

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ИОНОВ В СИСТЕМЕ ЭКСТРАКЦИИ ИОННОГО ИСТОЧНИКА**

**А. Е. Вальков, А. В. Долинский, Т. П. Руденко**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

Рассматриваются программа PTRACK, которая была разработана в ИЯИ НАН Украины (Киев), и результаты численных расчетов по оптимизации конфигурации экстрактора с помощью этой программы. Поскольку распределение электрического поля в области электродов является достаточно нелинейным, необходимо учитывать влияние абберационных эффектов на формирование пучка. Поэтому в программе был использован метод трассировки частиц, который является достаточно точным при моделировании поведения пучка заряженных частиц при низких энергиях. В этом случае уравнения движения для макрочастиц в программе решаются с высокой степенью точности.

**Введение**

При создании изотопных сепараторов важное значение имеют разрешающая сила установки, производительность и степень обогащения получаемого изотопа. Поэтому при разработке ионно-оптической системы (ИОС) сепаратора следует с высокой точностью производить согласование фазовых характеристик пучка на всех участках ионно-оптического тракта, начиная с ионного источника, где идет формирование начальных характеристик пучка. Решение проблемы согласования существенно упрощается, если потенциалы и конфигурация электродов экстрактора ионного источника максимально оптимизированы таким образом, чтобы угловые расхождения пучка на входе в ИОС были минимальными.

Экстрактор ионного источника обычно представляет собой систему электродов, геометрическая форма и потенциалы которых задают извлекающее и формирующее пучок электрическое поле. Фазовый объем пучка на выходе экстрактора должен быть согласован с аксептансом анализирующего магнита сепаратора. Эта задача решается с помощью согласующей секции, оптические элементы которой расположены между ионным источником и магнитом. Решение проблемы согласования существенно упростится, если оптимизировать потенциалы и конфигурацию электродов экстрактора. Желательно, чтобы на выходе экстрактора пучок имел характеристики, необходимые для согласования с ИОС. Эта проблема может быть исследована методом численного моделирования.

Компьютерная программа PTRACK позволяет моделировать формирование пучка ионов в экстрагирующей системе ионного источника. Алгоритм программы основан на трассировке макрочастиц с поверхности ионной плазмы в щели ионного источника в электрическом поле, рассчитанном для заданной конфигурации электро-

дов экстрактора. Если абберациями в системе нельзя пренебречь, то метод трассировки частиц является достаточно точным для моделирования поведения пучка заряженных частиц при низких энергиях. В этом случае уравнения движения для макрочастиц в программе решаются точно. Траекторию каждой макрочастицы можно рассматривать как канал, в котором текут заряженные частицы. Чтобы выполнить интегрирование для нахождения решения уравнения движения, должно быть известно распределение потенциала электрического поля. Для программы PTRACK карта распределения электрического поля рассчитывается численным методом с помощью программы POISSON [1]. В этой программе уравнение Лапласа решается на двумерной сетке с произвольным числом узлов.

Для моделирования процесса извлечения ионного пучка с высокой точностью в программу необходимо включить влияние пространственного заряда ионного пучка на расталкивание частиц, а также влияние формы плазменной поверхности на плазменном электроде источника. Это гарантирует задание правильных начальных условий для стартующих ионов. Необходимо также соблюдение условий получения наибольшего тока извлекаемого пучка при минимальной расходимости пучка. В версии 1.4 программы PTRACK решение этой задачи производится итеративно. Сначала считается, что граница плазмы (мениск) имеет плоскую форму и все ионы стартуют с одной и той же координатой в направлении продольной оси. Затем на некотором расстоянии  $d$  в программе анализируются параметры пучка – скорость частиц и плотность ионного тока. После этого в программе рассчитываются необходимые параметры формы мениска плазмы на плазменном электроде. Учитывая форму этого мениска, необходимо снова вернуться к программе POISSON и рассчитать карту распределения электрического поля. После это-

го, подставив обновленную карту поля в программу PTRACK, трассировка макрочастиц повторяется от границы плазмы до последнего электрода вытягивающей системы. Траектории макрочастиц можно наблюдать графически. Положение частиц на выходе экстрактора анализируется на фазовых диаграммах, которые могут быть построены в любой точке вдоль продольной координаты.

