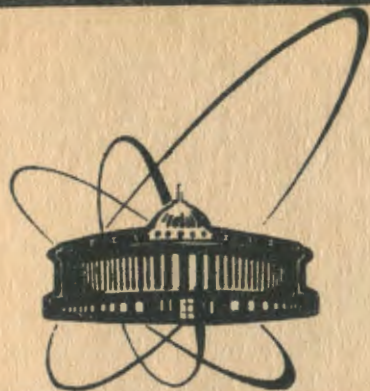


90-187



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

♀

Б643

P9-90-187

Ш.Бири, С.Л.Богомолов, И.Кош, А.Шандор

РАСЧЕТ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ИНЖЕКТОРА МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

1990

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для системы внешней инжекции пучка в циклотрон У-200 ^{/1/} создан инжектор на основе дугового источника многозарядных ионов ^{/2/}. Источник многозарядных ионов работает в магнитном поле, создаваемом компактным электромагнитом.

Для вывода ионного пучка из камеры электромагнита на ось ионопровода обычно используются два метода: применение скрещенных электрического и магнитного полей ^{/3/} либо вывод пучка после поворота в магнитном поле на угол больше 90° ^{/4/}. Нами выбран вариант с использованием скрещенных электрического и магнитного полей, поскольку при таком способе вывода величины A/Z энергии ионов и магнитного поля электромагнита инжектора не связаны друг с другом условием постоянства траектории.

Схема инжектора с ионно-оптической системой, обеспечивающей извлечение ионов из источника, начальное формирование пучка и компенсацию отклоняющего действия магнитного поля, и элементами транспортировки пучка показана на рис.1. На рисунке показано также распределение магнитного поля вдоль направления движения пучка. Для извлечения и начального формирования ионного пучка из источника использована трехэлектродная система "ускорение-замедление", аналогичная описанной в работе ^{/5/}. Электрическое поле, компенсирующее действие магнитного поля, создается двумя пластинами, одна из которых имеет положительный потенциал относительно земли, другая - отрицательный (электростатический компенсатор).

Целью данной работы является определение параметров компенсирующего электрического поля, обеспечивающего вывод ионного пучка из камеры электромагнита по оси ионопровода.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПЕНСИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Как известно, заряженная частица, влетающая в область взаимно перпендикулярных электрического и магнитного полей в направлении, перпендикулярном направлениям электрического и магнитного полей

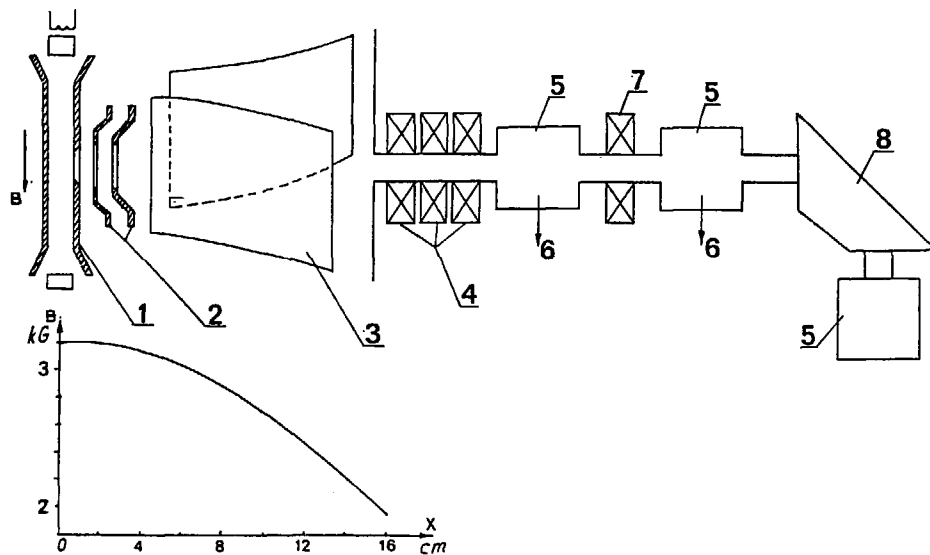


Рис.1. Схема инжектора:

- 1 - ионный источник; 2 - электроды извлекающей оптики;
- 3 - пластины электростатического компенсатора;
- 4 - триплет квадрупольных линз; 5 - блок диагностики;
- 6 - вакуумная откачка; 7 - магнитная линза;
- 8 - анализирующий магнит.

