

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

9-88-533

Ш.Бири, С.Л.Богомолов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ  
ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Направлено в "Журнал технической физики"

1988



Эта задача решается методом, описанным в работе /3/. Решение ищем в виде

$$U(R,Z) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} U(Z') d\alpha, \quad /2/$$

где  $Z' = Z + i \cdot R \cdot \cos\alpha$ ;  $R$  - расстояние от оси пучка;  $dU(R,Z)/dR = 0$  при  $R = 0$ . Подставив выражение /1/ в /2/ и, выполнив интегрирование, получим

$$U(R,Z) = U_c \cdot \cos(Z^*) \cdot I_0(R^*) + U_L \cdot (1 - Z/L), \quad /3/$$

где  $R^* = (\pi/d) \cdot R$ ;  $I_0(R^*)$  - модифицированная функция Бесселя 0-го порядка.

Пусть  $R_0$  - радиус апертуры электродов ИОС /в общем случае электроды могут иметь отличающиеся друг от друга апертуры/. Источник ионов находится под потенциалом  $U_0$ , следовательно,  $U(R_0, 0) = U_0$ .

Подставляя значение  $U(R_0, 0)$  в уравнение /3/, получим

$$U_L = U_0 - U_c \cdot I_0(R_0^*) \quad /4/$$

$$(R_0^* = (\pi/d) \cdot R_0).$$

В выражении /3/ для  $U(R,Z)$  остаются неизвестными два параметра  $N$  и  $U_c$ . Эти величины могут принимать следующие значения:  $N$  - целое число больше двух,  $U_c$  может изменяться от 0 до некоторого максимального значения  $U_{см}$ , определяемого из уравнения /4/ при  $U_L = 0$  /в этом случае распределение потенциала косинусоидальное/.

#### РАСЧЕТ ФОРМЫ И ПОТЕНЦИАЛОВ ЭЛЕКТРОДОВ

Задача заключается в нахождении геометрии электродов и их потенциалов, которые создают распределение потенциала /3/. Расчет ведем по методу, описанному в /3/.

Возьмем число электродов, равное  $N$ , хотя это не является единственной возможностью. Полагаем, что первый электрод ИОС - это выходной электрод ионного источника,  $N$ -й электрод - последний электрод ИОС, находящийся под нулевым потенциалом.

Пусть внутренние поверхности электродов проходят через точки с координатами  $(R_0, k \cdot d)$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots, N-2$  / $k = 0$  соответствует первому электроду,  $k = N-2$  - предпоследнему электроду ИОС/. Потенциалы точек  $(R_0, k \cdot d)$  будут являться потенциалами электродов. Из уравнения /3/ получим:

$$U_k = (-1)^k \cdot U_c \cdot I_0(R_0^*) + U_L \cdot (1 - k \cdot d/L), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-2; \quad /5/$$

Последний электрод ИОС проходит через точку  $(R_0, (N-1,5) \cdot d)$ , и его потенциал равен 0.

Форма электродов совпадает с эквипотенциальными поверхностями, проходящими через точки  $(R_0, k \cdot d)$ . Из уравнения /3/ получаем трансцендентные уравнения, описывающие геометрию электродов:

$$\cos(Z^*) = (F \cdot Z^* + G) / I_0(R^*),$$

где

$$F = (U_0 - U_c \cdot I_0(R_0^*)) / (L \cdot U_c),$$

$$G = (-1)^k \cdot I_0(R_0^*) + k \cdot d \cdot (U_0 - U_c \cdot I_0(R_0^*)) / (L \cdot U_c)$$

при  $k = 0, 1, 2, \dots, N-2$ ,

$$G = k \cdot d \cdot (U_0 - U_c \cdot I_0(R_0^*)) / (L \cdot U_c) \quad \text{при } k = N-1, 5.$$

Используя заданные величины  $U_0, R_0, L$  и выбирая  $U_c, N$ , находим геометрию электродов из уравнений /6/, которые решаем итерационным методом с помощью программы, поставленной на ПЭВМ "Правец-16".

На рис.2 показана геометрия ИОС, рассчитанная описанным выше способом.

