

## 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ ИОНОВ В ПОВОРОТНЫХ МАГНИТАХ И ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ДЕФЛЕКТОРАХ

*Н. Ю. Казаринов*<sup>1</sup>

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В работе представлены уравнения и алгоритмы для расчетов динамики заряженных частиц в поворотных магнитах и электростатических дефлекторах, используемых в каналах транспортировки пучков ионов и спектрометрах. Приводятся результаты расчетов 3D-карт электромагнитных полей. Анализируется величина нелинейностей электромагнитного поля и их влияние на динамику частиц. Приводятся результаты расчета динамики частиц в канале аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-280 и спектрометра ГАЛС, создаваемых в ЛЯР ОИЯИ.

The equations and algorithms for calculation of the dynamics of the charged particle beams in the bending magnets and electrostatic deflectors used in the transport beam lines and spectrometers are presented. The results of calculations of 3D electromagnetic field maps are given. The values of the non-linearity of electromagnetic fields and their effect on the dynamics of particles are analyzed. The simulation of ion dynamics in the axial injection beam line of DC-280 cyclotron and GALS spectrometer to be created at FLNR JINR is also described.

PACS: 29.20 dg; 29.30 Aj

### ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований в настоящее время реализуется проект высокоинтенсивного универсального циклотрона тяжелых ионов ДЦ-280 [1]. Новый циклотрон должен обеспечивать ускорение ионов от углерода до урана в диапазоне энергий 5–10 эВ/нуклон. Для ионов средних масс  $A = 50–90$  интенсивность пучков должна быть не ниже 10 мкА-частиц.

В канале аксиальной инжекции и каналах вывода пучка циклотрона ДЦ-280 используются различные поворотные магниты и электростатические дефлекторы. Так, например, для сепарации пучка с требуемым отношением массы к заряду  $A/Z$  (анализа спектра пучка) в канале аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-280 [2, 3] используется специальный анализирующий магнит ИМ90 с увеличенным разрешением. В этом же канале для поворота пучка ионов на вертикальную ось используется сферический электростатический дефлектор ИВ90. При транспортировке ускоренных в циклотроне ДЦ-280 ионов используется специальный магнит ТМ50, осуществляющий разводку пучка на пять каналов при различных уровнях магнитного поля [3, 4].

---

<sup>1</sup>E-mail: nyk@lnr.jinr.ru

В ЛЯР ОИЯИ создается экспериментальная установка ГАЛС [5], одним из основных элементов которой должен стать спектрометрический магнит с проектным разрешением, равным 1500.

Для успешного проектирования и создания поворотных магнитов и электростатических дефлекторов необходимо проведение прецизионных трехмерных (3D) расчетов электромагнитного поля этих устройств, а также моделирование динамики ионного пучка в них. В данной работе приводятся результаты расчета 3D-карт электромагнитного поля с помощью программы OPERA-3D [6], представлены уравнения и алгоритмы расчетов динамики заряженных частиц, анализируется величина и влияние нелинейности поля на движение пучка ионов. Расчет динамики частиц проводился с помощью пакета программ MSIB04 [7].

### 1. 3D РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ

3D расчетные модели магнитов IM90, TM50, использующиеся программой OPERA-3D, показаны на рис. 1. Расчетные модели дефлектора IB90 и спектрометрического магнита установки ГАЛС показаны на рис. 2, 3 соответственно.

Для уменьшения объема карты поля расчетные модели соответствуют 1/4-й части магнитов IM90 и TM50 и 1/2-й части дефлектора IB90 и спектрометра ГАЛС. При нахождении индукции магнитного поля используются формулы, являющиеся следствием симметрии системы. Так, например, при симметрии относительно плоскости  $X = 0$

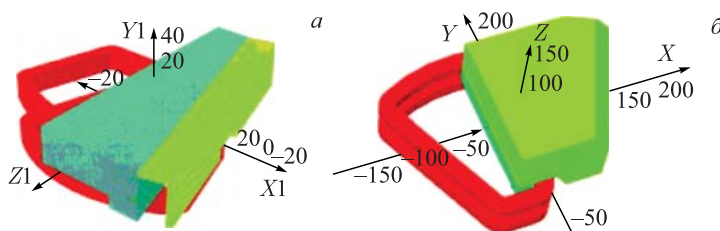


Рис. 1. Магниты IM90 (а) и TM50 (б)