будет двигаться прямолинейно при выполнении равенства

$$E/V = K(Z \cdot U/A)^{1/2}, \quad (1)$$

где E - напряженность электрического поля, V - напряженность магнитного поля, Z - заряд иона в единицах элементарного заряда, A - атомная масса иона, U - энергия иона на единицу заряда, K - численный коэффициент.

При изменении магнитного поля вдоль траектории частицы электрическое поле должно меняться таким образом, чтобы обеспечивалось постоянство отношения E/V . Таким образом, по известному распределению магнитного поля можно найти профиль пластин компенсатора, создающего электрическое поле ^{1/3/}.

Расчет траекторий движения ионов в ионно-оптической системе, содержащей такой компенсатор, по программе ELENS ^{1/6/} (подробнее об адаптации программы ELENS для решения данной задачи будет сказано ниже) показал, что на выходе из компенсатора пучок имеет значительное смещение относительно оси ионопровода либо большой угол отклонения от оси. На рис.2 показаны геометрия ионно-оптической системы инжектора, профиль пластин компенсатора которой рассчитан по выражению (1), и траектории ионов с $A/Z = 4$. На рис.3 показана зависимость среднего смещения пучка от оси И.О.С. и среднего угла отклонения пучка от оси на входе в ионопровод от потенциала пластин компенсатора (абсолютные величины потенциалов пластин одинаковы). Значения среднего смещения и среднего угла отклонения рассчитывались по 11 траекториям. Из рисунков 2 и 3 видно, что в данной геометрии электродов невозможно получить пучок, имеющий нулевое смещение и нулевое отклонение от оси. Такое поведение пучка обусловлено тем, что на входе в компенсатор положение и направление движения частицы не совпадает с осью И.О.С. из-за отклоняющего действия магнитного поля на участке извлечения и начального формирования ионного пучка.

Таким образом, задача сводится к нахождению такого электрического поля, которое при заданной длине И.О.С. L и заданном положении и направлении движения частицы на входе в компенсатор обеспечивает вывод частицы на ось ионопровода.

Рассмотрим движение частицы в медианной плоскости в системе координат $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$. В этой плоскости магнитное и электрическое