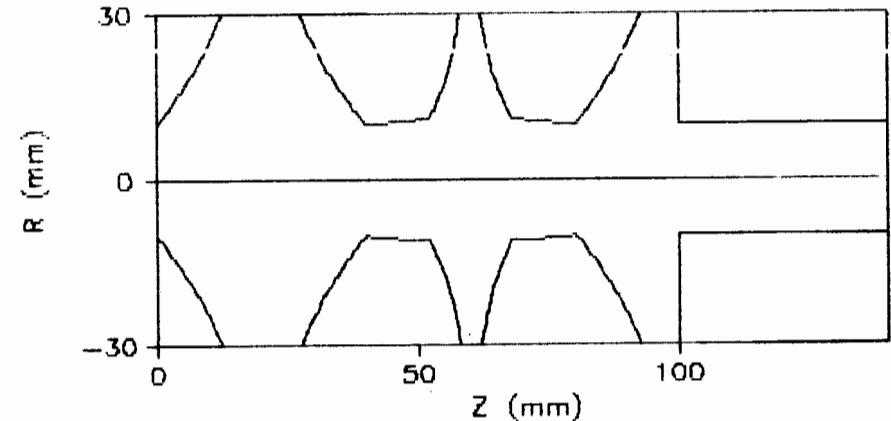


Рис.2. Ионно-оптическая система.  $L = 140$  мм,  $N = 4$ ,  $R_0 = 10$  мм,  $U_c = 0,25 \cdot U_{см}$ ,  $U_0 = 15$  кВ.

#### ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОС НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЧКА

Влияние параметров  $U_c$  и  $N$  на траектории частиц рассматривалось с помощью программы ELENIS /4/. Программа рассчитывает распределение потенциала в системе аксиально-симметричных электро-

дов с заданной геометрией и потенциалами, а также траектории частиц. Уравнение Лапласа решается на основе метода конечных разностей и метода верхней релаксации. Для вычисления траекторий частиц с учетом пространственного заряда используется квазигидродинамическое приближение. Поток заряженных частиц разбивается на некоторое конечное число трубок для вычисления кулоновских поправок. Плотность ионного тока в плоскости, перпендикулярной пучку, постоянна. Уравнение траекторий решается методом Эйлера с уточнением.

Для упрощения расчетов предполагаем, что поверхность эмиттера является плоской, и ее положение совпадает с эквипотенциальной плоскостью в непосредственной близости от эмиссионного отверстия ионного источника. Ионы эмиттируются в направлении, перпендикулярном плоскости эмиттера. Влияние тепловых скоростей ионов не учитывается.

Программа ELENIS работает на ЭВМ БЭСМ-6, данные для расчета, содержащие геометрию и потенциалы электродов, готовились в виде файла на ПЭВМ "Правец-16" и передавались на БЭСМ-6 по терминальной сети. Результаты расчетов принимались на "Правец-16", где проводилось их редактирование и представление в виде графиков и таблиц.

Исходные данные для расчета:

$L = 60-140$  мм /в зависимости от числа электродов/;

$R_0 = 10$  мм;

$\Lambda/q - 4/\Lambda$  - атомная масса,  $q$  - заряд иона в единицах элементарного заряда/.

