

с 345e2

Б-103

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

ПТЭ, 1967, №6,

с. 42-43

4/1-67

9 - 3046



И.М. Баженова, Л.П. Зиновьев, Р.Н. Федорова,
А.И. Широкова

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ЛАБОРАТОРИЯ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

АХРОМАТИЧЕСКАЯ
ПОВОРОТНО-ФОКУСИРУЮЩАЯ СИСТЕМА
ДЛЯ ВВОДА ЧАСТИЦ В СИНХРОФАЗОТРОН ОИЯИ

1966

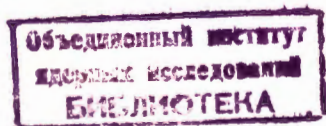
9 - 3046

4703/1 чр.

И.М. Баженова, Л.П. Зиновьев, Р.Н. Федорова,
А.И. Широкова

АХРОМАТИЧЕСКАЯ
ПОВОРОТНО-ФОКУСИРУЮЩАЯ СИСТЕМА
ДЛЯ ВВОДА ЧАСТИЦ В СИНХРОФАЗОТРОН ОИЯИ

Направлено в ПТЭ



1. Введение

Инжекция частиц в синхрофазотрон представляет важную и сложную проблему, от правильного решения которой во многом зависит интенсивность пучка ускоренных частиц.

Ввод частиц в синхрофазотрон осуществляет поворотнo-фокусирующая система, расположенная между инжектором (линейным ускорителем) и синхрофазотроном. Назначение поворотнo-фокусирующей системы – ввести пучок, выходящий из инжектора, в камеру синхрофазотрона в заданном месте, под заданным углом (параллельно равновесной орбите протонов в камере) при следующих жестких требованиях к параметрам вводимого пучка: угловая расходимость не должна превышать $\pm 10'$, а размер $3-4 \text{ см}^{1/2}$.

Для решения задачи оптимального ввода частиц в синхрофазотрон была рассмотрена поворотнo-фокусирующая система, состоящая из двух магнитов, линз и электростатического конденсатора. Расположение элементов системы ввода показано на рис. 1. Вся система по своим функциям может быть разделена на три части.

Первая часть состоит из двух триплетов и трех свободных пространств. Она осуществляет согласование пучка, выходящего из линейного ускорителя, с приемом синхрофазотрона.

Вторая часть переносит уже согласованный пучок с угловым увеличением – 1 в горизонтальной и вертикальной плоскостях и с линейным увеличением – 1 в вертикальной плоскости на вход в электростатический конденсатор и поворачивает пучок на 52° , не внося дополнительного увеличения углового и линейного размеров пучка из-за наличия некоторого разброса частиц по импульсам (угол поворота магнитов $\alpha = 52^\circ$ был определен из конструктивных соображений).

Третья часть - электростатический конденсатор, - поворачивая пучок на 3° , служит для точного выведения частиц на орбиту.

В отличие от системы ввода частиц в синхрофазотрон ОИЯИ, описанной в работе ^{1/2/}, функция согласования линейного ускорителя с синхрофазотроном отделена от функций ахроматического поворота, что создает возможность гибкой настройки всей системы в целом. Покажем, насколько существенным является требование ахроматизма поворотной системы на следующем примере (рис. 2). Пусть система поворота состоит из магнита ($\rho_1 = 188$ см, $\alpha_1 = 52^\circ$), пространства дрейфа ($s = 30$ см) и электростатического конденсатора ($\rho_2 = 2000$ см, $\alpha_2 = 3^\circ$), где $\rho_1 \cdot \rho_2$ - радиус кривизны равновесной траектории, $\alpha_1 \cdot \alpha_2$ - угол поворота.