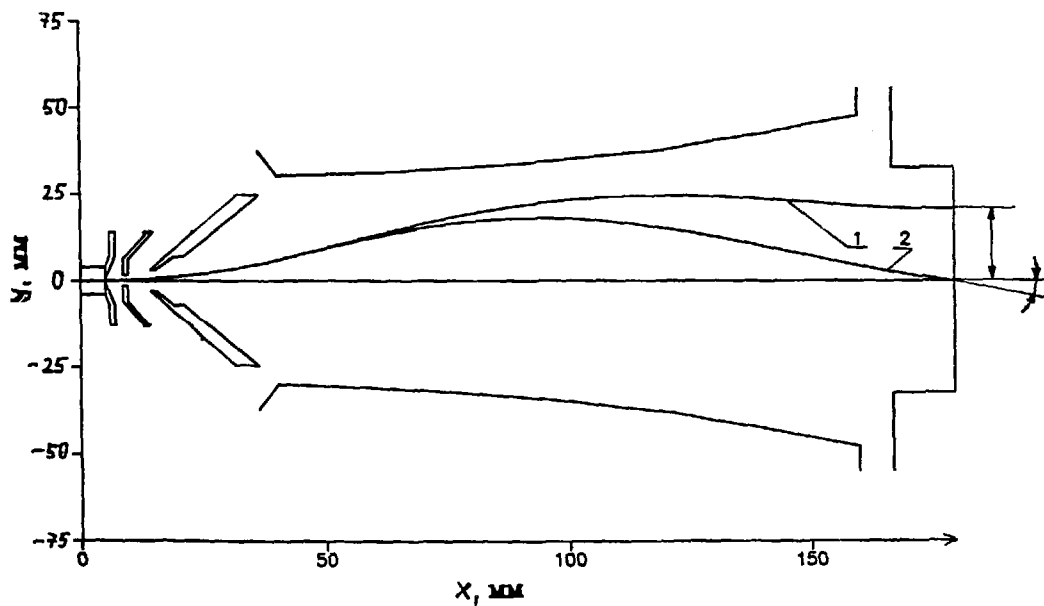


Рис.2. Геометрия И.О.С. и траектории частиц с $A/Z = 4$ при различных потенциалах на пластинах компенсатора, 1 - ± 10 кВ, 2 - ± 12 кВ, потенциал инжекции 15 кВ, потенциал вытягивающего электрода -5 кВ.

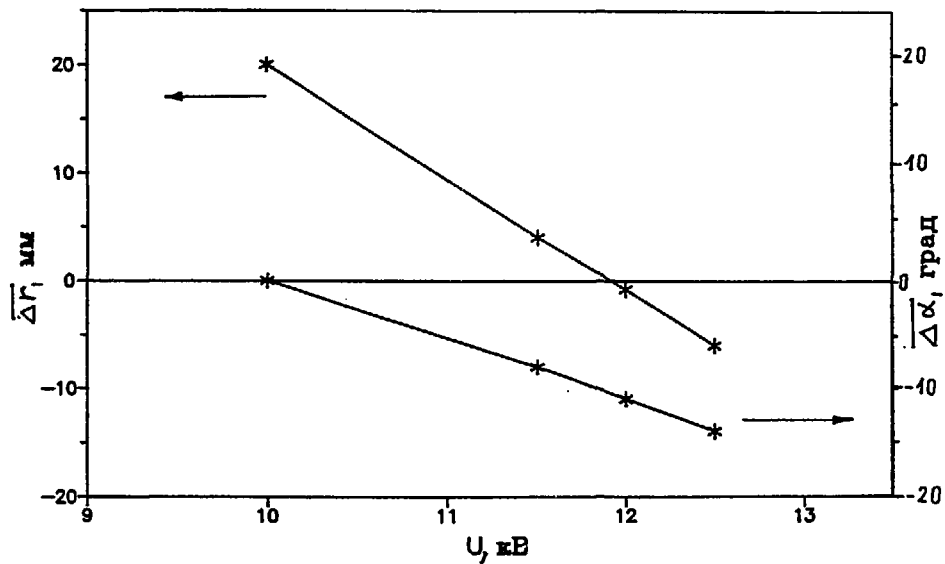


Рис. 3. Зависимости среднего смещения и среднего угла отклонения частиц с $A/Z = 4$ от потенциалов пластин компенсатора. Потенциал инжекции 15 кВ, потенциал вытягивающего электрода -5 кВ.

поля имеют вид $\vec{B} = (0, 0, B_z(\tilde{x}, \tilde{y}))$ и $\vec{E} = (E_x(\tilde{x}, \tilde{y}), E_y(\tilde{x}, \tilde{y}), 0)$ соответственно. Можно показать, что в случае $E_x, E_y = \text{const}$ решение может быть получено только при соответствующим образом выбранных значениях L, \vec{B} и \vec{v} ($\vec{v} = (v_x, v_y, 0)$ - скорость частицы).

Предположим, что компоненты электрического поля E_x и E_y линейно зависят от координат \tilde{x} и \tilde{y} . Электрическое поле должно удовлетворять уравнению Лапласа ($\Delta\phi=0$), что может быть выполнено в двух случаях:

$$E_x = a_1 \tilde{y} + a_2; \quad E_y = a_3 \tilde{x} + a_4; \quad (2)$$

$$E_x = b_1 \tilde{x} + b_2; \quad E_y = b_3 \tilde{y} + b_4. \quad (3)$$

Можно показать, что эти два выражения эквивалентны. В дальнейшем будем использовать выражения (2).

Из уравнения Лапласа следует, что коэффициенты a_1 и a_3 равны, следовательно, для определения электрического поля необходимо найти 3 параметра: a_1, a_2, a_4 . Для дальнейшего рассмотрения обозначим эти параметры как a, E_{x0}, E_{y0} соответственно. Предположим пока, что магнитное поле однородно $\vec{B} = (0, 0, B_0)$.