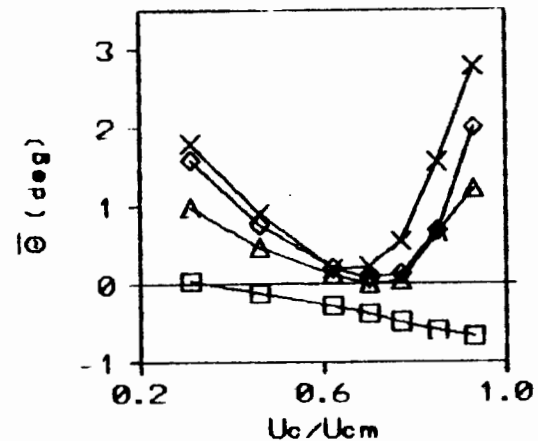
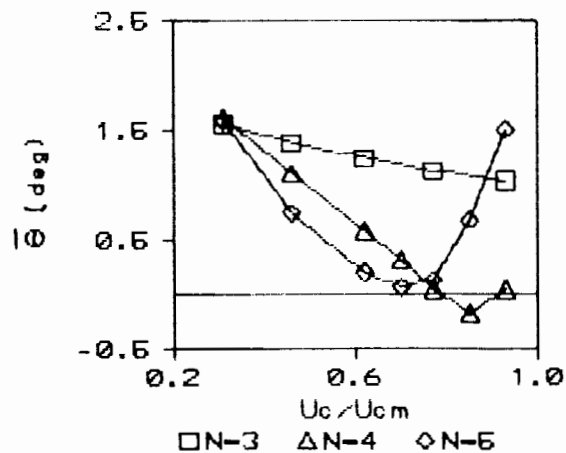
Ток пучка  $i = 0,2-1$  мА.

Определялся угол  $\bar{\theta}$ , который образует траектория частицы с оптической осью системы после прохождения ИОС. Из расчетов

траекторий 10 частиц определялся средний угол  $\bar{\theta}$ , который будем считать критерием качества пучка  $\bar{\theta} > 0$  соответствует расходящемуся пучку,  $\bar{\theta} < 0$  - сходящемуся/.

На рис.3 представлена зависимость  $\bar{\theta}$  от  $U_c/U_{cm}$  при  $N = 3,4,5$ .

Рис.3. Зависимость  $\bar{\theta}$  от  $U_c/U_{cm}$  при различных значениях параметра  $N$  /ток пучка  $0,5$  мА/.



$\square I=0$   $\Delta I=0.2$   $\diamond I=0.5$   $\times I=1$  мА

$0,6/U_{cm}$ . Следует также иметь в виду, что увеличение  $N$  ведет к усложнению системы.

На рис.4 представлены зависимости  $\bar{\theta}$  от  $U_c/U_{cm}$  для различных токов пучка. Из рисунка видно влияние пространственного заряда на траектории частиц.

Теперь предположим, что расстояние между электродами ИОС неодинаково, как это было до сих пор, а является, например, линейной функцией расстояния от источника. Тогда вместо  $d$  в уравнениях следует использовать  $d^* = d + t \cdot Z$ , где  $t$  - постоянная величина. Уравнения при этом изменяются, но ход расчетов остается прежним. При  $t$ , отличном от 0, изменяется форма электродов. Влияние параметра  $t$  на траектории частиц также рассматривалось с помощью программы ELENIS. Расчеты показывают, что при заданных значениях  $U_0, L, N, d$  всегда можно найти величину  $t$ , обеспечивающую получение минимальной расходимости пучка. В большинстве случаев значение  $t$  находится в диапазоне  $-0,2 - 0,2$ , и почти всегда отрицательно.

#### СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ДРУГИХ РАБОТ

Проведено сравнение ИОС, рассчитанной описанным методом, с экспериментальными результатами работ<sup>5-7/</sup> и с данными обзорной работы<sup>8/</sup>. Процедура сравнения поясняется рис.5.

По известной геометрии электродов и их потенциалам с помощью программы ELENIS рассчитывалось распределение потенциала на оси системы. Затем определялись параметры уравнения /3/  $U_c, N, t$ , дающие наилучшее приближение к рассчитанному осевому потенциалу /в уравнение /3/ вместо величины  $d$  входит величина  $d^*$ /.

Рис.4. Зависимость  $\bar{\theta}$  от  $U_c/U_{cm}$  при различных токах пучка / $N=5$ /.