Уравнение движения через данную систему в горизонтальной плоскости есть $\vec{x} = M\vec{x}_0 = M_3 M_2 M_1 \vec{x}_0$, где $\vec{x}_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \\ \frac{\Delta p}{p} \end{pmatrix}$, $\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ x' \\ \frac{\Delta p}{p} \end{pmatrix}$ - векторы на входе и на выходе из системы, M - матрица преобразования через всю систему, M_3, M_2, M_1 - матрицы преобразования через цилиндрический конденсатор, свободное пространство и поворотный магнит. Выражения для элементов матриц M_1, M_2, M_3 хорошо известны и приведены в работах ^{1/4,3/}. Производя перемножение матриц, получим

$$\vec{x} = M\vec{x}_0 = \begin{pmatrix} 0,0436 & 228,74 & 182,62 \\ -0,00426 & 0,6 & 0,8818 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \\ \frac{\Delta p}{p} \end{pmatrix}.$$

Отсюда следует, что линейный размер пучка за счет разброса по импульсам $\pm \frac{\Delta p}{p} = \pm 1,25 \cdot 10^{-3}$ изменяется на величину $\pm \Delta x = \pm m_{13} \frac{\Delta p}{p} = \pm 0,225$ см, а угловой - на величину $\pm \Delta x' = \pm m_{23} \frac{\Delta p}{p} = \pm 1,1 \cdot 10^{-3}$ (4'), что является существенным по отношению к радиальному приему синхрофазотрона, и, следовательно, для транспортировки пучка из инжектора должна быть выбрана другая система, которая не увеличивает размеров пучка на входе в синхрофазотрон из-за разброса частиц по импульсам (ахроматическая система).

1. Общие характеристики ахроматических поворотно-фокусирующих систем

При рассмотрении данной проблемы нами был использован матричный метод^{/4/}. Расчет проведен в трехмерных пространствах $x, x', \frac{\Delta p}{p}$ и $y, y', \frac{\Delta p}{p}$, где x и y - отклонения от оси пучка; x', y' - производные по направлению движения z ; Δp - отклонение импульса от расчетного значения.

Рассмотрим симметричную поворотно-фокусирующую систему, состоящую из двух магнитов и линз (рис. 3).

Пусть $M_x = \|m_{ij}\|$ и $M_y = \|M_{ij}\|$ есть матрицы уравнений движения через магниты системы в горизонтальной и вертикальной плоскостях, $N_x = \|n_{ij}\|$ и $N_y = \|N_{ij}\|$ - матрицы уравнений через линзы системы, S_1 - матрица свободного пространства^{/4/}. Пусть $A_x = \|a_{ij}\|$ и $A_y = \|A_{ij}\|$ - горизонтальная и вертикальная матрицы движения через половину системы. Вторая половина системы является зеркальным отражением первой.

Обозначив через $B_x = \|b_{ij}\|$ и $B_y = \|B_{ij}\|$ соответствующие матрицы всей системы, выразим B_x и B_y через элементы матриц A_x и A_y , получим^{/5/}

$$B_x = \begin{pmatrix} 2a_{11} a_{22} - 1 & 2a_{12} a_{22} & 2a_{12} a_{18} \\ 2a_{11} a_{21} & 2a_{11} a_{22} - 1 & 2a_{11} a_{28} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$B_y = \begin{pmatrix} 2A_{11} A_{22} - 1 & 2A_{12} A_{22} & 0 \\ 2A_{11} A_{21} & 2A_{11} A_{22} - 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Задача состоит в подборе таких параметров $K, \rho, \beta_1, \beta_2, n, S$ для элементов системы, чтобы выполнялись условия ахроматизма и дефокусировки с увеличением -1 ($K = \sqrt{\frac{1}{H\rho} \frac{\partial H_x}{\partial y}}$, ρ - радиус магнита, n - показатель преломления магнитного поля, S - длина свободного пробега), т.е.

$$\left. \begin{aligned} b_{13} = 2 a_{13} a_{23} = 0 ; \\ b_{23} = 2 a_{11} a_{23} = 0 ; \end{aligned} \right\} \text{ - условие ахроматизма,}$$

$$\left. \begin{aligned} b_{11} = b_{22} = 2 a_{11} a_{22} - 1 = -1 ; \\ b_{21} = 2 a_{11} a_{21} = 0 ; \\ B_{11} = B_{22} = 2 A_{11} A_{22} - 1 = -1 ; \\ B_{21} = 2 A_{11} A_{21} = 0 ; \end{aligned} \right\} \text{ - условие дефокусировки} \\ \text{с увеличением } - 1,$$