Запишем электрическое поле в следующем виде:

$$\vec{E} = (a\tilde{y} + E_{x0}, a\tilde{x} + E_{y0}, 0), \quad (4)$$

и введем новые координаты x и y :

$$x = \tilde{x} + E_{y0}/a, \quad y = \tilde{y} + E_{x0}/a, \quad (z = \tilde{z}), \quad (5)$$

тогда электрическое поле и распределение потенциала будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &= (ay, ax, 0) \\ \phi(x, y) &= -axy + \phi_0 \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Магнитное поле при этом не изменится. Эквипотенциальными линиями электрического поля будут являться гиперболы.

Рассмотрим решение уравнения движения частицы в электрическом поле (6) и магнитном поле $\vec{B} = (0, 0, B_0)$:

$$m\ddot{\vec{r}} = q\vec{E} + q[\dot{\vec{v}} \times \vec{B}], \quad (7)$$

где $\vec{r} = (x, y, z)$, m - масса частицы, q - заряд, $\dot{\vec{v}}$ - скорость частицы.

Подставив выражение для \vec{E} и введя обозначения $f = qV_0/m$ и $\nu = qa/m$, получаем следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} - f\dot{y} - \nu y &= 0 \\ \ddot{y} + f\dot{x} - \nu x &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Решение системы будем искать в виде:

$$\left. \begin{aligned} x &= x e^{\lambda t} \\ y &= y e^{\lambda t} \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Подставляя выражения (9) в систему уравнений (8), получим систему линейных алгебраических уравнений, которая имеет решение при равенстве 0 детерминанта системы. Из этого условия мы получим уравнение 4-й степени для λ и найдем два действительных корня $\lambda_{1,2} = \pm\Lambda$ и два мнимых корня $\lambda_{3,4} = \pm i\omega$, где Λ и ω выражаются через f и ν .

Полное решение уравнения движения имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= x_1 e^{\Lambda t} + x_2 e^{-\Lambda t} + x_3 e^{i\omega t} + x_4 e^{-i\omega t} \\ y(t) &= y_1 e^{\Lambda t} + y_2 e^{-\Lambda t} + y_3 e^{i\omega t} + y_4 e^{-i\omega t} \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Постоянные коэффициенты определяются начальными условиями.

Запишем выражение для $y(t)$ в следующем виде:

$$y(t) = Y_h \operatorname{sh}(\Lambda t + \delta_h) + Y_s \cos(\omega t + \delta_s). \quad (11)$$

Из условий

$$y = 0, \quad \dot{y} = 0 \quad (\text{при } x = L) \quad (12)$$

получаем

$$\left. \begin{aligned} Y_H \operatorname{sh}(\Lambda t + \delta_H) &= -Y_S \cos(\omega t + \delta_S) \\ \Lambda Y_H \operatorname{ch}(\Lambda t + \delta_H) &= Y_S \omega \sin(\omega t + \delta_S) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Начальная система координат $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ может быть выбрана таким образом, что в новой системе координат (x, y, z) будет действительно условие (12).

Разделив одно уравнение на другое, получим трансцендентное уравнение относительно t . Можно показать, например графическим способом, что решение этого уравнения существует. Это означает, что электрическое поле вида (2) может обеспечить выполнение требуемого условия (12) в случае однородного магнитного поля.

Решение уравнения движения в случае неоднородного магнитного поля ($B_z = B(r)$) проводилось численным методом Рунге-Кутты. Неоднородное магнитное поле вводилось в вычислительную программу в виде полинома третьей степени $B_z = \sum_{i=1}^3 b_i r^i$, коэффициенты которого были вычислены по измеренному распределению магнитного поля с помощью специальной программы.

Вводя в программу решения уравнения движения различные значения параметров a , E_{x0} , E_{y0} и проверяя выполнение условий (12), получаем множество значений этих параметров, при которых выполняются условия (12). Из этого множества значений выбираем такие, которые могут быть физически реализованы. Профиль пластин компенсатора определяется эквипотенциалами электрического поля. На рис.4 для примера показаны эквипотенциальные линии электрического поля, полученные для значений параметров $a = -51,9 \cdot 10^5$ В/м, $E_{x0} = -0,9 \cdot 10^5$ В/м, $E_{y0} = 7,0 \cdot 10^5$ В/м.

