

УДК 621.039

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ИОНОВ И АТОМОВ ДЛЯ ИНЖЕКЦИИ В ТОРЦЕВОЙ ПРОБКОТРОН АМБИПОЛЯРНОЙ ЛОВУШКИ "АМБАЛ-М"

И. И. Морозов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Приведены результаты экспериментального исследования и численного моделирования зависимости плотности потока и расходимости ионного пучка от условий формирования плазменной эмиссионной поверхности. Изучались пучки дейтронов и протонов с энергией до 30 кэВ и током до 50 А.

Исследовались производимые ионными источниками ИК-50 [1] пучки дейтронов и протонов с энергией до 30 кэВ, током до 50 А при длительности импульса 10—100 мс. Интервал между импульсами составлял 1—5 мин. Эмиссионный размер пучка 12×24 см.

Основная проблема заключается в транспортировке пучка на расстояние 4 м. Изучалась зависимость плотности потока и расходимости ионного пучка от условий формирования плазменной эмиссионной поверхности. Экспериментальное исследование производилось с помощью вторично-эмиссионных коллекторов, болометров и оптической диагностики. Выполнялось численное моделирование формирования однородной плазменной эмиссионной поверхности с малыми поперечными скоростями ионов и геометрической фокусировки плотного протяженного пучка с учетом его расходимости из-за неоднородности плотности потока плазмы на эмиссионной поверхности. Исследования проводились в связи с разработкой ионных источников ИК-50 для инъекции быстрых атомов в установку "Амбал-М". На рис. 1 приведена геометрия инжекторного тракта торцевого пробкотрона. Основная сложность — провести пучок до плазмы через кожух, экранирующий пучок ионов от магнитного поля пробкотрона, с внутренним поперечным размером 25 × 15 см и патрубки на входе пучка в пробкотрон размером 20 см.

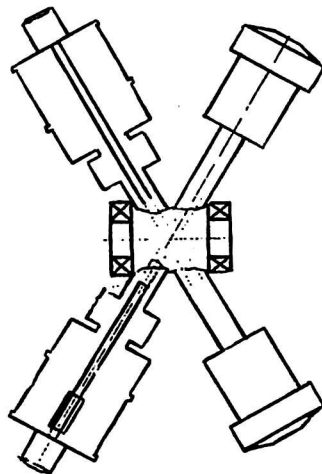
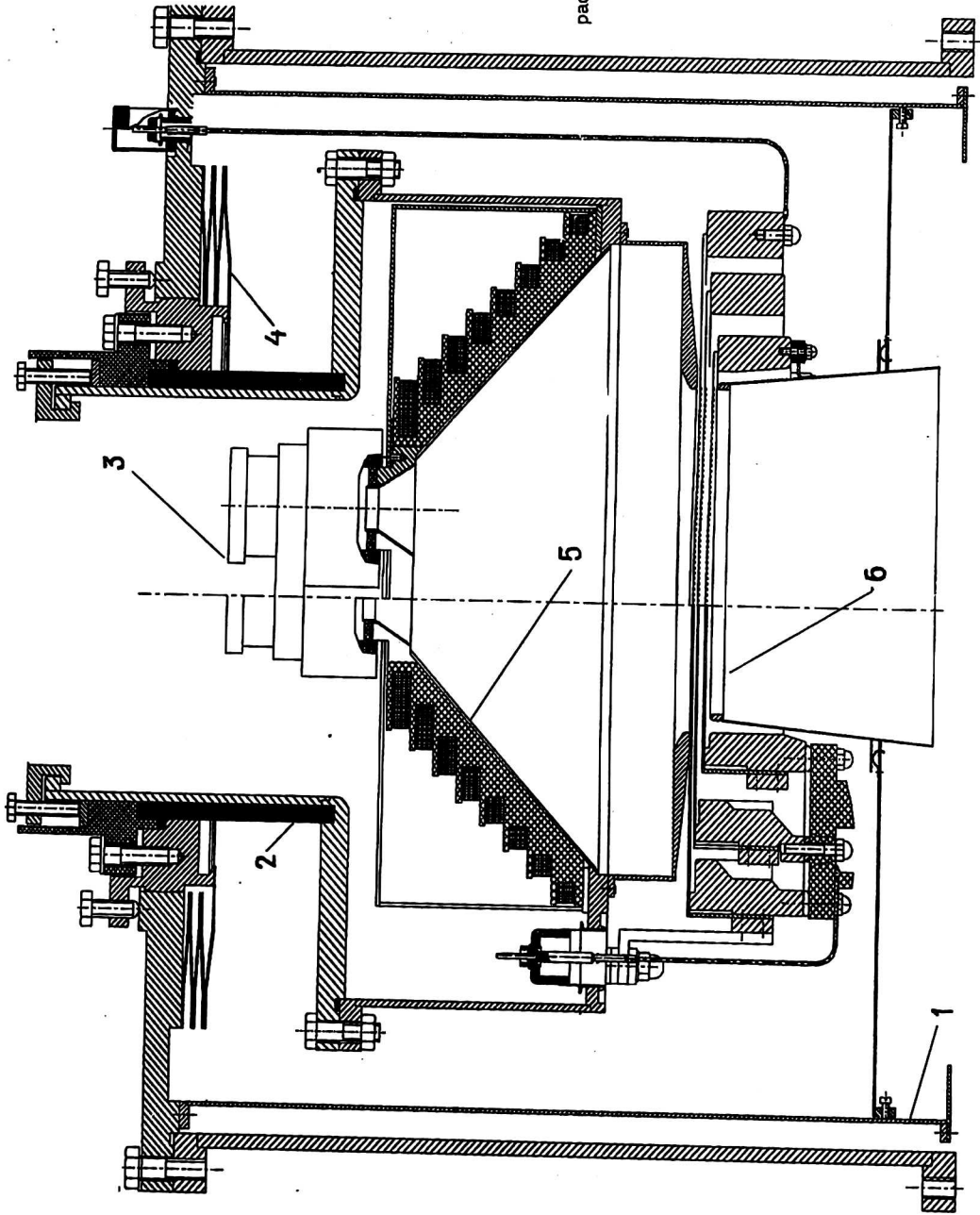