что выполняется при равенстве нулю следующих членов матриц A_x и A_y :

$$\begin{aligned} a_{11} = 0 ; \quad A_{11} = 0 . \\ a_{23} = 0 ; \quad A_{22} = 0 . \end{aligned} \quad (1)$$

Для рассматриваемой ахроматической системы

$$\begin{aligned} B_x = M_x S_3 N_{\text{деф}}^3 S_2 N_{\text{ф}}^2 S_1 N_{\text{деф}}^1 S_1 N_{\text{ф}}^2 S_2 N_{\text{деф}}^3 S_3 M_x = \\ = \begin{pmatrix} -1 & b_{12} & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} , \end{aligned} \quad (2)$$

$$B_y = M_y S_3 N_{\text{ф}}^3 S_2 N_{\text{деф}}^2 S_1 N_{\text{ф}}^1 S_1 N_{\text{деф}}^2 S_2 N_{\text{ф}}^3 S_3 M_y = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} .$$

Выразив элементы матриц B_x и B_y через элементы матриц A_x и A_y , для данной системы получим весьма сложные аналитические выражения, Решение такой системы нелинейных уравнений не представляется возможным, а потому при расчете нами был применен численный метод, описанный ниже.

2. Методы расчета ахроматической системы

Расчет описанных выше ахроматических систем был выполнен на электронной вычислительной машине М-20. Для расчета были применены программы № 800, 933, составленные в Вычислительном центре ОИЯИ. Программы включают в себя расчет траекторий частиц через поворотно-фокусирующую систему с помощью матриц, расчет фокусирующей системы методом фазовых объемов, расчет фокусирующей системы с учетом разброса по импульсам. С помощью программ может быть рассчитана любая фокусирующая система, состоящая из магнитов, линз, свободных пространств, коллиматоров, седараторов, электростатических конденсаторов. При этом имеется возможность проследивать поведение как траекторий, так и всего пучка в целом (фазовый объем) в любой точке пространства.

Для процедур оптимизации использовалась программа МНК-2(123), реализующая решение систем нелинейных уравнений методом линеаризации. При расчете систем подбирались максимум 10 параметров, при этом выполнялось около двадцати итераций, время расчета одного варианта составляло около 2 минут.

3. Варианты ахроматической поворотно-фокусирующей системы

Было рассмотрено семь вариантов ахроматической поворотно-фокусирующей системы, отличающихся конструкцией поворотных магнитов (поворотные магниты с краевой фокусировкой (варианты 1а, 1в, 1с), поворотные магниты с показателем спада магнитного поля α (вариант 2)) и наличием дополнительных квадрупольей для точной регулировки пучка (варианты 3а, 3в, 3с).

Рассчитанные варианты ахроматической системы, матрицы преобразования через них, параметры пучка на входе и на выходе из системы, применительно к синхрофазотрону ОИЯИ, представлены в таблице.

Сравнение результатов, приведенных в таблице, показывает, что матрицы преобразований через систему для различных вариантов существенно не отличаются друг от друга, т.е. для разных вариантов члены полной матрицы преобразования через системы b_{12} имеют близкие значения.

Дополнительно исследовалась устойчивость рассчитанных систем на изменение подобранных параметров и рассматривалась зависимость характеристик пучка (x, x', y, y') на выходе от этих изменений (рис. 5-7).

Из графиков видно, что наибольшей устойчивостью относительно параметров обладает система \mathcal{B}_c , которая и была взята за основу для выбора параметров и конструкций элементов поворотной-фокусирующей системы синхрофазотрона ОИЯИ.