ПРОВЕРКА СВОЙСТВ ПОЛУЧЕННОЙ И. О. С.

Проверка свойств полученной ионно-оптической системы проводилась с помощью программы ELENS /6/. В работе /7/ программа ELENS расширена таким образом, что можно решать уравнение Лапласа и уравнение траектории в двумерном случае. В данной работе программа была дополнена следующим образом:

- переведена с ЭВМ CDC на персональную ЭВМ IBM PC-XT/AT;
- введено дополнение, позволяющее получать на экране дисплея

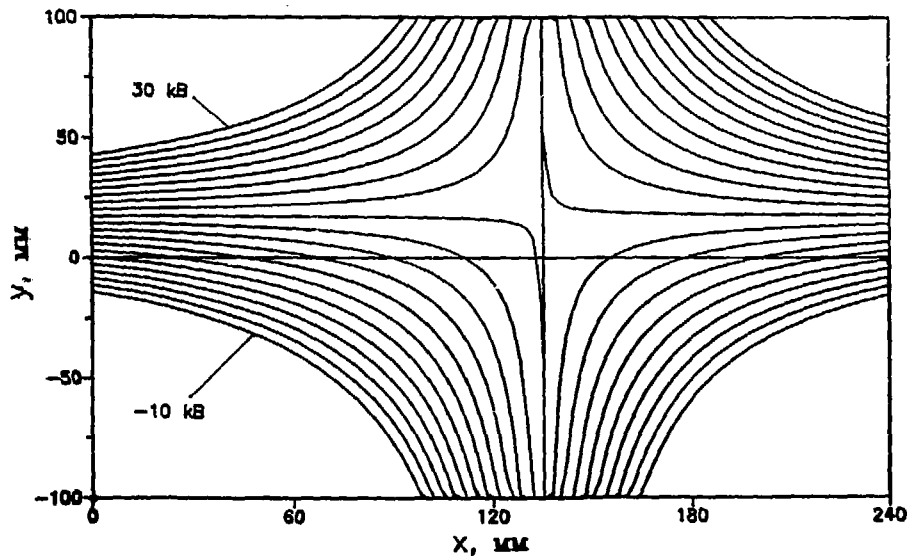


Рис. 4. Эквипотенциальные линии электрического поля, рассчитанные для значений параметров $a = -51,9 \cdot 10^5$ В/м, $E_{x0} = -0,9 \cdot 10^5$ В/м, $E_{y0} = 7,0 \cdot 10^5$ В/м. Значения потенциалов крайних эквипотенциалей +30 и -10 кВ, шаг между эквипотенциалами 2 кВ.

изображение И.О.С. и траектории частиц:

-расширена для решения уравнения траектории в двумерном случае с учетом перпендикулярного к плоскости движения неоднородного магнитного поля.

Уравнение траектории при наличии перпендикулярного к плоскости движения магнитного поля имеет следующий вид:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}{2U} \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{dy}{dx} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{2AI_0}{\sqrt{U} \rho} \cdot 2(y - Y_{\min} - \frac{\rho}{y}) \right) + B \cdot SM \sqrt{U} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$$

$$A = \frac{1}{4\epsilon_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{2Q/m}}, \quad SM = 10^{-3} \cdot \sqrt{2Q/m}, \quad (14)$$

где m - масса частицы, Q - заряд, U - потенциал электростатического поля, ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, x, y - координаты частицы, I_0 - ток пучка на единицу длины эмиссионной щели, ρ - ширина пучка, Y_{\min} - расстояние от оси x до ближайшей траектории.

Для нахождения профиля пластин компенсатора определялись координаты и направление движения частицы на входе в компенсатор. Были взяты такие параметры, при которых смещение частицы от оси и угол отклонения от оси на входе в компенсатор максимальны. Это получается при максимальном значении магнитного поля в центре магнита (0,4 Тл), минимальном значении A/Z , при котором возможно ускорение в циклотроне (диапазон A/Z для циклотрона У-200 составляет от 3 до 5, потенциал инжекции для иона с заданным отношением A/Z определяется радиусом первого оборота в циклотроне).

