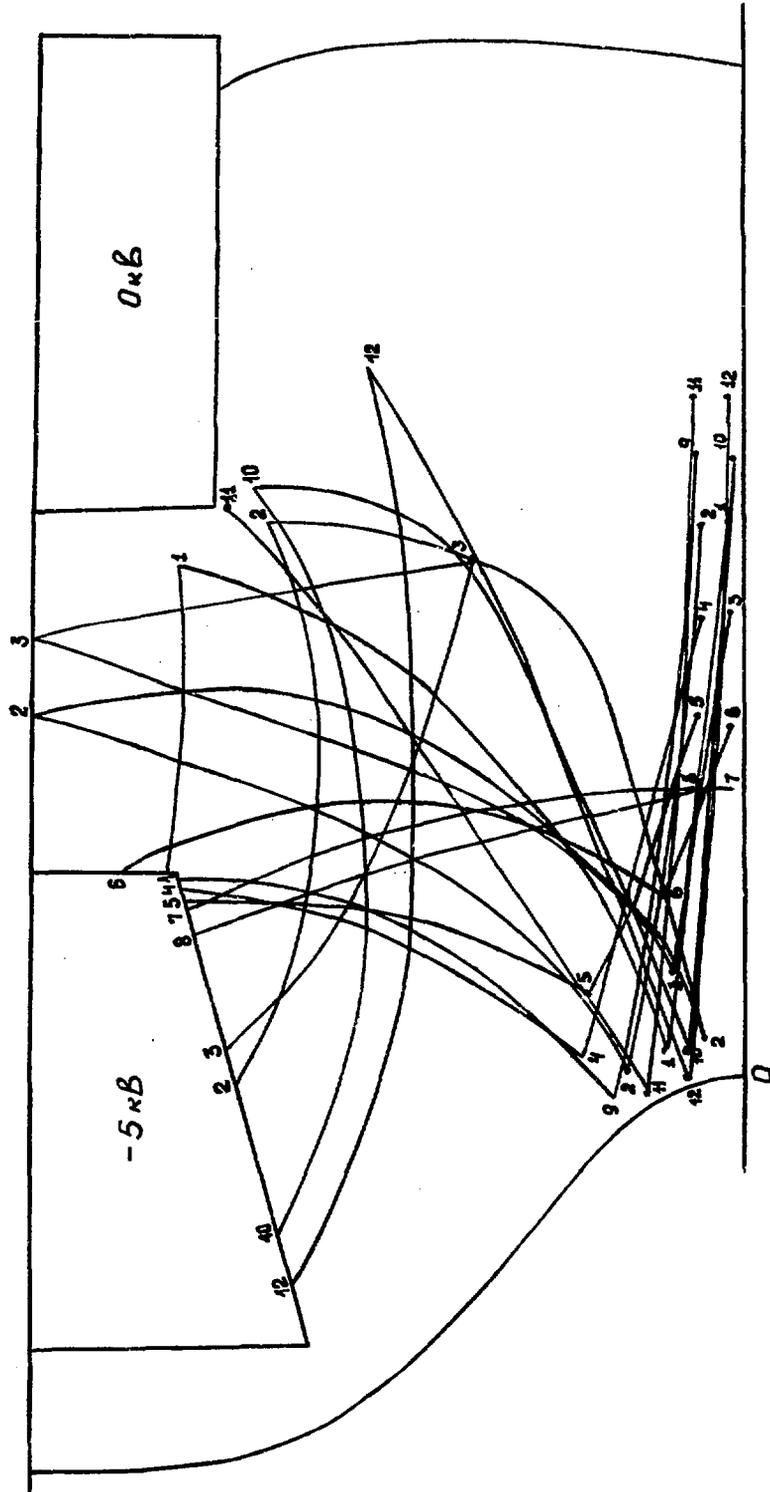


Рис. 6. Траектории вторичных ионов из правой части области 2

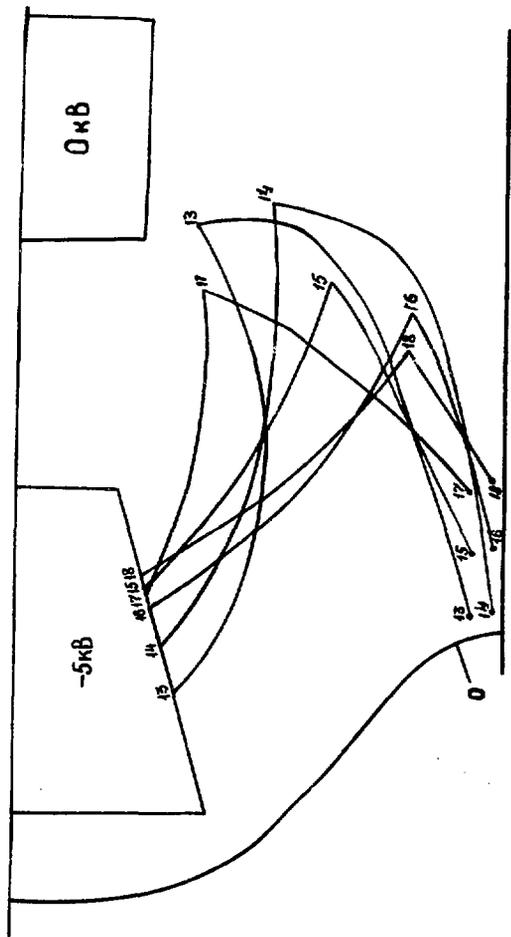


Рис. 7. Траектории вторичных ионов из левой части области 2

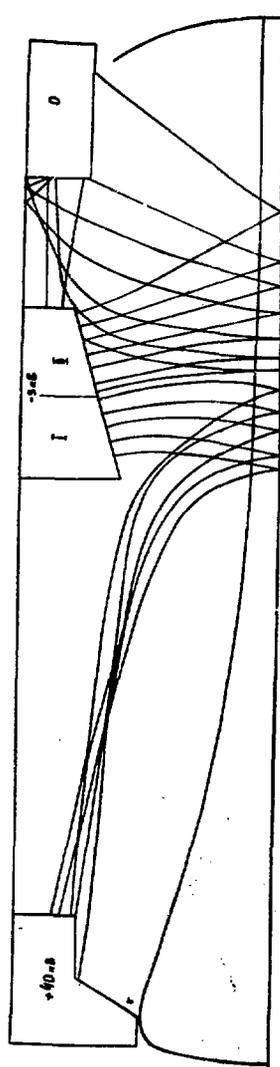