5. Поворотной-фокусирующая система и короткий цилиндрический конденсатор

После прохождения описанной выше поворотной-фокусирующей системы пучок, пройдя свободное пространство $S = 30$ см, попадает в короткий цилиндрический конденсатор ($\rho = 2000$ см; $\alpha = 3^\circ$). Коротким мы называем такой конденсатор, в котором фокусирующее действие электрического поля на выбранной длине является слабым. Цилиндрический конденсатор предназначен для тонкой регулировки положения пучка и выведения его точно по касательной к равновесной орбите. Обозначив через $C = \|c_{ij}\|$ и через $D = \|d_{ij}\|$ горизонтальную и вертикальную матрицы преобразования через цилиндрический конденсатор, найдем матрицы преобразования через ахроматическую поворотной-фокусирующую систему и цилиндрический конденсатор $\Pi_x = \|P_{ij}^x\|$ и $\Pi_y = \|P_{ij}^y\|$ для горизонтальной и вертикальной плоскости:

$$\Pi_x = CSB_x = \begin{pmatrix} -c_{11} & (b_{12} - s)c_{11} - c_{21} & 0 \\ c_{21} & (b_{12} - s)c_{21} - c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\Pi_y = DSB_y = \begin{pmatrix} d_{11} & (-d_{11}s - d_{12}) \\ d_{21} & (-d_{21} - d_{22}) \end{pmatrix}.$$

Из равенства членов матрицы Π_x $P_{13}^x = 0$, $P_{23}^x = 0$ следует, что наличие цилиндрического конденсатора не нарушает ахроматизма поворотной-фокусирующей системы.

Резюмируя, можно сказать, что для идеальной системы при характеристиках пучка на входе в поворотно-фокусирующую систему, равных $\Delta x_0 = \Delta y_0 = 2$ см; $\Delta x'_0 = \Delta y'_0 = 3 \cdot 10^{-3}$ (10'); $\frac{\Delta p}{p} = 2,5 \cdot 10^{-3}$, можно получить характеристики пучка на выходе из электростатического конденсатора не хуже чем $\Delta x = 2,5$ см, $\Delta y = 2,3$ см, $\Delta x' = \Delta y' = 3 \cdot 10^{-3}$, что дает возможность эффективно захватить пучок в режим работы синхрофазотрона.

Л и т е р а т у р а

1. В.И. Векслер, А.А. Коломенский, В.А. Петухов, М.С. Рабинович. Физические основы сооружения синхрофазотрона на 10 Гэв. Приложение к журналу "Атомная энергия", № 4, 1957.
2. А.А. Коломенский, А.Б. Кузнецов, Н.Б. Рубин. ЖТФ, т. XXIX, 981 (1959).
3. H. Bruck. Symposium on High Energy Accelerators and Pion Physics. V. I, 200, Geneva, 1956.
4. S. Penner. Rev. Sci. Instr., 32, 150 (1961).
5. E.E. Blampis. Rev. Sci. Instr., 35, 150 (1964).

Рукопись поступила в издательский отдел
29 ноября 1966 г.