**Описание программы**

Электроды экстрактора должны иметь такую конфигурацию, при которой пучок имеет малую расходимость ( $\pm 30$  мрад) при максимальных интенсивностях. Формирование пучка с малой расходимостью является чрезвычайно важным для обеспечения эффективности проводки пучка, т.е. для получения максимальных токов на мишени. Точное формирование ионного пучка возможно только с применением численного моделирования формы плазменной оболочки и геометрии электродов экстрактора.

Как известно, пучок генерирует две разновидности поля: радиальное электрическое поле, обусловленное объемным зарядом, и азимутальное магнитное поле, вызываемое током пучка. Если плотность объемного заряда зависит только  $z$  и  $r$ , то электрическое поле описывается формулой

$$\vec{E}_{sp}(z, r) = \int_A \frac{Z_i e n_b(z, r)}{2\pi\epsilon_0} \frac{(r-c)}{|(r-c)|^2} dc dz. \quad (1)$$

Численные расчеты распределения электрического поля прямоугольного пучка, сделанные с помощью программы POISSON, показывают, что форма эквипотенциальных линий близка к эллиптической (рис. 1). Следовательно, можно утверждать, что величину напряженности электрического поля такого пучка можно рассчитывать с помощью формул, которые выводятся для случая пучка с эллиптической формой. Поскольку траектории ионов рассчитываются по отдельности для горизонтальной ( $x$ ) и вертикальной ( $y$ ) плоскостей, то напряжение электрического поля внутри пучка вдоль каждой из осей можно рассчитывать с помощью формул

$$E_{sp}(z, x) = \frac{j_p b_y x(z)}{\epsilon_0 (a_x + b_y) v_{z0}}; \quad (2)$$

$$E_{sp}(z, y) = \frac{j_p a_x y(z)}{\epsilon_0 (a_x + b_y) v_{z0}},$$

где

$$v_{z0} = \sqrt{\frac{2Z_i e U_0}{A_i m_p}}, \quad (3)$$

$j_p$  – плотность ионного тока;  $a_x$  – максимальная полуширина пучка в горизонтальной плоскости;  $b_y$  – максимальная полуширина пучка в вертикальной плоскости;  $\epsilon_0$  – постоянная вакуума;  $U_0$  – разность потенциалов между плазменным и вытягивающим электродами;  $v_z$  – скорость ионов.

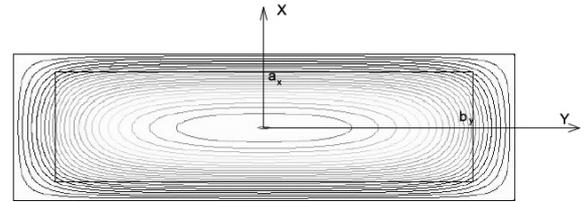


Рис. 1. Распределение электрического потенциала пучка, имеющего прямоугольную форму, сформированного щелью плазменного электрода.

Движение ионов описывается уравнениями

$$\ddot{z} A_i \gamma m_p = Z_i e E_0(z, r) (1 - \beta^2), \quad (4)$$

$$\ddot{r} A_i \gamma m_p = Z_i e E_0(z, r) (1 - \beta^2) - Z_i e E_{sp}(z, r) (1 - \eta - \beta^2),$$

где  $E_0$  – напряженность электрического поля, образованного системой электродов;  $E_{sp}$  – напряженность электрического поля за счет пространственного заряда пучка;  $\eta$  – коэффициент нейтрализации;  $\beta = v/c$  – средняя скорость ионов;  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ ;  $A_i$  и  $Z_i$  – атомная масса и заряд иона;  $m_p$  – масса протона;  $e$  – заряд электрона. Электрическое поле  $E_0$  определяется интерполяцией значений напряженности в ближайших узловых точках на карте распределения электрического поля, которая предварительно рассчитывается с помощью программы POISSON.

Движение интенсивных потоков заряженных частиц определяется электрическим потенциалом самосогласованного поля, являющегося суперпозицией потенциалов: создаваемого электродами и кулоновского, обусловленного объемным зарядом пучка. Формирование пучка в экстракторе сводится к нахождению самосогласованного решения для электрического потенциала между электродами и траекторий ионов. Электрическое поле вблизи щели плазменного электрода источника определяет положение эмитирующей плазменной границы, которая задает начальные условия для экстрагируемых ионов. Для оптимального решения задачи поверхность плазмы должна иметь определенную форму. Положение поверхности определяется параметрами плазмы, величиной вытягивающего напряжения

и конфигурацией электродов экстрактора. Это влияние приводит к тому, что если плотность ионного тока, поступающего на границу плазмы, равна плотности тока, определяемого законом Чайлда [2]

$$j_c = \frac{4\varepsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2Z_i e}{A_i m_p}} \frac{U_0^{3/2}}{d^2}, \quad (5)$$

то граница эмитирующей плазмы будет плоской, иначе граница будет иметь вогнутый или выпуклый мениск, в зависимости от соотношения между этими токами.