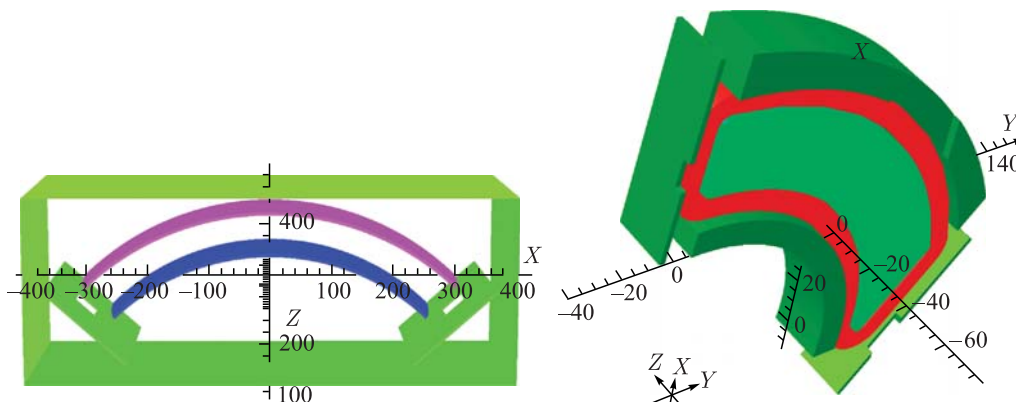


Рис. 2. Дефлектор IB90

Рис. 3. ГАЛС

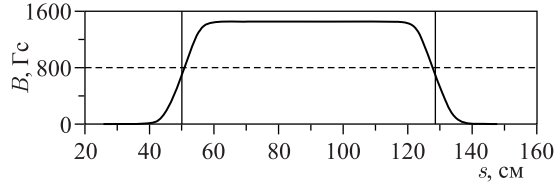


Рис. 4. Магнит IM90

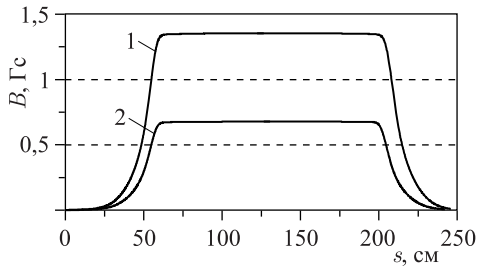


Рис. 5. TM50 орбиты 1, 2

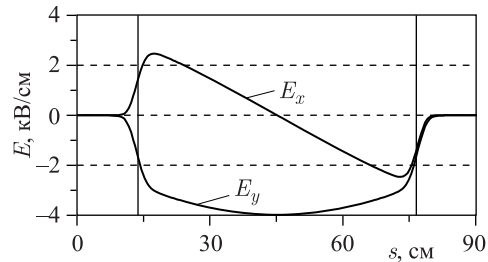


Рис. 6. Дефлектор IB90

(магнит TM50, рис. 1, б) имеем соотношения для индукции  $\mathbf{B}$ :

$$(B_X(-X), B_Y(-X), B_Z(-X)) = (-B_X(X), B_Y(X), B_Z(X)). \quad (1)$$

Для нахождения индукции магнитного поля  $\mathbf{B}(X, Y, Z)$  в произвольной точке траектории частицы используется трехмерная интерполяция значений индукции магнитного поля в узлах карты поля  $\mathbf{B}_{ijk}^M$ , являющаяся обобщением формулы Лагранжа:

$$\mathbf{B}(X, Y, Z) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 q_{Xi} q_{Yj} q_{Zk} \mathbf{B}_{i_X+i-1, j_Y+j-1, k_Z+k-1}^M. \quad (2)$$

Здесь  $i_{X,Y,Z}$  — номера узла сетки, ближайшего к данной точке;  $q_{X,Y,Z} 1,2,3$  — коэффициенты интерполяционного полинома Лагранжа второго порядка.

На рис. 4, 5 показана зависимость индукции магнитного поля  $B_Z$  на проектной орбите магнитов IM90 и TM50 от длины  $s$  вдоль орбиты. На рис. 6 показано распределение напряженности электрического поля  $E_{X,Y}$  на проектной орбите дефлектора IB90.