Рис. 1. Инжекторные тракты концевого пробкотрона установки "Амбал-М"

На рис. 2 приведены схема ионного источника ИК-50 в виде совмещенных чертежей разрезов в двух плоскостях, подробно описанного в [1, 2], состоящего из двух генераторов плазмы 3, системы формирования плазменного эмиттера и ионно-оптической системы 6. В основном изучалось влияние двух факторов: неоднородности плотности потока плазмы и поперечной скорости ионов на эмиссионной поверхности.

Рис. 2. Конструкция ионного источника ИК-50:

- 1 — экран; 2 — изолятор;
- 3 — генераторы плазмы;
- 4 — сиффон; 5 — магнитный растроб; 6 — ионно-оптическая система



Дуговые генераторы создают струи высокоионизированной плазмы, из которой с помощью магнитного раструба в плоскости плазменной сетки ионно-оптической системы формируется плазменный эмиттер. Ионный пучок электростатически вытягивается из эмиттера и ускоряется многощелевой ионно-оптической системой с прямоугольной рабочей апертурой 12 x 24 см.

Ионный источник смонтирован в стальном цилиндрическом вакуумном баке, служащим одновременно магнитным экраном. При работе узлы блок-генераторов плазмы и катушки магнитного раструба находятся под высоким потенциалом, они изолированы на высокое напряжение от заземленного фланца цилиндрическим керамическим изолятором, уплотненным на вакуум. Фланец снабжен сифонным механизмом для корректировки ввода пучка в пробкотрон в пределах $\pm 2^\circ$. Изолятор изготавливается из ультрафарфора УФ-6 или алюминиевой керамики 22ХС и может разделять по напряжению до 50 кВ. Поле магнитного раструба создается при помощи восьми овальных катушек, которые находятся в атмосфере. Ионно-оптическая система вытягивания и ускорения ионного пучка состоит из четырех электродов, смонтированных на керамических (УФ-6) изоляторах. Плазменный, вытягивающий и ускоряющий электроды — многощелевые, а четвертый — заземленный электрод, имеет открытую апертуру. Щелевая структура электродов образована молибденовыми проволоками диаметром 1 мм, предварительно подвергнутыми вакуумному обжигу. Проволоки установлены с шагом 3 мм. Расстояние от плазменного до вытягивающего электрода по центрам проволок 8 мм. Тепловая неустойчивость проволок из-за нагрева частицами пучка ликвидируется продольным натяжением с усилием 8 кгс.

Проволочки ориентированы вдоль меньшего размера плазменного эмиттера. Для геометрической фокусировки пучка по большему размеру проволочки располагаются на цилиндрической поверхности с радиусом 4 м, вдоль ее оси. Точность позиционирования проволочек обеспечивается точностью изготовления направляющих пазов в рамах и контролем при их приваривании к рамам и пружинам.

