

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

C 3450
Т-19



15/1-79

175/2-79

P9 - 11809

Н.И.Тарантин

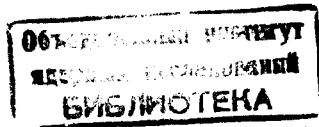
НОВАЯ ФОРМА КОЭФФИЦИЕНТОВ
ЛИНЕЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПУЧКА
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В МАГНИТНОМ КВАДРУПОЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ
Часть II. Рассеивающая плоскость

1978

P9 - 11809

Н.И.Тарантин

НОВАЯ ФОРМА КОЭФИЦИЕНТОВ
ЛИНЕЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПУЧКА
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В МАГНИТНОМ КВАДРУПОЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ
Часть II. Рассеивающая плоскость



Тарантин Н.И.

P9 - 11809

Новая форма коэффициентов линейного преобразования пучка заряженных частиц в магнитном квадрупольном элементе.
Часть II. Рассеивающая плоскость

В линейном приближении рассмотрено движение заряженных частиц в поле квадрупольного магнита с использованием нового метода, заключающегося в сопряжении двух частных решений уравнения траектории частицы, определяемых соответственно начальными и конечными координатами частицы, и введении новых параметров. Получена новая, более простая форма коэффициентов линейного преобразования пучка частиц, более удобных для проведения расчетов. Найден прием графического определения параметров магнитного квадрупольного элемента и коэффициентов линейного преобразования, существенно облегчающие поиск необходимых значений параметров. Эти значения могут быть использованы непосредственно или как хорошее приближение для дальнейшего уточнения на ЭВМ. В этой части работы рассмотрено преобразование в главной рассеивающей плоскости.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1978

Tarantin N.I.

P9 - 11809

New Form of Coefficients for Linear Transformation of the Charged Particle Beam in the Magnet Quadrupole Element, Part II, The Diverging Plane

In linear approximation the motion of charged particles in a quadrupole magnet field is considered. A new method is used in which two particular solutions for the particle trajectory equation are joined, determined with initial and final particle coordinates, and new parameters are introduced. A new simpler form of the linear transformation coefficient has been obtained. Some methods of graphical determination of parameters of a magnetic quadrupole element and of linear transformation coefficients are found. These values could be used directly or as a good approximation for further calculations. This paper deals with the problem of transformation in the principal diverging plane of the quadrupole magnet.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе /1/ были получены в новой, более простой форме коэффициенты линейного преобразования пучка заряженных частиц, производимого квадрупольным магнитом в собирающей плоскости. Там же был предложен новый прием графического определения параметров и коэффициентов линейного преобразования, производимого в собирающей плоскости магнитным квадрупольным элементом.

В настоящей работе те же вопросы рассматриваются для рассеивающей плоскости магнитного квадрупольного элемента.

2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В РАССЕИВАЮЩЕЙ ПЛОСКОСТИ МАГНИТНОГО КВАДРУПОЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Траектории заряженной частицы в рассеивающей плоскости магнитного квадрупольного элемента схематически представлены на рис. 1, там же даны принятые обозначения. Движение частицы в этой плоскости описывается уравнением /46/ /1/.

Применим ранее использовавшийся прием /1/ для рассмотрения движения в рассеивающей плоскости квадрупольного элемента. Тогда

$$z_1(x) = (z_1 + \beta_1 L_1) \operatorname{ch} kx + \frac{\beta_1}{k} \operatorname{sh} kx,$$

$$z_2(x) = (z_2 - \beta_2 L_2) \operatorname{ch} k(L_0 - x) - \frac{\beta_2}{k} \operatorname{sh} k(L_0 - x),$$