## 2. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

При исследовании движения частиц в магнитах и дефлекторах удобно использовать натуральную систему координат  $(x, z, s)$  [8], связанную с расчетной равновесной орбитой  $(X_0(s), Y_0(s))$ , соответствующей карте электромагнитного поля. Она должна быть определена на первом этапе расчета. Расчетные равновесные орбиты в магнитах IM90, TM50 и электростатическом дефлекторе IB90 показаны на рис. 7–9.

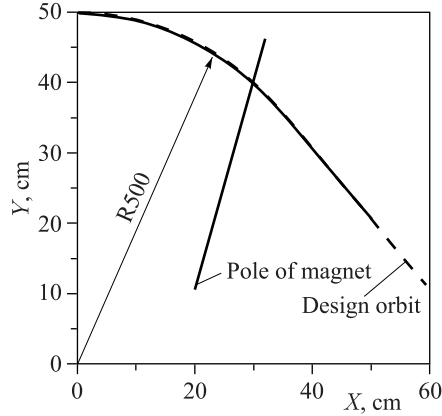


Рис. 7. 1/2-я часть расчетной равновесной орбиты магнита IM90

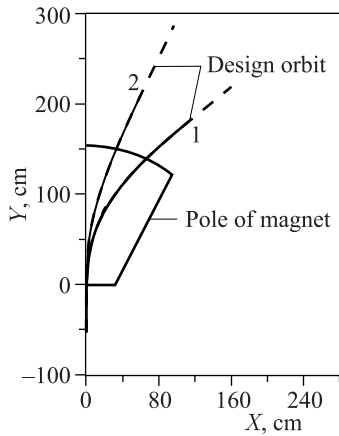


Рис. 8. Расчетные равновесные орбиты 1, 2 магнита TM50

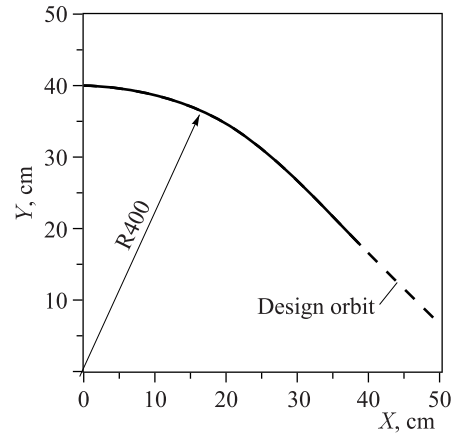


Рис. 9. 1/2-я часть расчетной равновесной орбиты дефлектора IB90

В натуральной системе координат уравнения для изменения радиуса-вектора  $\mathbf{r}$  иона имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}'' + \left(\frac{V}{V_0}\right) \left(\frac{V_0}{V}\right)' \mathbf{r}' &= \frac{1}{B\rho} \frac{V}{V_0} [\mathbf{r}'\mathbf{B}] + \frac{1}{B\rho\beta} [\mathbf{r}'[\mathbf{E}\mathbf{r}']], \\ \frac{(B\rho)'}{B\rho} &= \frac{(\mathbf{E}\mathbf{r}')}{B\rho\beta} \equiv \Lambda(s), \quad \frac{(B\rho\beta)'}{B\rho\beta} = (2 - \beta^2)\Lambda(s), \\ \frac{V}{V_0} &= \sqrt{(1 + K_0x)^2 + x'^2 + z'^2}, \quad \left(\frac{V}{V_0}\right) \left(\frac{V_0}{V}\right)' = (1 - \beta_0^2)\Lambda_0(s) - (1 - \beta^2)\Lambda(s). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь и в дальнейшем штрих означает дифференцирование по длине расчетной равновесной орбиты  $s$ ;  $B\rho$  — магнитная жесткость частицы;  $\beta$  — релятивистская скорость частицы;  $K_0 = K_E + K_M$  — кривизна расчетной равновесной орбиты. В общем случае

кривизна определяется как магнитным  $K_M$ , так и электрическим полем  $K_E$ . Все компоненты вектора индукции магнитного поля  $\mathbf{B}$ , входящие в (2), рассчитываются с помощью карты магнитного поля в точке нахождения частицы  $\mathbf{r}$ :

$$\mathbf{r} = (X_0 - xY'_0, Y_0 + xX'_0, z), \quad \mathbf{B} = (-B_X Y'_0 + B_Y X'_0, B_Z, B_X X'_0 + B_Y Y'_0). \quad (4)$$

Аналогично вычисляются компоненты вектора напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$ . Уравнения (2) используются в программе MSIB04 [7].