Из рисунка видно, что с увеличением  $N$  возможно получение меньшей угловой расходимости. При  $N = 4$  и  $N = 5$  с ростом  $U_c$  сначала происходит уменьшение угловой расходимости, а затем ее рост. Во избежание перефокусировки необходимо выбирать  $U_c = /0,3-$

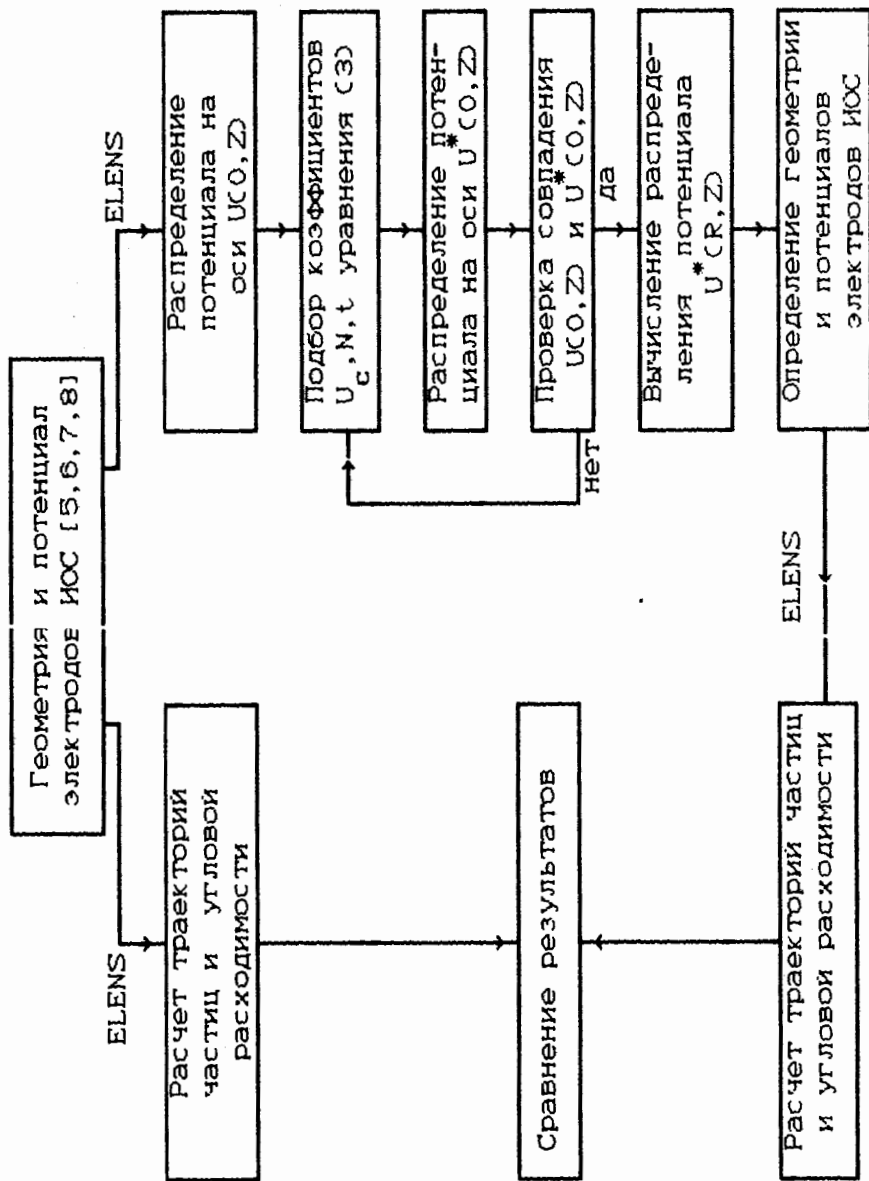


Рис.5. Блок-схема процедуры сравнения ИОС, рассчитанных различными методами.

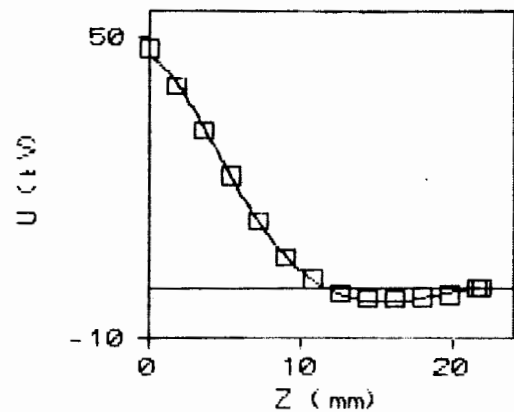


Рис.6. Распределение потенциала на оси ИОС<sup>/7/</sup> (.....) и распределение, рассчитанное в данной работе (□).