/1/

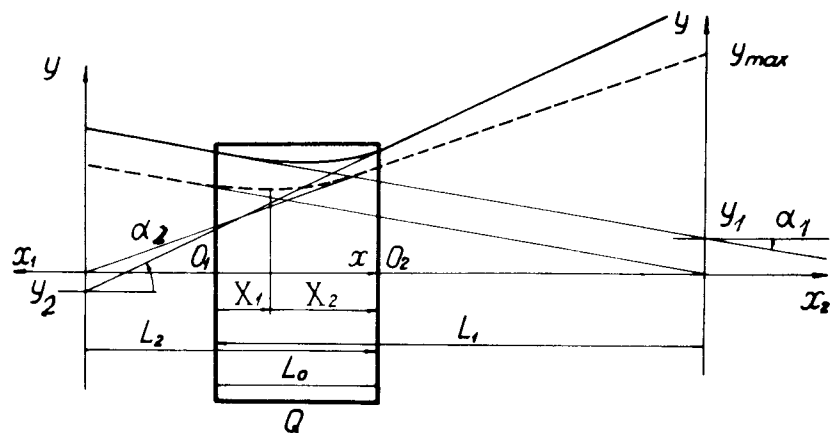


Рис.1. Траектории заряженной частицы в главной рассеивающей плоскости /у=0/ магнитного квадрупольного элемента. Штриховая кривая - траектория, характеризующая преобразование пучка частиц типа "квази-проектор".

где z_1 и z_2 - координаты, а β_1 и β_2 - проекции на главную рассеивающую плоскость xz углов наклона траектории частицы к оси квадрупольного магнита соответственно при выходе из источника и при приходе на приемник, $|\beta_i| \ll 1$, $i=1,2$.

Представим z_1 и z_2 в единицах L_0 : $\zeta_i = z_i/L_0$, и положим $\zeta_i \ll 1$, $i=1,2$. Тогда оказывается возможным линейное приближение

$$\zeta_2 = Z_\zeta \zeta_1 + Z_\beta \beta_1 \quad \text{и} \quad \beta_2 = B_\zeta \zeta_1 + B_\beta \beta_1. \quad /2/$$

Совместив траектории $z_1(x)$ и $z_2(x)$ описанным выше /1/ способом и решив полученные при этом системы уравнений, найдем:

$$Z_\zeta = c_1(\kappa l_2 s_2 + c_2) + \kappa s_1(l_2 c_2 + s_2/\kappa) = c + \kappa l_2 s,$$

$$B_\zeta = \kappa(s_1 c_2 + c_1 s_2) = \kappa s,$$

$$Z_\beta = (l_1 c_1 + s_1/\kappa)(\kappa l_2 s_2 + c_2) + (\kappa l_1 s_1 + c_1)(l_2 c_2 + s_2/\kappa) = \\ + (l_1 + l_2)c + \left(\frac{1}{\kappa} + \kappa l_1 l_2\right)s,$$

$$B_\beta = (\kappa l_1 c_1 + c_1)c_2 + (l_1 c_1 + s_1/\kappa)\kappa s_2 = c + \kappa l_1 s, \quad /3/$$

где $s_i = \text{sh}\kappa X_i$, $c_i = \text{ch}\kappa X_i$, $i=1,2$, $X_1 + X_2 = L_0$, $\kappa L_0 = \kappa$, $s = \text{sh}\kappa$, $c = \text{ch}\kappa$.

Детерминант матрицы преобразования /2/ с элементами, определяемыми формулами /3/, равен единице: $Z_\zeta B_\beta - Z_\beta B_\zeta = 1$.

Найденные коэффициенты преобразования /3/ по форме записи идентичны коэффициентам /12/ /1/, но существенно отличаются от них тем, что выражаются через гиперболические, а не круговые функции. Поэтому возможности обращения в нуль каждого из коэффициентов /3/, необходимого для осуществления определенного преобразования, ограничены. В частности, преобразование типа "телескоп" вообще невозможно, поскольку $c_1 \neq 0$ и $c_2 \neq 0$ при любых значениях X_1 и X_2 , а равенства $s_1 = s_2 = 0$ означают отсутствие квадрупольного магнита / $L_0 = 0$ /. Преобразования, подобные преобразованиям типа "зажигательное стекло" /параллельный пучок преобразуется в мнимую точку/ и "конденсор" /пучок, сходящийся в мнимую точку, преобразуется в параллельный/ осуществимы только при одном способе преобразования, при котором основные траектории параллельны оси x в точке $x = X_1$. В таблице представлены условия, необходимые для осуществления того или иного типа преобразования пучка заряженных частиц, и коэффициенты линейного преобразования. При преобразовании типа "квазипроектор" верхнее условие отвечает параллельному оси x ходу траекторий или их продолжений в точке $x = X_1$ /как представлено на рис. 1/, нижнее условие - пересечению траекторий или их продолжений с осью x в той же точке. Значения параметров, определяющих условия и коэффициенты преобразования,