Численное моделирование

Для расчетов магнитное поле формирователя вычислялось с помощью набора программ SAM [3]. Движение ионов плазмы из области, отстоящей на 1,5 см от генератора плазмы, считалось бесстолкновительным. Траектории рассчитывались по схеме Рунге-Куты 4-го порядка. Запускалось $10^6 \div 10^7$ частиц, что позволило сосчитать плотность потока и среднюю скорость ионов на эмиссионной поверхности. Далее эмиссионная поверхность была разбита на 4800 ячеек размером по 2x2 мм. Расходимость пучка вдоль и поперек щелей ионно-оптической системы бралась из работ [2, 4]. Плотность потока на расстоянии 1, 2, 3, 4 и 5 м от источника (рис. 3, а—д, соответственно) была рассчитана из следующих формул:

$$j(x, y) = \sum j_{kn}, \quad k = 1-80, \quad n = 1-60;$$

$$j_{kn} = \frac{I_{kn}}{\pi \theta_{xkn} \theta_{ykn} L^2} \exp \left(- \frac{(x-x_{kn})^2}{\theta_{xkn}^2 L^2} - \frac{(y-y_{kn})^2}{\theta_{ykn}^2 L^2} \right);$$

$$x_{kn} = \left(\frac{V_{xkn}}{V_b} - \varphi_k \right) L, \quad y_{kn} = \frac{V_{ykn}}{V_b} L,$$

где L — расстояние от ионного источника;

x — расстояние от точки наблюдения до оси пучка по вертикали;

y — расстояние от точки наблюдения до оси пучка по горизонтали;

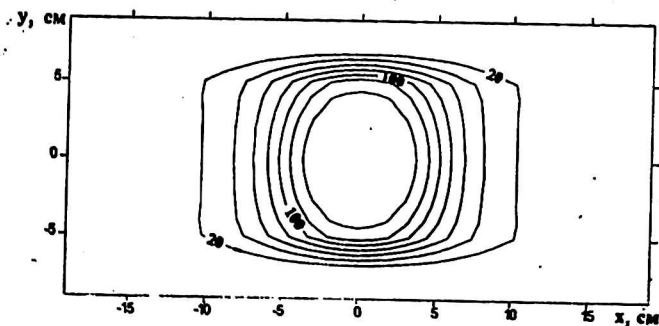
j — плотность потока ионов в пучке;

I_{kn} — поток плазмы, в ячейке k ;

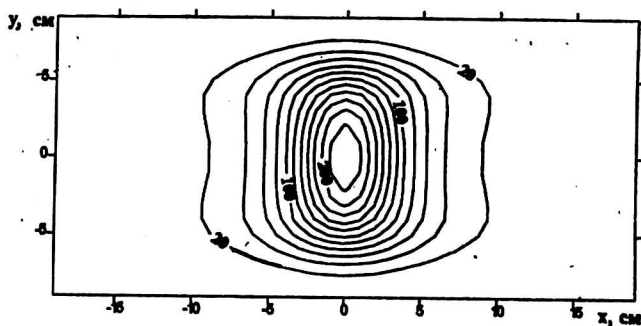
l — центр ячейки расположен на эмиссионной поверхности с координатами $x_{kn} = (0,3k - 12,15)$ см, $y_{kn} = (0,2l - 31)$ см.

Угол $\varphi_k = (0,3k - 12,15)/400$ учитывает изгиб ионно-оптической системы с радиусом кривизны 4 м по большому (вертикальному) направлению;

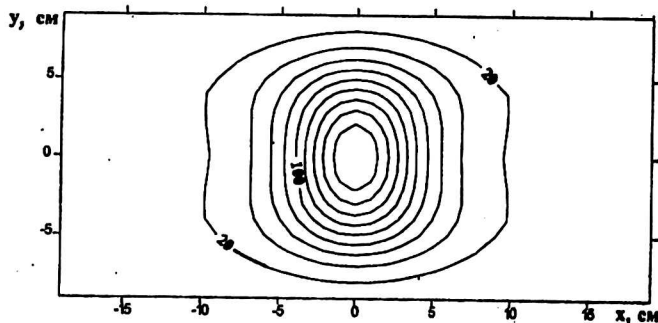
θ_{kn} — угол расходимости из рассчитанной плотности потока плазмы на эмиссионной поверхности [4].