Затем по описанной выше процедуре находились параметры электрического поля и определялся профиль пластин компенсатора. После этого по программе ELENS рассчитывались траектории 11 частиц в полученной И.О.С. При расчете предполагалось, что поверхность эмиттера является плоской, и ионы эмитируются в направлении, перпендикулярном плоскости эмиттера. Влияние пространственного заряда не учитывалось. В качестве параметров, характеризующих качество И.О.С., мы приняли среднее смещение траекторий от оси и средний угол отклонения траекторий от оси И.О.С. на выходе из компенсатора.

Размеры расчетной области составляют 180 мм по оси x и 150 мм

по оси Y . Шаг сетки при вычислении потенциала был равен 3 мм по обоим осям, это связано с возможностями программы ELENS. При расчете различных вариантов И.О.С шаг сетки оставался постоянным, не изменялась также геометрия электродов И.О.С. на участке извлечения и начального формирования пучка. Это, на наш взгляд, позволяет провести по крайней мере качественное сравнение свойств И.О.С. с различными профилями пластин компенсатора.

На рис.5 показана геометрия И.О.С., профиль пластин компенсатора для которой определен для $A/Z = 3$ и магнитного поля в центре магнита 0,4 Тл и траектории частиц. Из рисунка видна сильная асимметрия профилей и потенциалов пластин компенсатора в отличие от классического фильтра Вина.

Было также рассмотрено движение частиц с различными значениями A/Z при значениях магнитного поля в центре магнита от 0,2 до 0,4 Тл в И.О.С. с тем же профилем пластин компенсатора. Расчеты показали, что при неизменном профиле пластин варьированием потенциалов пластин можно обеспечить вывод пучка на ось ионпровода. При этом среднее смещение траекторий от оси и средний угол отклонения траекторий от оси не превышают ± 1 мм и $\pm 1^\circ$ соответственно.

Таким образом, расчеты по программе ELENS показали, что предложенное гиперболическое электрическое поле обеспечивает выполнение условия (12) не только в случае однородного магнитного поля, но и в случае неоднородного поля.

На рис.6 показана эволюция фазовой диаграммы пучка с $A/Z=4$ при прохождении И.О.С. Диаграммы построены по траекториям 24 частиц в различных точках И.О.С. Ширина эмиссионной щели была взята 1 мм, начальный угловой разброс частиц $\pm 0,1$ рад.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено движение частиц в ионно-оптической системе инжектора многозарядных ионов, включающей в себя область скрещенных электрического и магнитного полей. Предложено гиперболическое распределение потенциала электрического поля и метод нахождения его параметров, обеспечивающих вывод пучка частиц на ось И.О.С. после прохождения области скрещенных полей. Проведены расчеты траекторий частиц в построенной предложенным