Линейное приближение уравнений движения (2) позволяет вычислить матрицу перехода и огибающие пучка для магнита или дефлектора, учитывающие реальное распределение электромагнитного поля на равновесной орбите:

$$\begin{aligned} x'' &= -\Lambda_0 x' - \left[ (1 - \beta_0^2)(K_0^2 - K_E K_M) + 2K_E^2 - \frac{1}{(B\rho\beta)_0} \frac{\partial E_x}{\partial x} - \frac{1}{(B\rho)_0} \frac{\partial B_z}{\partial x} \right] x + \\ &\quad + \frac{\Delta M}{M_0} (K_0 + K_E), \\ z'' &= -\Lambda_0 z' + \left[ \frac{1}{(B\rho\beta)_0} \frac{\partial E_z}{\partial z} + \frac{1}{(B\rho)_0} \frac{\partial B_z}{\partial x} \right] z, \\ \left( \frac{\Delta M}{M_0} \right) &= \left( \frac{\Delta p}{p_0} \right) + K_E x, \quad \left( \frac{\Delta M}{M_0} \right)' = -(1 - \beta_0^2) \Lambda_0 \left( \frac{\Delta M}{M_0} \right), \\ \left( \frac{\Delta M}{M_0} \right) (B\rho\beta)_0 &= \left( \frac{\Delta p}{p} \right)_i (B\rho\beta)_i = \text{const}. \end{aligned} \quad (5)$$

В формулах (2) производные полей вычисляются на расчетной равновесной орбите с помощью карты поля; индекс «0» отмечает равновесное значение переменной;  $(\Delta p/p)_i$  — импульсный разброс вне области задания электрического поля. Данные уравнения используются в версии программы MSIB04, основанной на методе моментов.

### 3. АНАЛИЗ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОЛЯ

Неоднородность оценивается с помощью фурье-анализа карты магнитного поля:

$$B_z = B_0 \sum_{n=0}^{\infty} b_n(r, s) r^n \cos(n\varphi). \quad (6)$$

Здесь и в дальнейшем  $(r, \varphi)$  — полярные координаты точки  $(x, z)$  натуральной системы координат, связанной с расчетной равновесной орбитой. Аналогичный анализ проводится и для компонента электрического поля  $E_x$ , нормального к равновесной орбите в дефлекторе. Средняя по радиусу амплитуда первой гармоники  $\bar{b}_1(s)$  определяет величину эффективного краевого угла  $\varepsilon_{\text{eff}}$  в магните:

$$\text{tg } \varepsilon_{\text{eff}} = -\frac{1}{2} \int_0^{L_M} \bar{b}_1(s) ds. \quad (7)$$

Здесь  $L_M$  — длина расчетной равновесной орбиты магнита.

Вторая гармоника соответствует секступольной составляющей индукции магнитного поля. Ее наличие приводит к нелинейному искажению поперечного распределения частиц и увеличению среднеквадратичного эмиттанта пучка.

Зависимость амплитуд второй  $b_2(r, s)$  гармоники от длины вдоль орбиты  $s$  при различных радиусах  $r$  для магнита IM90 показана на рис. 10. Кривые 1 соответствуют зазору  $h = 70$  мм, кривые 2 —  $h = 110$  мм.

Уменьшение величины зазора  $h$  до 70 мм в проектной версии магнита IM90 более чем