ТАБЛИЦА

№ системы	1a	1a	1c	2	3a	3a	3c
Параметры системы	$\alpha = 0,454; \eta = 0;$ $\beta_1 = 0,224; \beta_2 = 0;$ $\rho = 174,45;$ $S_3 = 0; K_3 = -1;$ $S_2 = 642,3;$ $K_2 = 0,0162;$ $S_1 = 43,02;$ $K_1 = 0,0154$	$\alpha = 0,454; \eta = 0; \beta_1 = 0$ $\beta_2 = 0,249;$ $\rho = 174,45; S_3 = 0;$ $K_3 = 1; S_2 = 6295;$ $K_2 = 0,0162;$ $S_1 = 43,832;$ $K_1 = 0,015477$	$\alpha = 0,454; \eta = 0;$ $\beta_1 = 0,118;$ $\beta_2 = 0,121; \rho = 174;$ $S_3 = 0; K_3 = 1;$ $S_2 = 641,48;$ $K_2 = 0,0162$ $S_1 = 43,16;$ $K_1 = 0,01547$	$\alpha = 0,454; \eta = 0,52;$ $\beta_1 = 0; \beta_2 = 0;$ $\rho = 174,19; S_1 = 0;$ $K_3 = 1; S_3 = 64884;$ $K_2 = 0,0162;$ $S_1 = 42,5;$ $K_1 = 0,01549$	$\alpha = 0,454;$ $\beta_1 = 0,116; \eta = 0;$ $\beta_2 = 0; \rho = 185,72$ $S_3 = 116,1;$ $K_3 = 0,0069;$ $S_2 = 525; K_2 = 0,0162$ $S_1 = 40,73$ $K_1 = 0,0155$	$\alpha = 0,454; \beta_1 = 0;$ $\eta = 0; \beta_2 = 0,11595;$ $\rho = 189,37$ $S_3 = 101,7;$ $K_3 = 0,00707;$ $S_2 = 532,081;$ $K_2 = 0,06; S_1 = 40,93;$ $K_1 = 0,0155$	$\alpha = 0,454; \eta = 0;$ $\beta_1 = 0,04378;$ $\beta_2 = 0,0388;$ $\rho = 185,857; S_3 = 71,8$ $K_3 = 0,0075;$ $S_2 = 5577;$ $K_2 = 0,0155;$ $K_1 = 0,0162; S_1 = 40,93$
Матрицы системы	$M_x = \begin{pmatrix} -1 & -78,71 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ $M_y = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$M_x = \begin{pmatrix} -1 & -81,5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ $M_y = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$M_x = \begin{pmatrix} -1 & -78,20 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ $M_y = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$M_x = \begin{pmatrix} -1 & -78,7 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ $M_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$M_x = \begin{pmatrix} -1 & -83,51 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ $M_y = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$M_x = \begin{pmatrix} -1 & -87,44 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ $M_y = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$M_x = \begin{pmatrix} -1 & -84,95 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ $M_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$
входные	X	$x_0 = 1,5;$ $x_k = -1,71$	$x_0 = 1,5;$ $x_k = -1,74$	$x_0 = 1,5;$ $x_k = -1,7$	$x_0 = 1,5;$ $x_k = -1,73$	$x_0 = 1,5;$ $x_k = -1,75$	$x_0 = 1,5$ $x_k = -3 \cdot 10^{-3}$
	X'	$x'_0 = 3 \cdot 10^{-3};$ $x'_k = -3 \cdot 10^{-3}$	$x'_0 = 3 \cdot 10^{-3};$ $x'_k = -3 \cdot 10^{-3}$	$x'_0 = 3 \cdot 10^{-3};$ $x'_k = -3 \cdot 10^{-3}$	$x'_0 = 3 \cdot 10^{-3};$ $x'_k = -3 \cdot 10^{-3}$	$x'_0 = 3 \cdot 10^{-3};$ $x'_k = -3 \cdot 10^{-3}$	$x'_0 = 3 \cdot 10^{-3};$ $x'_k = -3 \cdot 10^{-3}$
выходные	Y	$y_0 = 1,5;$ $y_k = -1,5$	$y_0 = 1,5;$ $y_k = -1,5$	$y_0 = 1,5;$ $y_k = -1,5$	$y_0 = 1,5;$ $y_k = -1,5$	$y_0 = 1,5;$ $y_k = -1,5$	$y_0 = 1,5$ $y_k = -1,5$
	Y'	$y'_0 = 3 \cdot 10^{-3};$ $y'_k = -3 \cdot 10^{-3}$	$y'_0 = 3 \cdot 10^{-3};$ $y'_k = -3 \cdot 10^{-3}$	$y'_0 = 3 \cdot 10^{-3};$ $y'_k = -3 \cdot 10^{-3}$	$y'_0 = 3 \cdot 10^{-3};$ $y'_k = -3 \cdot 10^{-3}$	$y'_0 = 3 \cdot 10^{-3};$ $y'_k = -3 \cdot 10^{-3}$	$y'_0 = 3 \cdot 10^{-3};$ $y'_k = -3 \cdot 10^{-3}$