Рис. 8. Траектории электронов, образующихся на УЭ в результате вторичной ион-электронной эмиссии

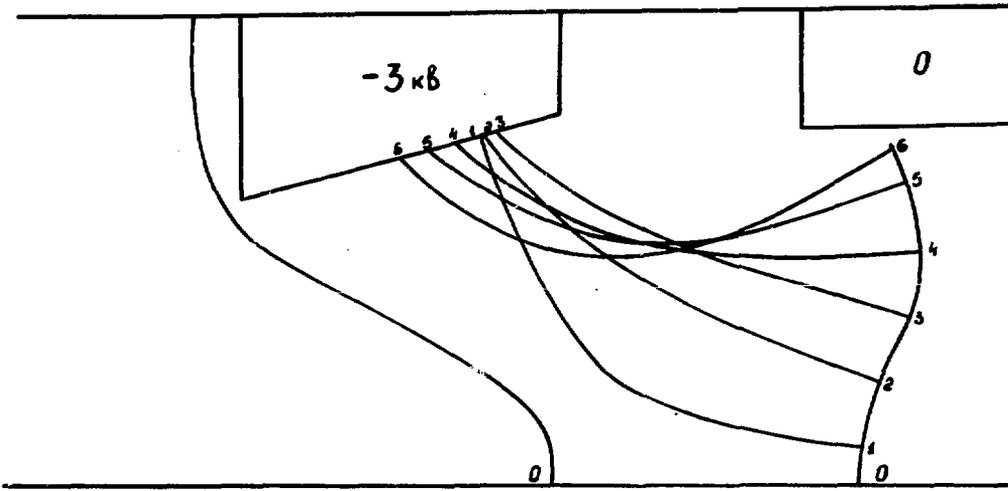


Рис. 9. Конфигурация обратного мениска и траектории вторичных ионов с него при потенциале на УЭ, равном -3 кВ