В программе PTRACK рассматривается плазменный ионный источник, из щели которого вытягивается пучок положительных ионов. В этой программе использован метод экстракции ионов с виртуальной плоскости, которая находится под тем же потенциалом, что и плазменный электрод. Сначала определяются параметры поверхности свободной плазмы – радиус мениска и смещение  $\Delta$  (рис. 2). Мениск влияет на кривизну эквипотенциальных линий электрического поля вблизи фокусирующего электрода. Определение этих параметров необходимо проводить итеративно, поскольку в зависимости от искривления поверхности плазмы (образования мениска) необходимо пересчитывать карту электрического поля в системе экстракции источника.

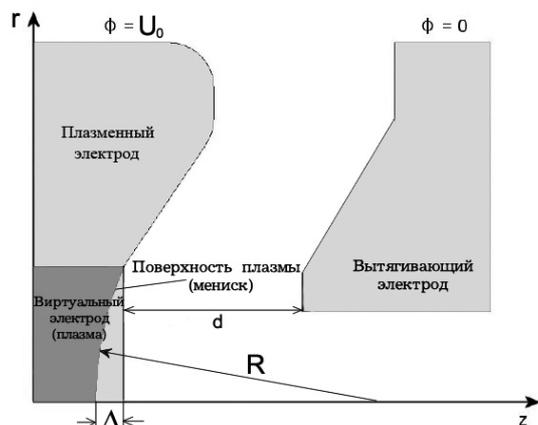


Рис. 2. Геометрия экстрагирующей системы ионного источника. Граница плазмы рассматривается как виртуальный электрод.

При первой итерации предполагается, что поверхность плазмы имеет плоскую форму. Для расчета карты электрического поля с помощью POISSON предполагается, что плазма является виртуальным электродом с потенциалом плазменного электрода, как это изображено на рис. 3. По программе PTRACK в этом поле производится расчет траекторий частиц, при этом одновременно идет анализ продольных скоростей частиц. Вследствие различия потенциалов электри-

ческого поля внутри пучка и вблизи его поверхности, скорость ионов (вдоль оси  $z$ ) будет различной для ионов, находящихся на разных расстояниях от центра пучка. Как правило, на оси скорость частиц выше, нежели у границы пучка. Следовательно, возникает неоднородный по скорости поток ионов, при этом передняя граница пучка имеет выпуклую форму (см. рис. 3). Согласно закону Чайлда (5), максимально возможный поток ионов достигается при однородном потоке частиц в пучке (одинаковой скорости). Для того чтобы скорость ионов (плотность тока для каждой макрочастицы) в пучке была одинаковой, согласно формуле (5) расстояние  $d$  для частиц в пучке необходимо подстраивать. В программе определяется максимальная и минимальная скорости ионов пучка ( $v_{max}$ ,  $v_{min}$ ). Исходя из этого, определяется максимальное смещение границы плазмы  $\Delta$  (см. рис. 3) по формуле

$$\Delta = d \left( \sqrt{\frac{v_{max}}{v_{min}}} - 1 \right). \quad (6)$$

Предполагая, что форма мениска является сферической, рассчитывается радиус этой сферы  $R$ . Зная эти параметры мениска, необходимо снова определить геометрию виртуального электрода. Вторая итерация расчета оптики экстрактора предполагает, что определяется новая карта распределения электрического поля с помощью программы POISSON, где виртуальный электрод является уже вогнутым (см. рис. 3). Подставив обновленную карту поля в PTRACK, производится повторный расчет траектории ионов пучка. Затем определяется, насколько однородным является полученный поток ионов. Если относительная скорость ионов на границе пучка и в центре больше 1 %, необходимо провести дополнительную корректировку мениска и повторить все расчеты заново. Такие итерации необходимо повторять до тех пор, пока скорости ионов будут отличаться не более чем на 1 %. В программе есть возможность визуально наблюдать, как передняя граница пучка при каждой итерации преобразуется из выпуклой границы в прямую. Результатом расчетов является распределение плотности пучка в фазовом пространстве.