где $\vec{x}_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ x_k \\ \frac{\Delta \rho}{\rho} \end{pmatrix}$ — векторы на входе в системы; $\vec{x}_k = \begin{pmatrix} x_k \\ x'_k \\ \frac{\Delta \rho}{\rho} \end{pmatrix}$ — векторы на выходе из систем;

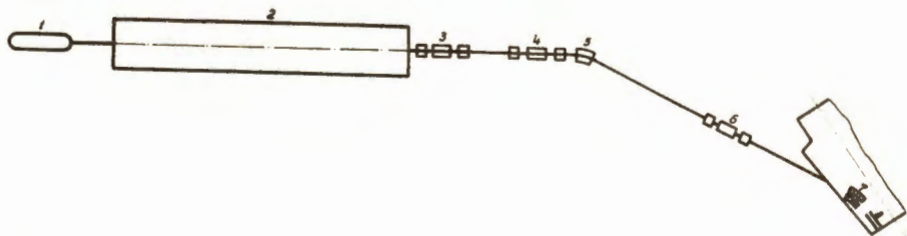


Рис. 1. Система ввода пучка в синхротрон. 1 - форинжектор, 2 - линейный ускоритель, 3-4 - линзы системы согласования, 5-7 - поворотно-фокусирующая ахроматическая система, 8 - электростатический конденсатор.

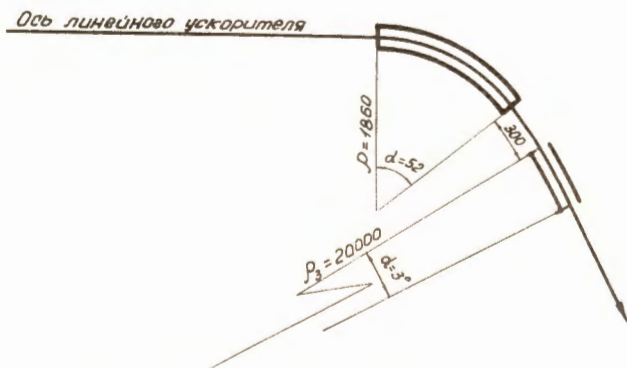


Рис. 2. Поворотно-фокусирующая система, рассмотренная в примере.

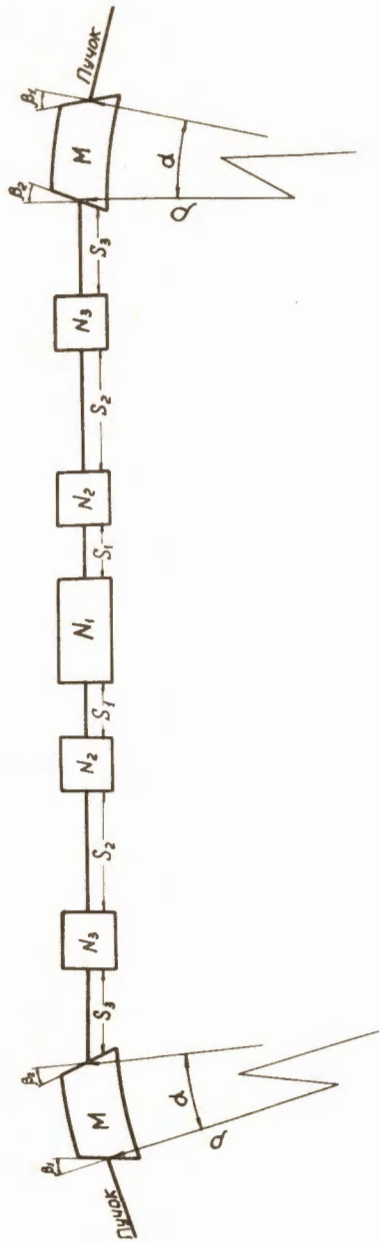


Рис. 3. Общий вид ахроматической поворотно-фокусирующей системы.
 М - поворотные магниты, N_1 ; N_2 ; N_3 - квадруполь.