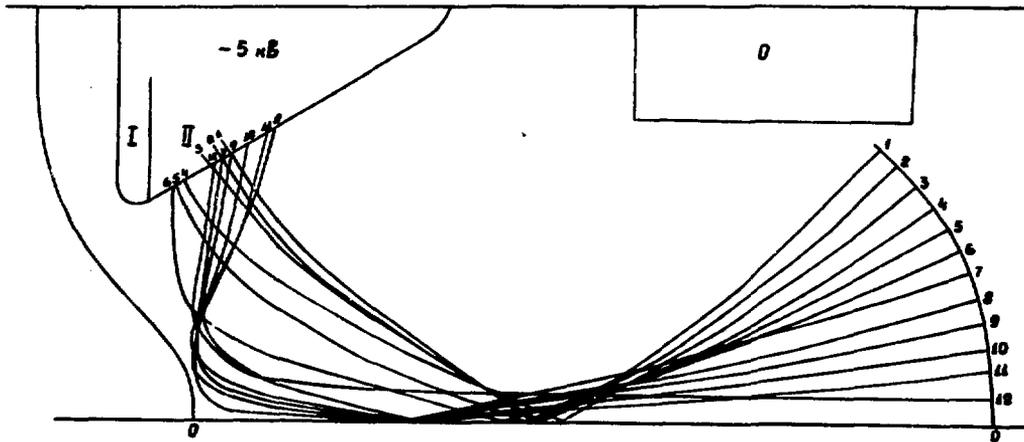


Рис. 10. Траектории вторичных ионов с обратного мениска в случае УЭ с перемычками треугольного сечения