Таблица

Условия и коэффициенты линейного преобразования пучка заряженных частиц магнитным квадрупольным элементом в рассеивающей плоскости

Тип и условия осуществления преобразования	Коэффициенты			
	Zζ	Bζ	Zβ	Bβ
Квазизажигательное стекло $\kappa l_2 = -\text{cth}\kappa$	0	$\kappa S = -\frac{C}{l_2}$	$-\frac{1}{\kappa S} = -\frac{l_2}{C}$	$\alpha(1 - \frac{l_1}{l_2})$
Квазипроектор $\kappa l_1 = -\text{cth}\kappa X_i$ $\kappa l_i > 1$ $\kappa l_i = -\text{th}\kappa X_i$ $i=1,2 \quad \kappa l_i < 1$	$-\frac{s_1}{s_2} = -\frac{l_2 c_1}{l_1 c_2}$ $\frac{c_1}{c_2} = \frac{l_2 s_1}{l_1 s_2}$	κS	0	$-\frac{s_2}{s_1} = -\frac{l_1 c_2}{l_2 c_1}$ $\frac{c_2}{c_1} = \frac{l_2 s_1}{l_1 s_2}$
Квазиконденсор $\kappa l_1 = -\text{cth}\kappa$	$c(1 - \frac{l_2}{l_1})$	$\kappa S = -\frac{C}{l_1}$	$\frac{1}{\kappa S} = \frac{l_1}{C}$	0

заклучены в следующих пределах: $-\infty < l_i < \infty$, $\infty < \kappa X_i < \infty$, $i=1,2$.

Максимальное отклонение траекторий частиц в рассеивающей плоскости от оси x в пределах квадрупольного элемента определяется следующим образом: при преобразовании типа "квазизажигательное стекло" $\zeta_{\max} = c|\zeta_1|_{\max}$. При преобразовании типа "квазипроектор" $\zeta_{\max} = -l_1|\beta_1|_{\max}$ для $l_1 < 0$ и $l_2 > 0$, $\zeta_{\max} = -l_2|B\beta||\beta_1|_{\max}$ для $l_1 < 0$ и $l_2 > 0$; в случае $l_1 < 0$ и $l_2 < 0$ ζ_{\max} определяется большей из следующих двух величин, $\zeta_{\max} = -(l_1 + l_2 + 1)|\beta_1|_{\max}$ или $\zeta_{\max} = -(l_1 + l_2 + 1)|B\beta||\beta_1|_{\max}$. При преобразовании типа "квазиконденсор" $\zeta_{\max} = -l_1|\beta_1|_{\max}$.

Для поиска параметров магнитного квадрупольного элемента в рассеивающей плоскости, определяемых условиями, представленными в первом столбце таблицы, служат графики рис. 2. На рис. 2 приведены значения κl_i в зависимости от κX_i , построенные, исходя из соотношений $\kappa l_i = \pm \text{th}\kappa X_i$ и $\kappa l_i = \pm \text{cth}\kappa X_i$, $i=1,2$. Метод определения параметров магнитного квадрупольного элемента в рассеивающей плоскости повторяет аналогичный способ для собирающей плоскости. Например, для определения величины l_2 по известным параметрам l_1 и κ при преобразовании типа "квазипроектор" необходимо к абсциссе a'' точки a , лежащей на одной из кривых κl_1 и имеющей ординату κl_1 , прибавить величину κ . Найденное значение b'' является абсциссой точки b , лежащей на кривой того же типа, что и кривая для точки a /типа th или типа cth /ордината которой равна искомому значению κl_2 . Приведенное на рис. 2 построение представляет преобразование, данное на рис. 1.

При преобразованиях типа "квазизажигательное стекло" или "квазиконденсор" для поиска параметров магнитного квадрупольного элемента необходимо брать $\kappa l_1 = \infty$ или $\kappa l_2 = \infty$.