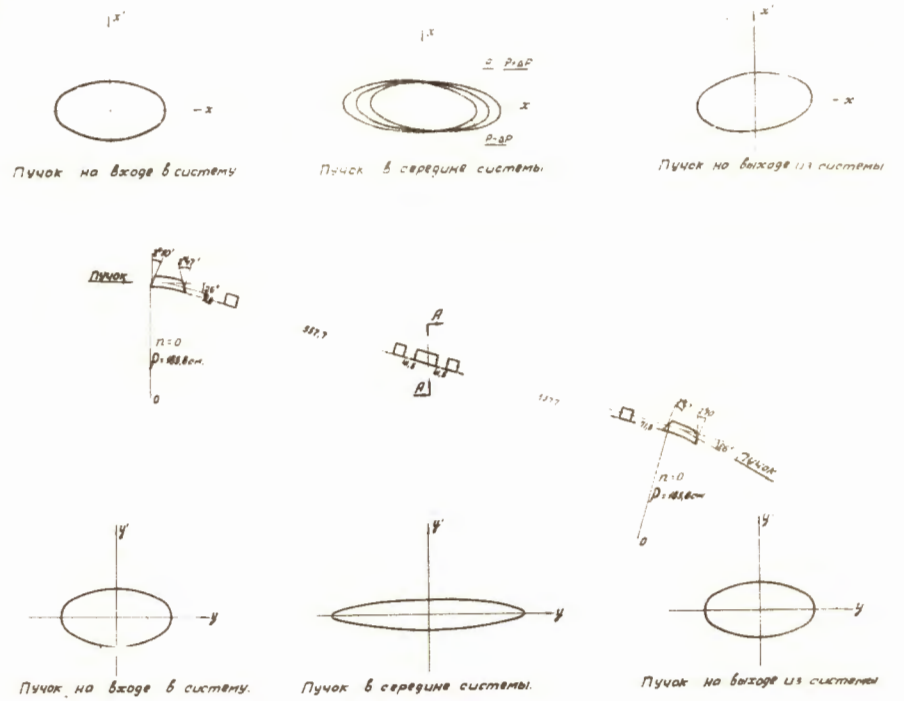
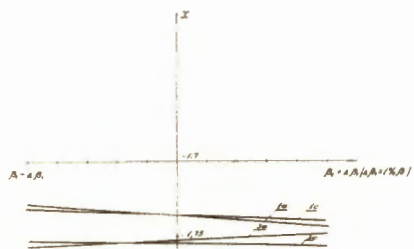
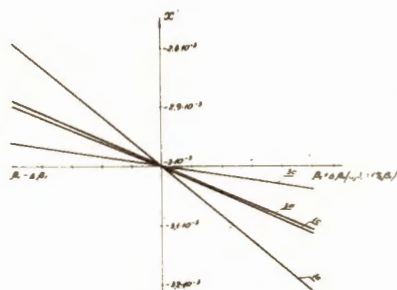


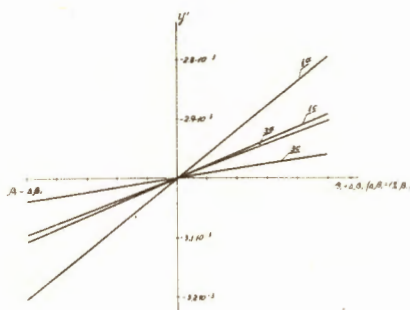
Рис. 4. Прохождение пучка через ахроматическую систему (случай 3с).



а)



б)



в)

Рис. 5. Влияние изменения величины β_1 вблизи расчетного значения β_0 а) на горизонтальный размер пучка x , б) на угловой размер пучка x' , в) на угловой размер пучка y' . Размер пучка по вертикали y при данных изменениях β_1 остается постоянным.