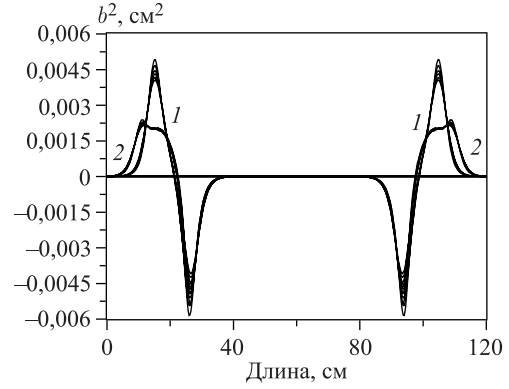


Рис. 10. Секступольная составляющая поля  $b_2(r, s)$  магнита IM90

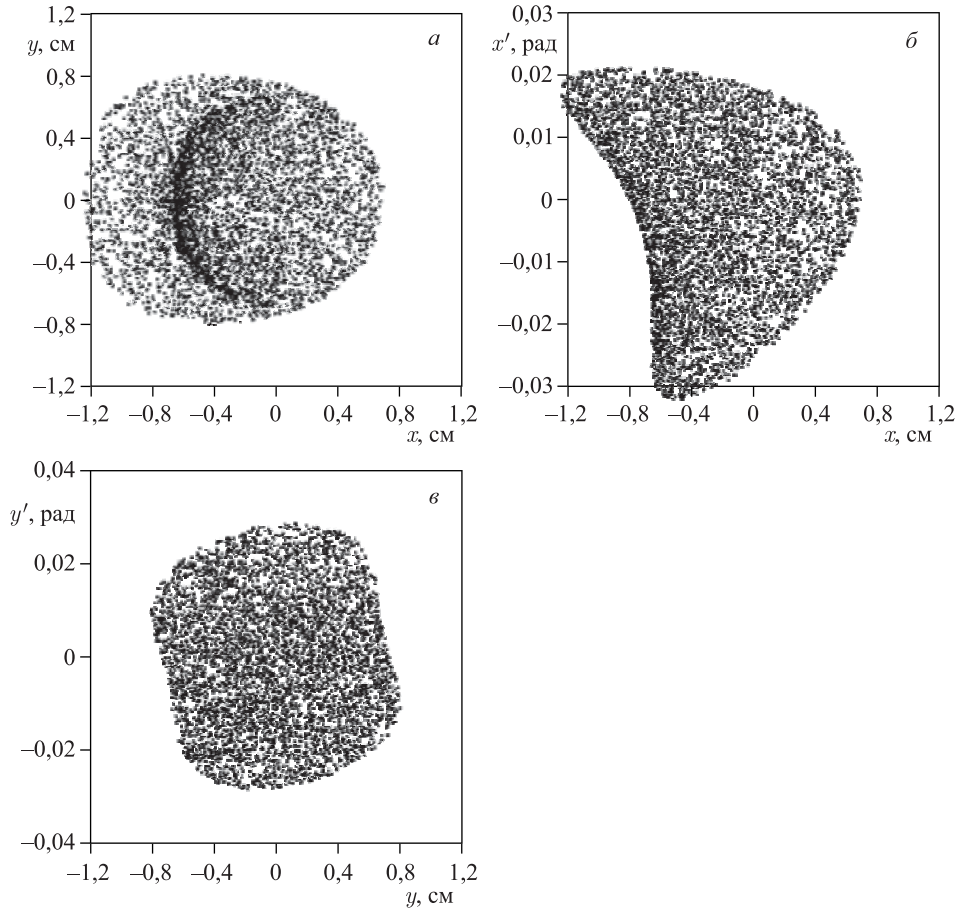


Рис. 11. Распределение  $(x, y)$  (а),  $(x, x')$  (б),  $(y, y')$  (в)

в два раза уменьшило среднее значение по длине орбиты амплитуды второй гармоники магнитного поля.

Моделирование транспортировки ионов  $^{238}\text{U}$  через анализирующий магнит IM90 показало, что нелинейность магнитного поля приводит к увеличению среднеквадратичного эмиттанса пучка на 12,5% с одновременным искажением поперечного распределения частиц в пучке, показанного на рис. 11.

Использование фокусирующего соленоида, установленного на входе в магнит, значительно уменьшает влияние нелинейности на динамику частиц благодаря уменьшению размеров пучка.

#### 4. АКСИАЛЬНАЯ ИНЖЕКЦИЯ ЦИКЛОТРОНА ДЦ-280 И СПЕКТРОМЕТР ГАЛС

Схема канала аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-280 [2] показана на рис. 12.