Все расчеты проводятся с помощью двух программ: POISSIN и PTRACK (рис. 4). На схеме показано в какой последовательности необходимо проводить порядок расчета. Перед тем как произвести расчет в POISSON, необходимо ввести геометрию и параметры экстрактора в файл AUTOMESHINPUT.AM по определенному формату. Эти же данные необходимо продублировать в файлах input.txt и geometry.txt, которые

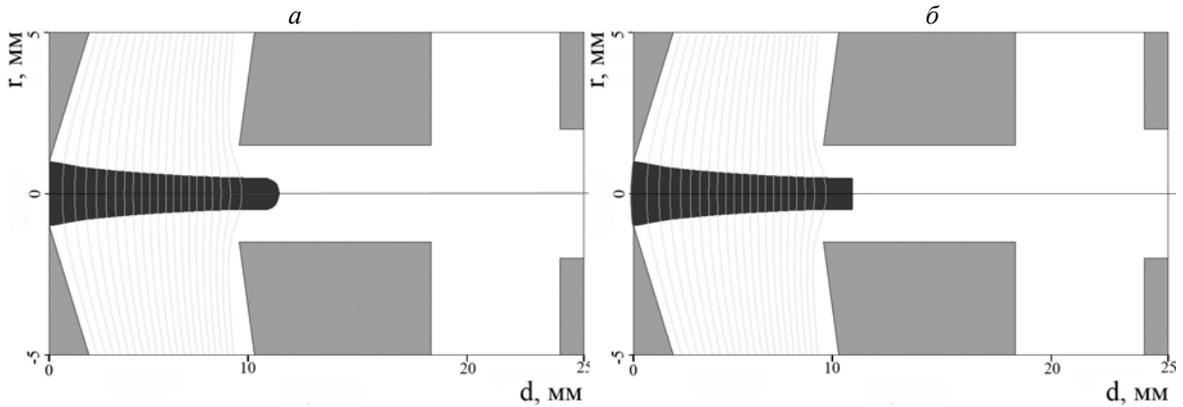


Рис. 3. Вид пучка в экстракторе ионного источника:  
 а - при первой итерации, когда мениск прямой; б - при последней итерации, мениск вогнутый.

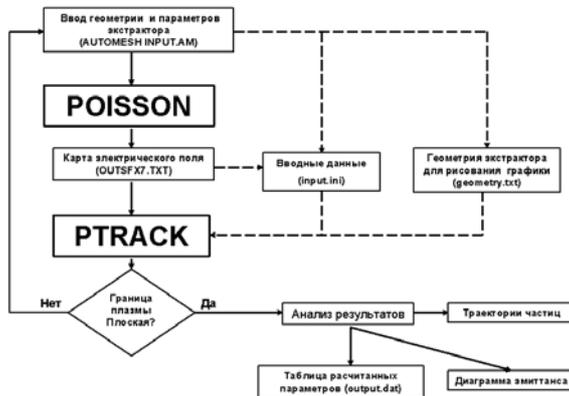


Рис. 4. Блок-схема проведения расчетов.

являются вспомогательными вводными данными для программы PTRACK. После этого программой POISSON производится расчет карты электрического поля, которая автоматически записывается в файл OUTSF7.TXT. С помощью программы PTRACK проходит расчет траекторий частиц от плазменного электрода до выхода экстрактора. Данные о границе плазмы (мениска) записываются в файл menisk.dat. В этом файле записываются параметры мениска. В зависимости от того, какая граница пучка (плазмы) (плоская или выгнутая) формируется, необходимо принять решение об изменении формы плазменного виртуального электрода. Если граница плазмы сильно выгнутая, то необходимо увеличить кривизну мениска и наоборот. После этого расчеты необходимо повторить. Если после повторных расчетов граница плазмы плоская, можно переходить к анализу полученных данных. Результаты расчетов приводятся в виде таблиц, графиков и диаграмм.

### Результаты расчетов

Проведены систематические расчеты ионно-оптических свойств трехэлектродного экстрактора источника ионов по программе PTRACK для горизонтального и вертикального движений.

Для выбора оптимального расстояния  $d$  между плазменным и вытягивающим электродами проведены расчеты для нескольких геометрий экстрактора, при которых значения  $d$  выбирались в пределах от 5 до 13 мм. Потенциал на плазменном электроде 40 кВ и на среднем 3 кВ. Результаты расчетов для горизонтального и вертикального движений практически совпали – и в том, и в других случаях наименьшую угловую расходимость пучков имеет при  $d = 8,7$  мм.