Для рассмотренных систем значения этих параметров находятся в следующих диапазонах:

$$U_c = (0,2-0,4) \cdot U_{cm}$$

$$t = (-0,2 - 0,25)$$

$$N = 3-5.$$

На рис.6 в качестве примера показано распределение потенциала на оси для ИОС, описанной в работе<sup>/7/</sup>, и распределение потенциала, описываемое уравнением /3/ при значениях параметров уравнения  $U_c = 0,35 \cdot U_{cm}$ ,  $t = 0,25$ ,  $N = 3$ .

С использованием этих параметров найдены форма и потенциалы электродов ИОС. С помощью программы ELENIS проведен расчет расходимости ионного пучка в ИОС<sup>/5-8/</sup> и в ИОС, построенной исходя из распределения осевого потенциала. Расчет показал, что для обеих ИОС расходимость оказывается практически одинаковой в случае параксиальных пучков. Следует отметить, что при совпадении осевых потенциалов обеих ИОС, число электродов, их форма и потенциалы в случае построения ИОС описанным методом могут отличаться от ИОС, описанных в литературе<sup>/5-8/</sup>.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено построение ИОС с распределением потенциала на оси, состоящим из линейного и косинусоидального членов. Из распределения осевого потенциала определены форма электродов и их потенциалы. Рассмотрено влияние параметров уравнения осевого потенциала на расходимость пучка с учетом пространственного заряда. Определены оптимальные значения свободных параметров уравнения для получения минимальной угловой расходимости пучка.

Сравнением с известными из литературы ИОС показано, что предложенным методом можно построить ИОС, не прибегая к большому объему численных расчетов.

Авторы благодарят Н.И.Тарантина за ряд полезных замечаний, высказанных при рецензировании работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дитрих Ю. ОИЯИ, 9-80-495, Дубна, 1980.
2. Тарантин Н.И. ОИЯИ, P9-88-149, Дубна, 1988.
3. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. Л.: Энергия, 1972.
4. Hornsby J.S. CERN, 6600 Computer, Program Library, 1965.
5. Siebenlist F. NIM, 1987, v.A256, No.2, p.207.
6. Green T.S. IEEE Trans.Nucl. Sci., 1976, v.NS-23, No.2, p.918.
7. Keller R. et al. Vacuum, 1984, v.34, p.31.
8. Keller R. Report GSI-87-76, GSI Darmstadt, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел  
15 июля 1988 года.

Бири Ш., Богомолов С.Л. 9-88-533  
Математическое моделирование аксиально-  
симметричной ионно-оптической системы

Проведено моделирование электростатической аксиально-симметричной ионно-оптической системы /ИОС/ для формирования ионного пучка, извлекаемого из ионного источника. Рассмотрено построение ИОС с распределением потенциала на оси, состоящим из линейного и косинусоидального членов. Из заданного распределения потенциала на оси определена форма электродов и их потенциалы. Проверка свойств построенной таким образом ИОС проведена с помощью программы ELENs. Сравнение с известными из литературы ИОС показало, что построенные предложенным методом ИОС обеспечивают формирование пучка практически такого же качества. Описанный в работе метод построения ИОС не требует проведения большого объема численных расчетов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.  
Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод Л.В.Пашкевич

Biri S.; Bogomolov S.L. 9-88-533  
Simulation of an Axially Symmetric Ion-Optical  
System

The simulation of an electrostatic axially symmetric ion-optical system designed for forming an ion beam extracted from an ion source has been carried out. The design of an ion-optical system with an axial potential distribution consisting of linear and cosine terms is considered. The electrode shape and potentials are determined from the given potential distribution on the axis. The properties of the ion-optical system designed in this manner have been verified using the code ELENs. It is shown that the ion-optical systems constructed by the proposed method practically provide the same quality of the beam as do other systems known from the literature. The proposed method of constructing an ion-optical system does not require bulky numerical calculations.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988