При численном моделировании динамики пучка ионов в канале использовались 3D-карты магнитного поля анализирующего магнита IM90 [3], ускорительной трубки IAT

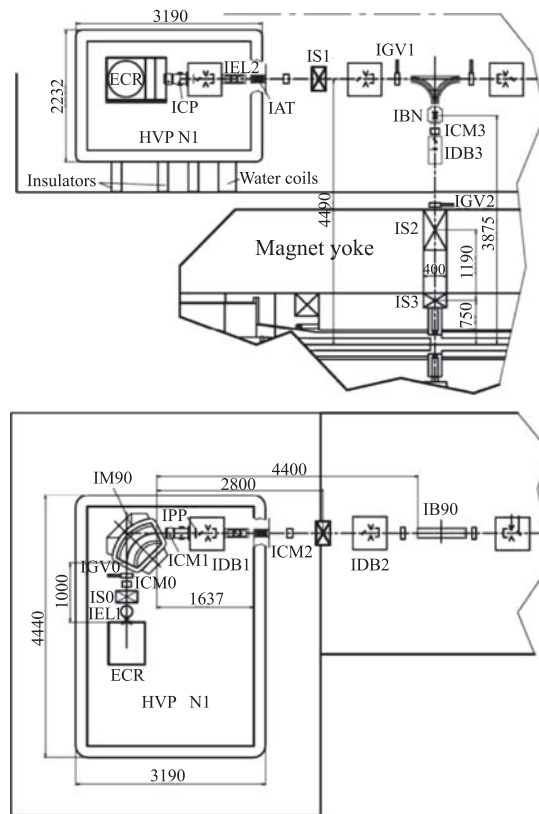


Рис. 12. Схема канала: HVP — высоковольтная платформа; ECR — ЭЦР-источник ионов; IS0-3 — фокусирующие соленоиды; IM90 — анализирующий магнит; IEL1, IEL2 — электростатические линзы; IAT — ускорительная трубка; IB90 — электростатический дефлектор

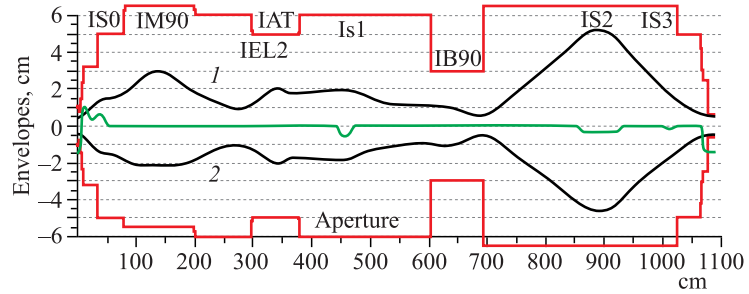


Рис. 13. Горизонтальная (1) и вертикальная (2) огибающая пучка ионов  $^{48}\text{Ca}^{8+}$