Для примера на рис. 5 показаны результаты расчетов для вертикального движения.

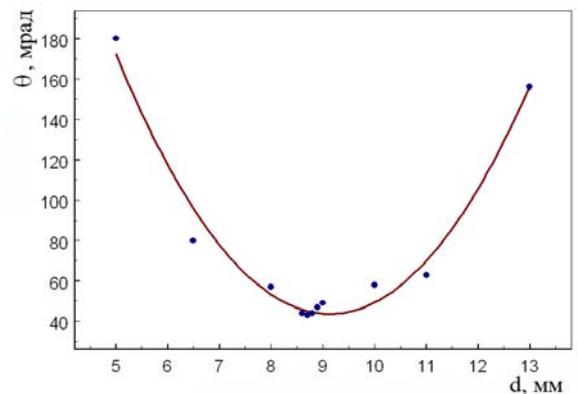


Рис. 5. Зависимость максимального углового расширения пучка на выходе экстрактора в зависимости от расстояния  $d$  между плазменным и вытягивающим электродами в вертикальной плоскости.

Для этого оптимального значения  $d$  на рис. 6 (горизонтальное движение) и рис. 7 (вертикальное движение) показаны расчетные траектории для 5000 ионов при прохождении через экстрактор.

На рис. 8 и рис. 9 приведены фазовые диаграммы пучка на выходе из экстрактора для горизонтального и вертикального движений соответственно.

Из рисунков видно, что основной вклад в величину эффективного эмиттанса вносят aberrации пучка. Эти aberrации ИОС вызваны по-

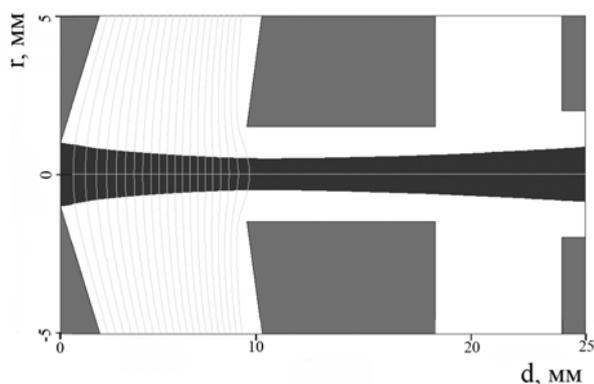


Рис. 6. Ионный пучок в горизонтальной плоскости, состоящий из 5000 траекторий.

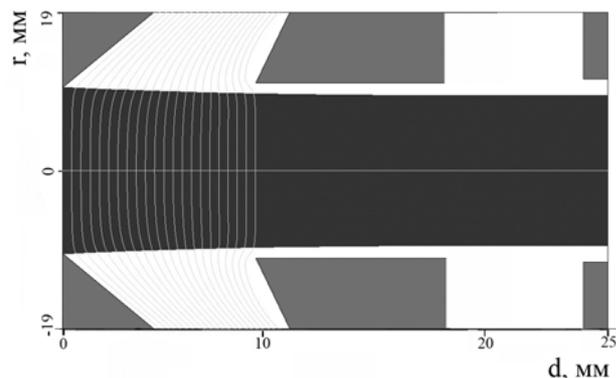


Рис. 7. Ионный пучок в вертикальной плоскости, состоящий из 5000 траекторий.

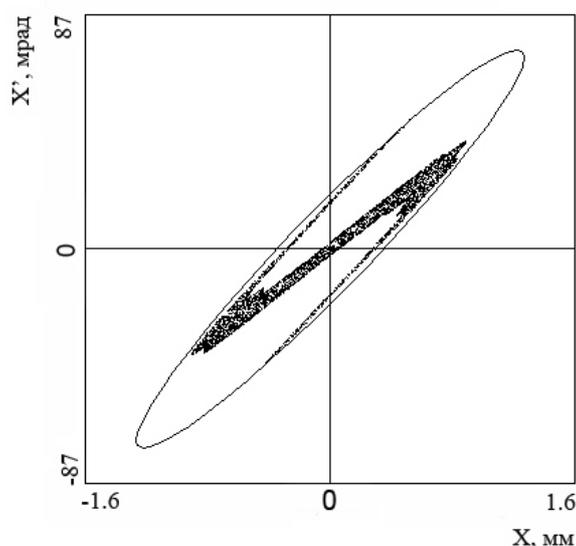


Рис. 8. Диаграмма эмиттанса пучка на выходе экстрактора горизонтальной плоскости. Сплошная линия – эффективный эмиттанс, в пределах которого находятся частицы.