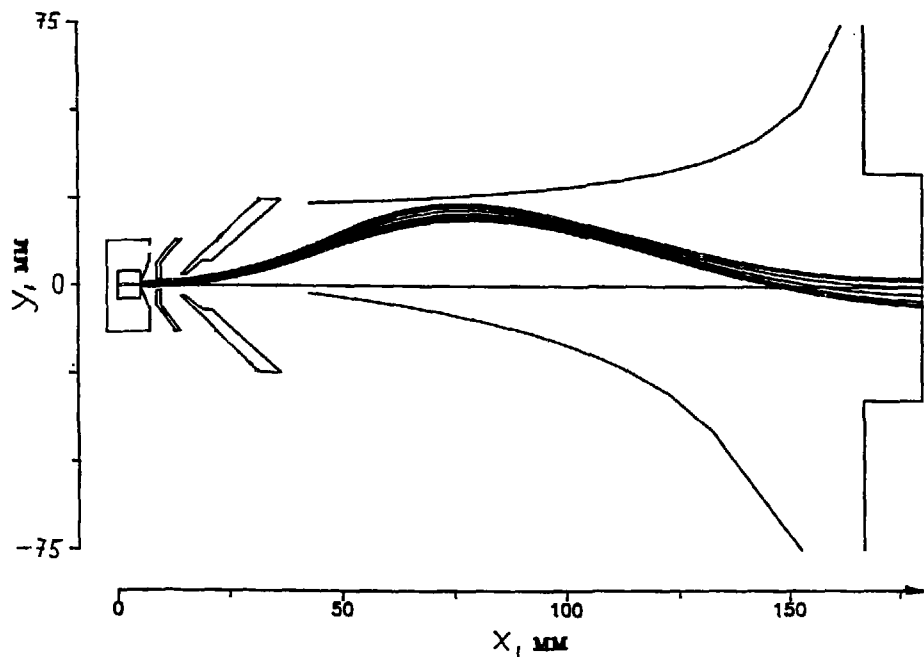


Рис. 5. Геометрия И.О.С. и траектории частиц с $A/Z = 3$. Потенциал инжекции 19 кВ, потенциал вытягивающего электрода -5 кВ, потенциалы пластин компенсатора +15,1 и -0,5 кВ.

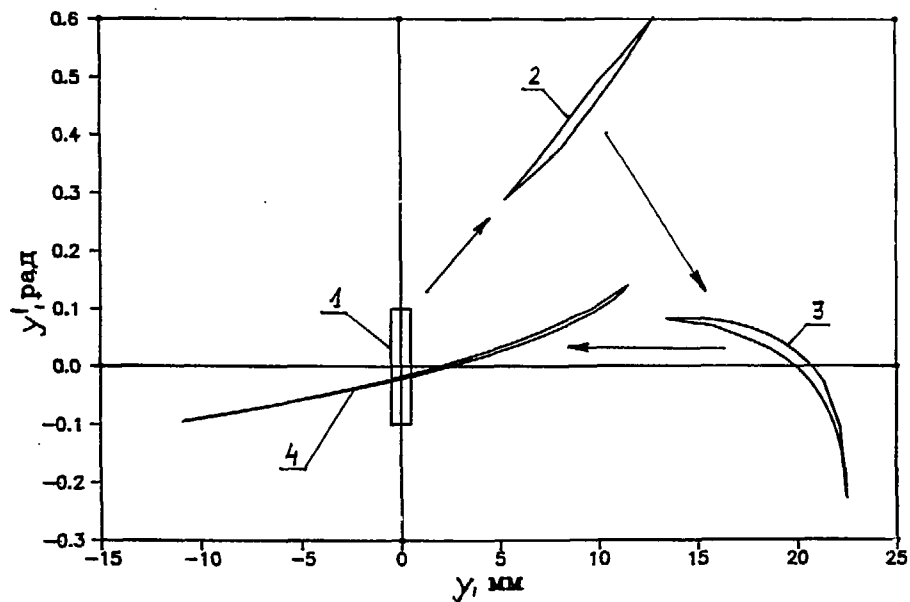


Рис.6. Эволюция фазовой диаграммы пучка с $A/Z = 4$ при прохождении И.О.С. Магнитное поле $0,4 \text{ Т}$
 1 - эмиссионная щель, 2 - вход в компенсатор,
 3 - в точке максимального смещения от оси,
 4 - на выходе из компенсатора.

методом И.О.С. Показано, что полученная И.О.С. обеспечивает вывод пучка частиц на ось системы для требуемого диапазона значений A/Z и магнитного поля.

Авторы выражают признательность Ю.Дитриху за помощь в адаптации программы ELENs для решения данной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.Л. Богомолов и др. - ОИЯИ Р9-88-641, Дубна, 1988.
2. В.Б. Кутнер и др. - В кн.: Труды II Международного Совещания по Циклотронам и их Применению, Бехине, ЧССР, 1989. ОИЯИ Д9-89-708, Дубна, 1989, с. 258.
3. М.Ю. Бредихин и др. - ВАНТ, серия: Общая и ядерная физика. Вып. 2 (12), 1980, с. 65.
4. J.G. Bannerberg, A.J.H. Voerboom - IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-22(3), p. 1675, 1979.
5. В.И. Райко - ИАЗ-974, Москва, 1965.
6. J.S. Hornsby - CERN, 6600 Computer, Program Library, 1965.
7. Ю. Дитрих - ОИЯИ 9-80-495, Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 марта 1990 года.