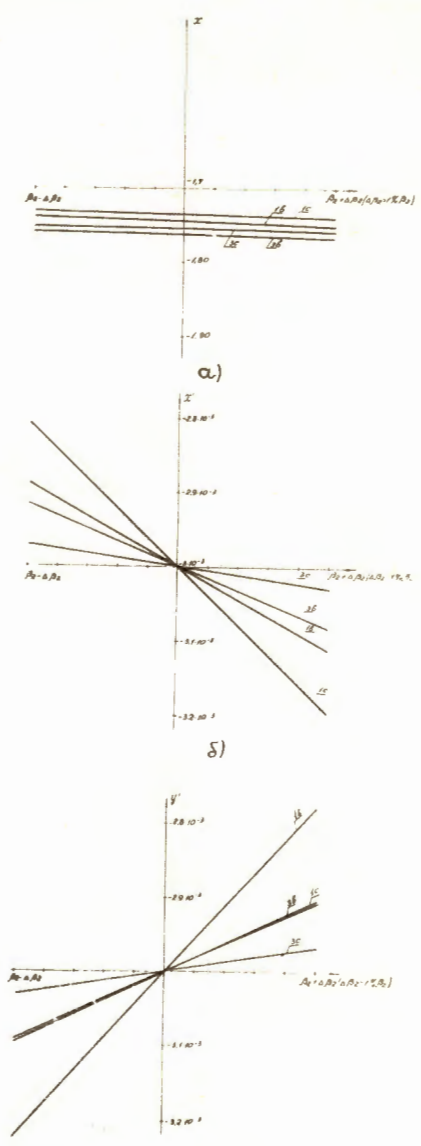
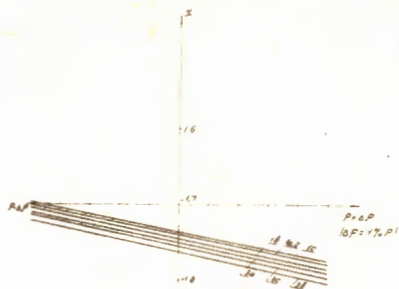
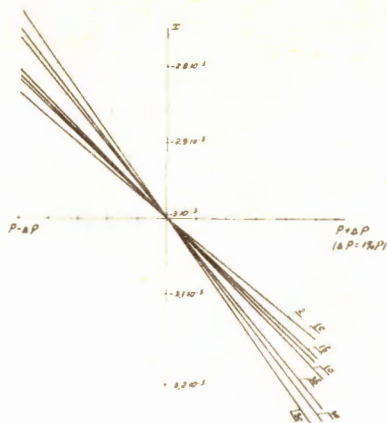


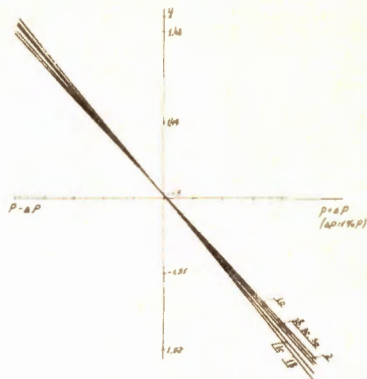
Рис. 6. Влияние изменения величины β_2 вблизи расчетного значения β_2' а) на горизонтальный размер пучка x , б) на угловой размер пучка y' , в) на угловой размер пучка y'' . Размер пучка по вертикали y при данных изменениях β_2 остается постоянным.



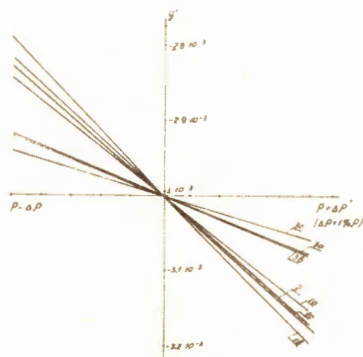
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Влияние изменения величины ρ вблизи расчетного значения ρ_0 а) на горизонтальный размер пучка x , б) на угловой размер пучка x' , в) на вертикальный размер пучка y , г) на угловой размер пучка y' .