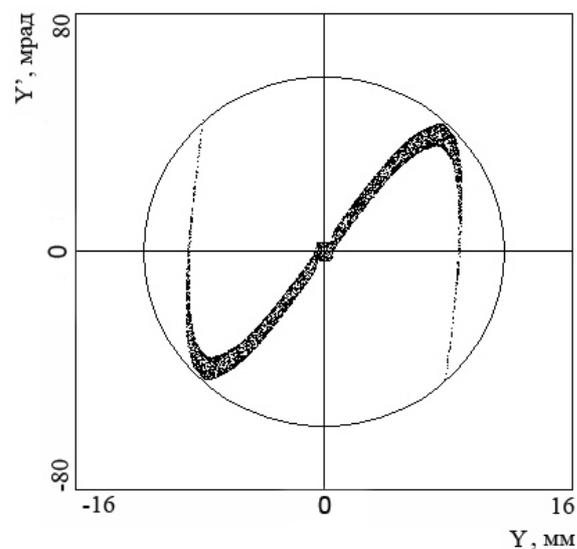


Рис. 9. Диаграмма эмиттанса пучка на выходе экстрактора в вертикальной плоскости. Сплошная линия – эффективный эмиттанс, в пределах которого находятся частицы.

перечными нелинейностями электрического поля: эквипотенциальные линии поля вблизи границ плазменного электрода изменяются как третья и более высокая степень радиуса пучка; т. е. линии эквипотенциалов имеют вблизи краев щели источника сильную кривизну, за счет чего в этой области происходит более сильная фокусировка. И наоборот, частицы, которые ближе к центру щели, испытывают более слабую фокусировку.

Для примера на рис. 10 показаны горизонтальные траектории 11 частиц. Видно, что частицы, стартующие вблизи краев плазменного электрода, отклоняются сильнее, чем те, которые начинают свое движение ближе к центру.

В последующих расчетах учитывалось искривление границы плазмы. Согласно расчетам, максимальное значение отклонения границы плазмы составляет 0,034 мм, радиус кривизны мениска – 15 мм. С учетом мениска фазовая диа-

грамма пучка на выходе экстрактора имеет вид, показанный на рис. 11.

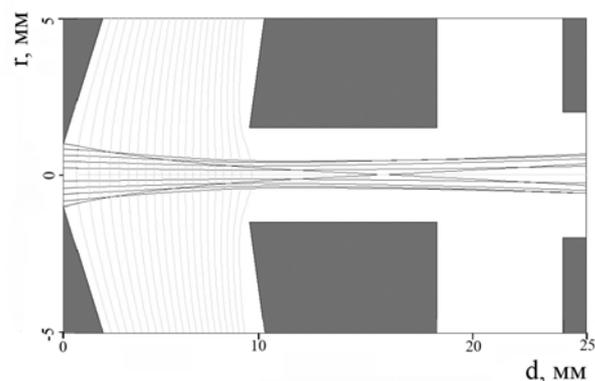


Рис. 10. Траектории 11 макрочастиц в горизонтальной плоскости экстрактора.

Из рис. 11 видно, что максимальное значение углового расхождения пучка увеличивается (для сравнения см. рис. 8). Однако это увеличение

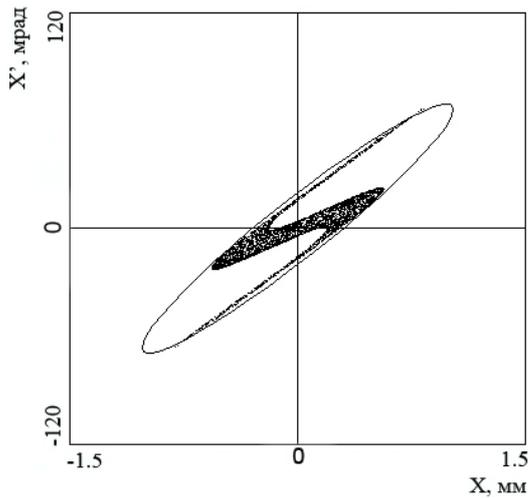


Рис. 11. Эффективный эмиттанс ионного пучка на выходе экстрактора в горизонтальной плоскости с учетом мениска плазмы.