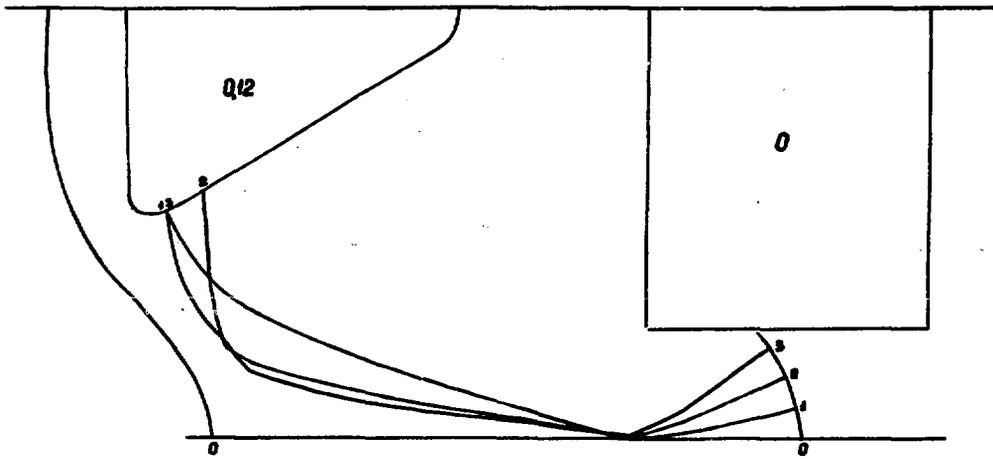


Рис. 11. Траектории вторичных ионов при уменьшенной ширине щели в ВЭ

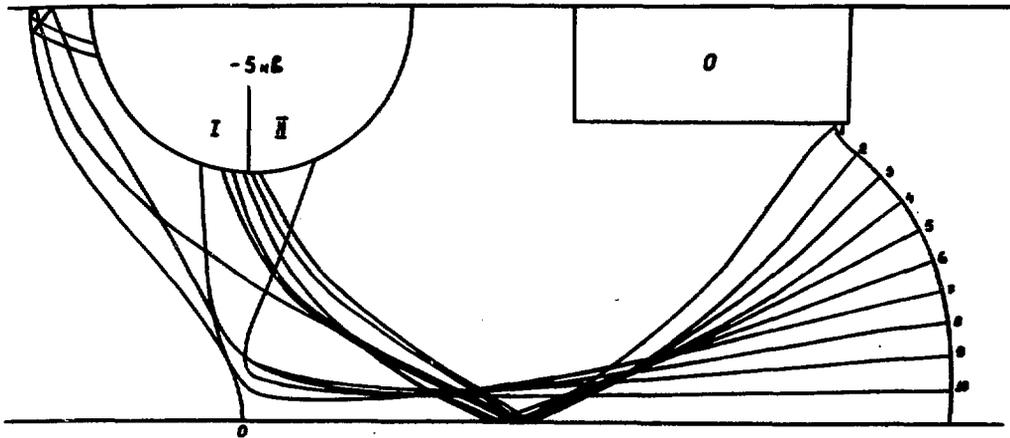


Рис. 12. Траектории вторичных ионов с обратного мениска в случае УЭ с перемычками круглого сечения

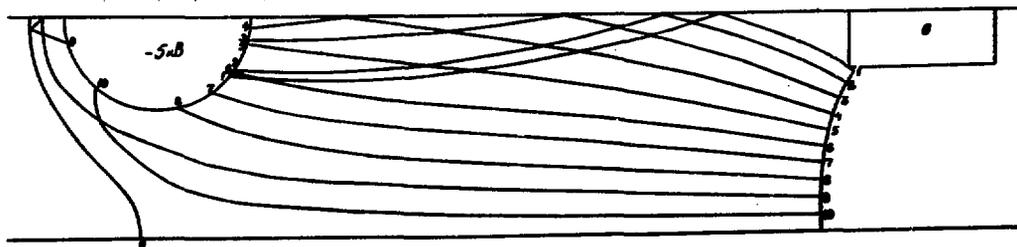


Рис. 13. Конфигурация обратного мениска и траектории вторичных ионов с него при увеличенном расстоянии между УЭ и ВЭ

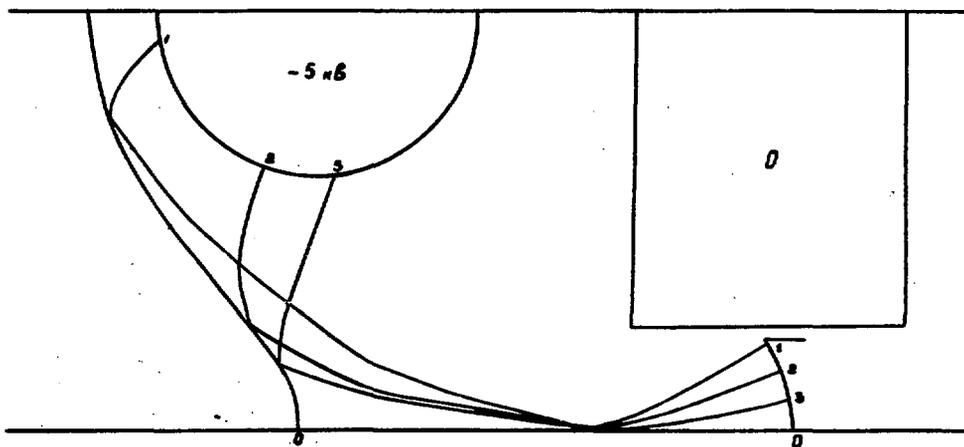


Рис. 14. Траектории вторичных ионов при уменьшенной ширине щели в ВЭ в случае УЭ с перемычками круглого сечения