Прием графического определения непосредственно параметров магнитного квадрупольного элемента l_1, l_2 и κ для заданного типа преобразования в рассеивающей плоскости, аналогичный представленному на рис. 3^{1/1}, более сложен. Это связано с тем, что обратные гипер-

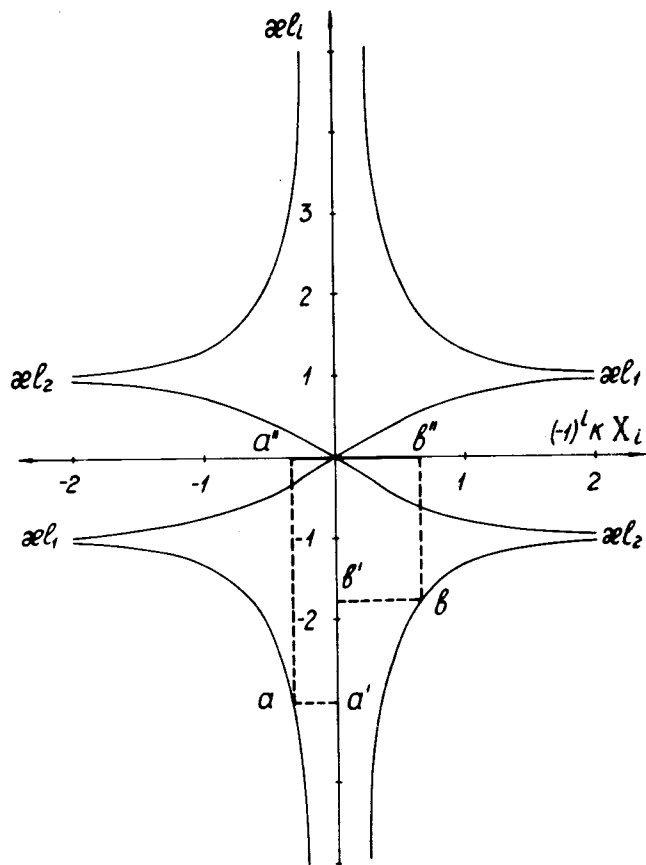


Рис.2. Первый способ графического определения параметров l_1, l_2 и κ магнитного квадрупольного элемента в рассеивающей плоскости.

Гиперболические функции Arctg th и Arctg cth выражаются через площадь в отличие от Arctg и Arctg ctg , которые наглядно выражаются через дугу угла соответствующим образом построенного треугольника. Однако, несмотря на это, в ряде случаев все же возможен графический метод для приближенного определения непосредственных параметров магнитного квадрупольного элемента в рассеивающей плоскости. Это построение основывается на том, что, например, в областях значений $\kappa |l_i| \geq 2,5$ и

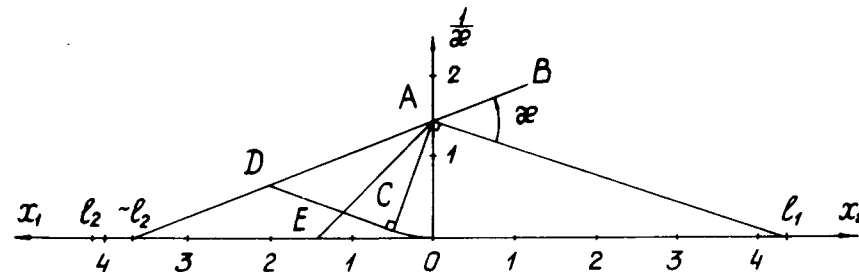


Рис.3. Второй способ графического приближенного определения параметров l_1, l_2, κ и коэффициентов линейного преобразования пучка заряженных частиц в рассеивающей плоскости магнитного квадрупольного элемента.

$$Z_{\zeta} \approx -l_2 A / l_1 A, \quad B_{\zeta} \approx 1/AD, \quad B_{\beta} \approx -l_1 A / l_2 A.$$

при $\kappa |l_i| \leq 0,4$ гиперболические функции $\text{cthg} X_i$ и $\text{thg} X_i$ можно аппроксимировать с точностью не хуже 10% соответственно круговыми функциями $\text{ctg} X_i$ и $\text{tg} X_i$ с теми же значениями аргументов. Поэтому в тех случаях, когда ни κl_1 , ни κl_2 не выходят за указанные пределы, возможен аналогичный представлению на рис. 3 графический метод приближенного определения непосредственных параметров магнитного квадрупольного элемента с точностью, указанной выше.