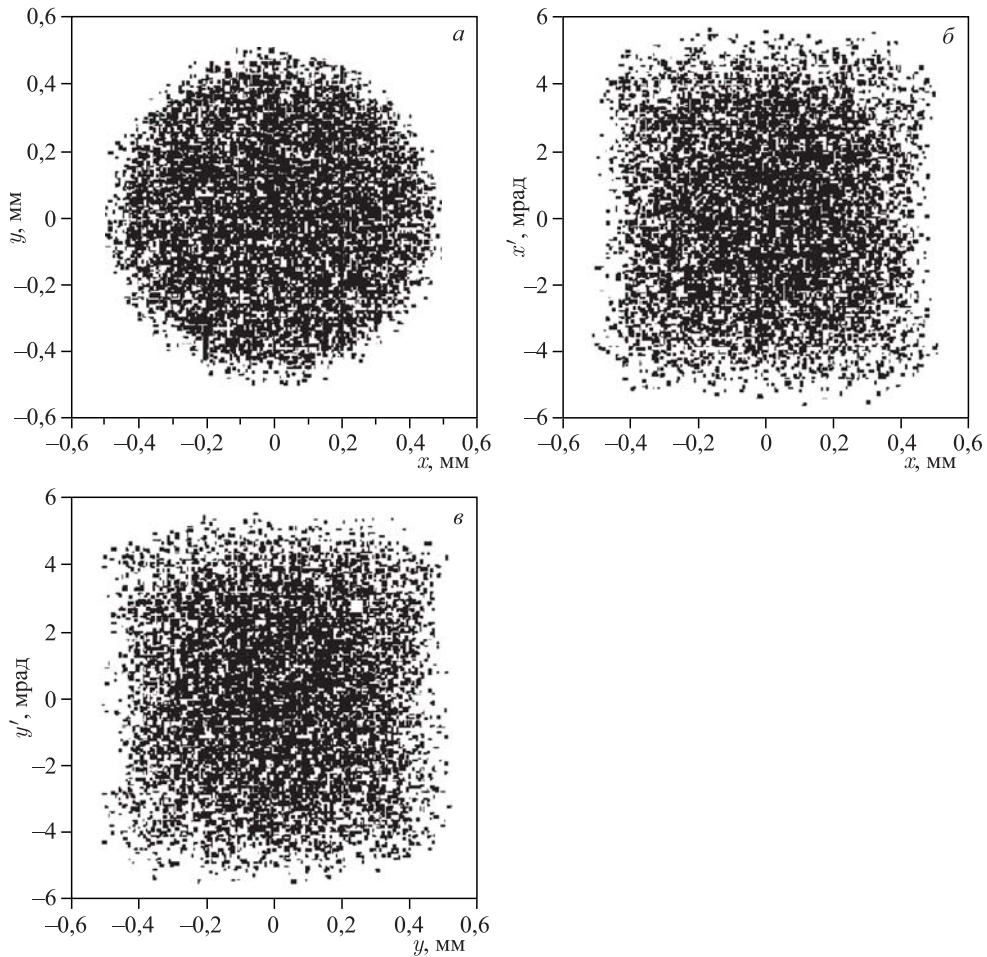


Рис. 14. Распределение ионов в объектной точке спектрометра. Плоскость  $(x, y)$  (а),  $(x, x')$  (б),  $(y, y')$  (в)



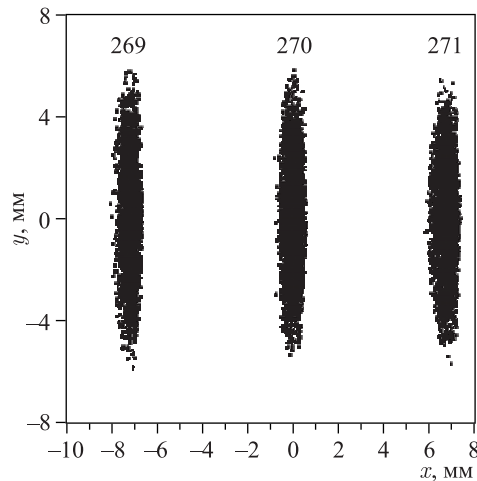


Рис. 15. Фокальная плоскость спектрометра

и сферического электростатического дефлектора ИВ90. Рассматривалась транспортировка пучка ионов  $^{48}\text{Ca}^{8+}$  с кинетической энергией 75 кэВ/З. Зависимость огибающих пучка от длины вдоль канала показана на рис. 13.

Расчетная эффективность транспортировки пучка в канале составляет 100 %.

В спектрометре ГАЛС рассматривалась сепарация пучка однозарядных ионов с массой  $A = 270$ . На рис. 14 показано распределение ионов в объектной точке спектрометра.

Распределение ионов различных масс в фокальной плоскости спектрометра показано на рис. 15. Расчетное разрешение спектрометра равно 1400.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gulbekyan G. et al.* Status Report and Future Development of FLNR JINR Heavy Ions Accelerators Complex // Proc. of the 11th Intern. Conf. on Heavy Ion Accel. Technol. (HIAT09), Venezia, Italy, June 8–12, 2009. P. 59–63.
2. *Gulbekyan G. G. et al.* The Project of the HV Axial Injection for the DC-280 Cyclotron at the FLNR JINR // Proc. of XXIV Russ. Accel. Conf. (RuPAC'2014), Obninsk, Russia, 2014. P. 333–335.
3. *Kazarinov N. Yu., Ivanenko I. A.* Magnets of Injection and Extraction Systems of Cyclotron DC280 // Ibid. P. 339–341.
4. *Gulbekyan G. G. et al.* The Project of Beam Transportation Lines for the DC-280 Cyclotron at the FLNR JINR // Ibid. P. 336–338.
5. *Zemlyanoi S.* GALS — Gas Cell Based Laser Ionization Setup at Dubna // Proc. of the 11th IGISOL Workshop, Jyväskylä, Finland, June 10–13, 2013.
6. OPERA-3D Reference Manual. Oxford OX5 1JE, England, 2012.
7. *Alexandrov V., Kazarinov N., Shevtsov V.* Multi-Component Ion Beam Code — MCIB04 // Proc. of XIX Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC2004), Dubna, Oct. 4–9, 2004.
8. *Коломенский А. А., Лебедев А. Н.* Теория циклических ускорителей. М.: Физматгиз, 1962. С. 50.