Система	Ускоряющий элемент										Эмиссионный элемент		Выходной элемент			
	Ток ионов из пучка, мА/см		Ток ионов с мембраны, мА/см		Полный ток ионов, мА/см		Мощность, Вт/см		Ток, мА/см		Мощность, Вт/см		Ток, мА/см		Мощность, Вт/см	
	Зона I	Зона II	Зона I	Зона II	Зона I	Зона II	Зона I	Зона II	Ток	Мощность	Ток	Мощность	Ток	Мощность	Ток	Мощность
	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Ток, мА/см	Мощность, Вт/см	Ток, мА/см	Мощность, Вт/см	Ток, мА/см	Мощность, Вт/см	Ток, мА/см	Мощность, Вт/см
1, а	0,6 0,4%	6 4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%
1, б	—	4 2,7%	4 2,7%	—	4 2,7%	4 2,7%	4 2,7%	4 2,7%	4 2,7%	4 2,7%	4 2,7%	4 2,7%	4 2,7%	4 2,7%	4 2,7%	4 2,7%
2	—	6,6 4,4%	6,6 4,4%	—	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%	6,6 4,4%
3	—	5,8 3,9%	5,8 3,9%	1,2 0,8%	1,2 0,8%	2,4 1,6%	2,4 1,6%	1,2 0,8%	1,2 0,8%	7 4,65%	7 4,65%	6,2 4,15%	6,2 4,15%	41 27%	41 27%	38,5 25,5%
4	—	7,25 4,85%	7,25 4,85%	6,3 4,2%	6,3 4,2%	9 6%	9 6%	6,3 4,2%	6,3 4,2%	9,95 6,75%	9,95 6,75%	16,25 11%	16,25 11%	81 53%	81 53%	55 37%
5	—	11,6 7,7%	11,6 7,7%	1,6 1,1%	1,6 1,1%	6,4 4,25%	6,4 4,25%	1,6 1,1%	1,6 1,1%	18 12%	18 12%	19,6 13,1%	19,6 13,1%	98 63%	98 63%	100 66%
6	—	6 4%	6 4%	1,6 1,1%	1,6 1,1%	2,4 1,65%	2,4 1,65%	1,6 1,1%	1,6 1,1%	6,8 4,5%	6,8 4,5%	8,4 5,6%	8,4 5,6%	42 27%	42 27%	37,5 25%

Рис. 15. Сводная таблица значений токов и мощностей на единицу длины перемычек в электродах и их доли в процентах по отношению к параметрам первичного пучка (0,15 А/см и 6 кВт/см) для различных систем

ЛИТЕРАТУРА

1. Cooper W.S. e.a. Proc. 2nd Int.Cont. on Ion Sources. Vienna, 1972, Paper D-3.
2. Болдасов В.С. и др. - ДАН, 1971, т. 201.
3. Fink J.H., McDowell G.E. Proc. 6th Symp. on Engin.Problems of Fusion Res. San Diego, Calif., 1975.
4. Кулыгин В.М. и др. - Препринт ИАЭ-2898. М., 1977.
5. Barnett C.F. e.a. Atomic Data for Controlled Fusion Research, Preprint ORNL-5206, 1977.
6. Kulygin V.M., Panassenkov A.A. Proc. 2nd Symp. on Ion Sources and Formation of Ion Beams, Berkeley, Paper II-11, 1974; Supplement IBL-3399.
7. Дорожкин А.А. Физическая электроника. - В сб.: Труды ЛПИ, 1966, № 277, с.105.
8. Еремин Л.В., Латышев Л.А., Чуян Р.К. Методы расчета электронно-оптических систем. Ч. II. ВЦ АН СССР, Новосибирск, 1973.

Редактор Л. А. Кузьмина

Технический редактор Н.И.Мазаева

Корректор В.П.Горячева

T-11109. 24. 05. 78 г. Формат 60x90/8. Уч.-изд. л. 1,30
Тираж 200 экз. Заказ 649. Цена 13 коп. ИАЭ

3 kon.