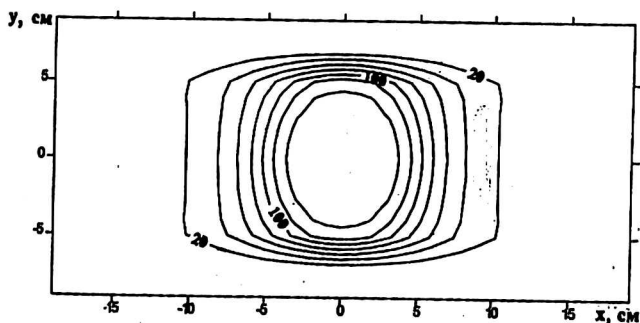
a



b



b



2

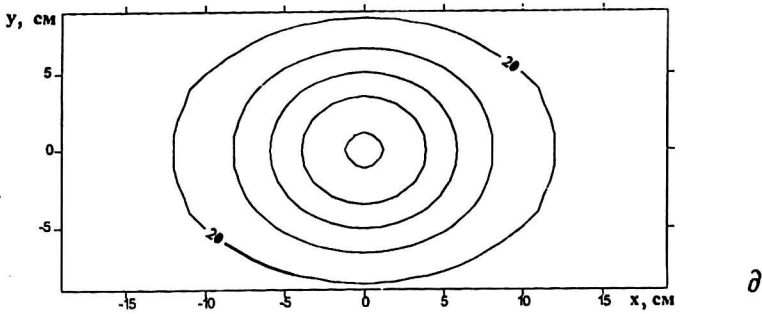


Рис. 3. Линии уровня плотности потока $j(x, y)$ (mA/cm^2) ионов в пучке на разных расстояниях от источника ионов:
а — $L = 1$ м; б — $L = 2$ м; в — $L = 3$ м; г — $L = 4$ м; д — $L = 5$ м

Линии уровня плотности потока ионов приведены на рисунках 3, а-д. Из расчетов следует, что до 3 м пучок по большому размеру сжимается, а затем расходится.

Экспериментальное исследование

На рис. 4 приведена схема экспериментов на установке ИК-50. Диагностическое оборудование размещалось на фланцах 2 так, что можно было измерять распределение плотности потока на расстояниях 1, 2 и 3 м от источника. Приведен также поперечный разрез камеры. Излучение, возникающее при взаимодействии пучка с газом в камере, регистрировалось через прозрачные фланцы 2. На рис. 5 приведены зависимости распределения интенсивности излучения света на расстояниях 1, 2 и 3 м от источника. При этом по показаниям болометра в центре пучка плотность потока составляла 200, 250 и 260 mA/cm^2 , соответственно.

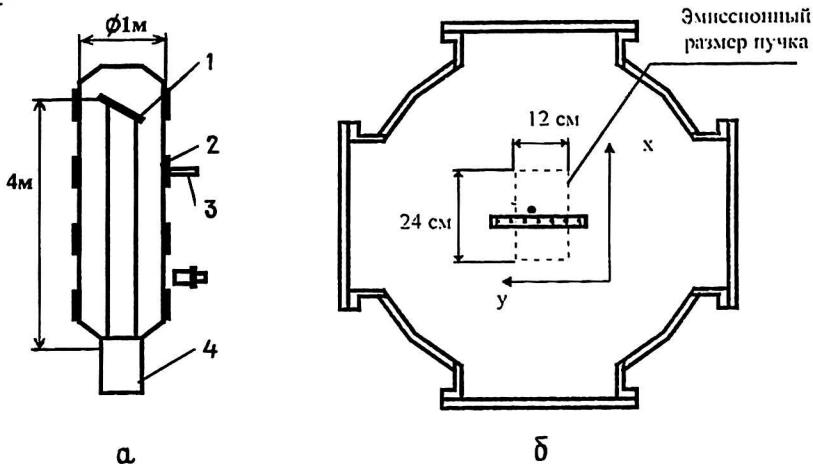


Рис. 4. Схема стенда ИК-50:

а — вид сверху; б — поперечный разрез вакуумной камеры;
1 — приемник пучка; 2 — прозрачные фланцы; 3 — регистратор излучения; 4 — ионный источник

На рис. 6 приведено распределение плотности потока, измеренное вторично-эмиссионным коллектором с входным отверстием диаметром 2 мм на расстоянии $L = 2$ м от ионного источника.