происходит за счет aberrаций пучка. Основная часть пучка испытывает дополнительное фокусирующее действие, что приводит к тому, что величина эффективного эмиттанса уменьшается.

На рис. 12 показано, как изменяется максимальное значение углового расхождения пучка в зависимости от вытягивающего напряжения с учетом мениска плазмы. Видно, что с увеличением потенциала aberrационные отклонения частиц уменьшаются. При этом величина эффективного эмиттанса практически не изменяется.

### Заключение

Разработанная компьютерная программа дает возможность проводить расчеты характеристик пучка при его прохождении через экстрактор ионного источника. Результатами расчета про-

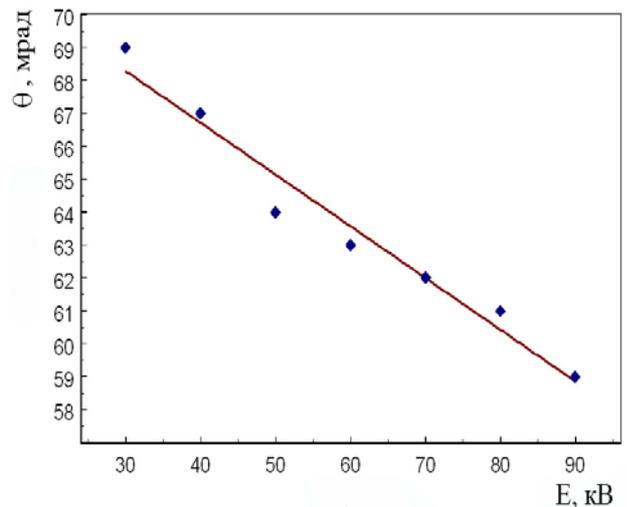


Рис. 12. Максимальное угловое расхождение пучка на выходе экстрактора в зависимости от вытягивающего напряжения.

граммы являются величина эмиттанса и параметры Твисса на выходе экстрактора. Расчеты траекторий ионов проводятся с использованием предварительно рассчитанной двухмерной карты электрического поля. При этом учитываются влияние объемного заряда и форма границы плазмы в источнике.

Приведенные в работе результаты расчетов экстрактора ионного источника показывают, что aberrации дают существенный вклад при формировании ионного пучка на выходе. Необходимо дальнейшее усовершенствование программы таким образом, чтобы можно было проводить расчеты в трехмерной геометрии экстрактора. Это позволит с большей достоверностью оптимизировать форму электродов и определять параметры эмиттанса на выходе источника.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. De Jong M. S., Adams F. P. AECL internal report "Seafish, A 2-Dimensional Complex Helmholtz Equation Solver".

### МОДЕЛЮВАННЯ ТРАЕКТОРИЙ ІОНІВ У СИСТЕМІ ЕКСТРАКЦІЇ ІОННОГО ДЖЕРЕЛА

О. Є. Вальков, О. В. Долинський, Т. П. Руденко

Розглядаються програма PTRACK, розроблена в ІЯД НАН України (Київ), та результати числових розрахунків по оптимізації конфігурації екстрактора, що проводились за допомогою цієї програми. Оскільки розподіл електричного поля в області електродів є досить нелінійним, необхідно враховувати вплив aberrаційних ефектів на формування пучка. Тому в програмі було використано метод траєкування частинок, що є досить точним при моделюванні поведінки пучка заряджених частинок при низьких енергіях. У цьому випадку рівняння руху для макрочастинок у програмі розв'язуються з високим рівнем точності.

**MODELING OF IONS TRAJECTORIES IN THE SYSTEM  
OF IONS SOURCE EXTRACTION**

**A. E. Valkov, A. V. Dolinskii, T. P. Rudenko**

The PTRACK code, which has been designed at KINR, National Academy of Sciences of Ukraine, is considered. Results of numerical calculations performed by the PTRACK code for optimization of the extractor geometry are discussed. Since the electric field distribution near electrodes is non-linear, one needs to take into account the influence aberration effects on the beam parameters. Therefore, we use a method of particles tracking, which is rather precise for modeling of the beam behavior of the charged particles at low energies. In this case, the equation of motion for macro-particles in the PTRACK code is solved with high accuracy.

Поступила в редакцию 17.04.06,  
после доработки – 17.10.06.