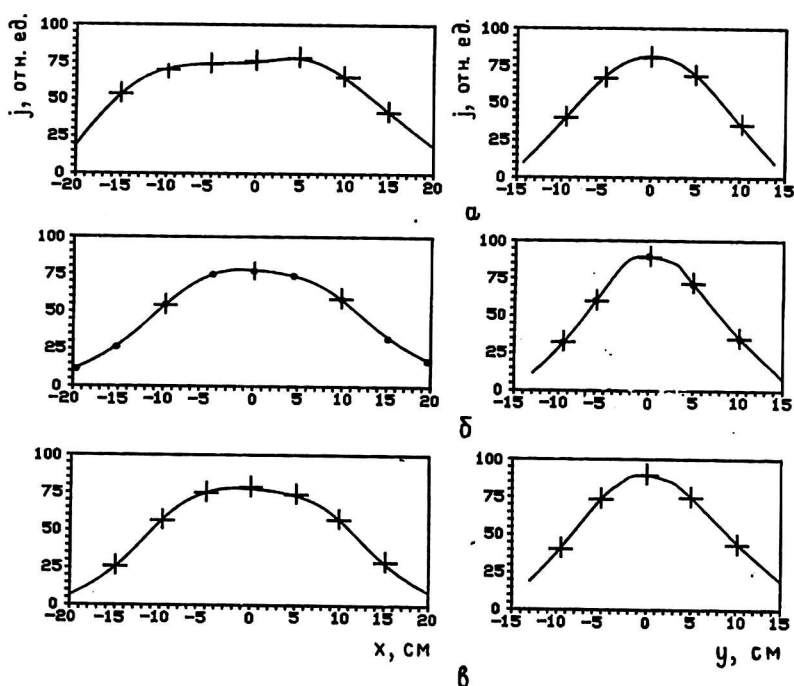


Рис. 5. Зависимость интенсивности излучения света, регистрируемого фотоприемниками, на разных расстояниях от источника: а — $L = 1$ м; б — $L = 2$ м; в — $L = 3$ м

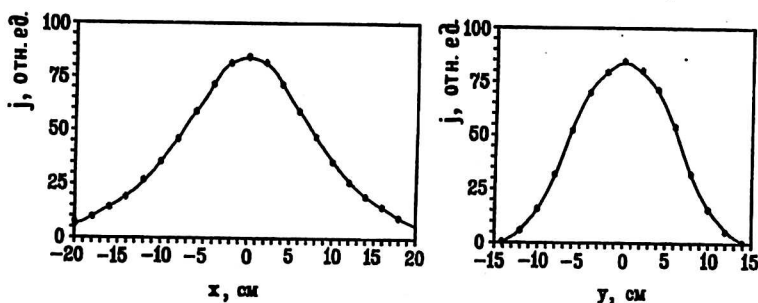


Рис. 6. Распределение плотности потока частиц пучка, измеренное на расстоянии 2 м от ионного источника вторично-эмиссионным коллектором

Таким образом, продемонстрирована геометрическая фокусировка плотного ионного пучка. Численная модель находится в соответствии с экспериментом. Расхождения можно объяснить влиянием пространственного заряда как на стадии формирования, так и нескомпенсированным пространственным зарядом в пучке.

Литература

1. Dimov G. I., Morozov I. I. // Rev. of Sci. Instrum. 1990, № 61(II). P. 401.
2. Davydenko I. I., Morozov I. I. // Ibid. 1997. № 68(6). P. 1007.

3. Fomel V. M., Tiunov M. A., Yakovlev V. P. // Preprint Budker INP 96-11, Novosibirsk, 1996.
4. Давыденко В. И., Росляков Г. В., Хавин Г. И. Исследование четырехэлектродной многощелевой системы формирования ионного пучка // ПТЭ. 1981. № 5. С. 21—22.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований (грант № 98-02-17815).*

RESEARCH OF TRANSPORTATION OF HIGH-CURRENT BEAMS OF IONS AND ATOMS FOR INJECTION IN END MIRROR MACHINE OF THE "AMBAL-M" AMBIPOLAR TRAP

I. I. Morozov

The Budker's institute for nuclear physics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of sciences, Novosibirsk, Russia

The results of experimental examination and numerical modelings of dependence of fluence and divergence of an ion beam from requirements of shaping of a plasma emissive surface are given in a sectional paper. The beams of deuterons and protons with energy up to 30 keV and current up to 50 A were studied.