Кроме того, при $\kappa |X_i| \geq 1,5$ функции $\text{cthg} X_i$ и $\text{thg} X_i$ отличаются от прямой, определяемой уравнением $\kappa |l_i| = 1$, также не более чем на 10%. Это обстоятельство можно использовать при приближенном определении параметров магнитного квадрупольного элемента в рассеивающей плоскости.

Метод графического определения непосредственно параметров магнитного квадрупольного элемента для случая, когда $\kappa |l_i| \geq 2,5, i=1,2$, показан на рис. 3. Этот метод в основном повторяет способ построения для собирающей плоскости. Отличие состоит в том, что при построении для рассеивающей плоскости в точке A откладывается угол $l_1 AB$ в направлении против движения часовой стрелки. Как можно видеть, в этом случае

$$\text{ctg} \angle A l_1 O = -\kappa l_1 = \text{cthg} X_1 \approx \text{ctg} X_1,$$

$$\angle A l_1 O \approx \kappa X_1, \quad \text{ctg} \angle A l_2 O = -\kappa l_2 = \text{cthg} X_2 \approx \text{ctg} X_2,$$

$$\angle A l_2 O \approx \kappa X_2, \quad \angle l_1 AB = \kappa = \angle A l_1 O + \angle A l_2 O \approx \kappa (X_1 + X_2)$$

и, таким образом, условие преобразования типа "квази-проектор" для $\kappa |l_i| > 1$ приблизительно выполняется.

Приближенное значение l_2 , полученное графическим методом, на *рис. 3* отмечено символом $\approx l_2$, тогда как точное значение, найденное методом, представленным на *рис. 2*, обозначено символом l_2 . Разница этих значений $\approx 10\%$.

Приближенное значение коэффициентов линейного преобразования пучка частиц, производимого квадрупольным элементом в рассеивающей плоскости, также определяется из элементов построения:

$$Z_{\zeta} = -s_1/s_2 \approx -l_2 A/l_1 A, \quad B_{\zeta} = \kappa s \approx 1/AD,$$

$$B_{\beta} = -s_2/s_1 \approx -l_1 A/l_2 A.$$

При κ , достаточно большом, величина κl_2 может выйти за пределы интервала значений $\kappa |l_2| \geq 2,5$ и указанное графическое построение не будет давать достаточно приближенного значения l_2 . Однако в этом случае как отмечалось выше, предельное значение $\kappa |l_2|$ равно единице, что значит, что отрезок Al_2 по мере роста κ перемещается к положению AE , определяемому углом АЕО, равным 45° . Это обстоятельство существенно уменьшает неопределенность при приближенном поиске l_2 .

Приближенное построение в области значений $\kappa |l_i| \leq 0,4$ производится таким же образом, но с тем отличием, что угол $l_1 AB$ откладывается по направлению движения часовой стрелки.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ МАГНИТНЫХ КВАДРУПОЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассмотренные примеры определения параметров отдельного магнитного квадрупольного элемента в собирающей и рассеивающей плоскостях удобно применить и для поиска параметров систем из квадрупольных элементов - дублетов, триплетов и т.д. Случайный поиск

при этом оказывается трудоемким, несмотря на упрощенные формулы для расчетов и графические приемы. Значительное убыстрение определения параметров системы дает предлагаемый ниже прием направленного поиска. Сущность приема проиллюстрируем на примере поиска параметров дублета квадрупольных магнитов для преобразования типа "проектор" в обеих плоскостях.

Допустим, что нужно получить $l_{11} = 3, l_{22} = 5$ при $D = 1$, где D - расстояние между выходной границей первого и входной границей второго квадрупольного магнита, а второй индекс при ранее введенных символах l_i указывает номер квадрупольного магнита. Пусть также для общности $L_{02} = 2$, где длина второго магнита, так же как и приведенные выше величины, выражена в единицах длины первого магнита L_{01} . Необходимо найти значения κ_1 и κ_2 .

Из рассмотрения условий преобразования пучка в cd плоскости дублета / cd означает, что первый квадрупольный магнит в этой плоскости собирающий, а второй - рассеивающий/ следует, что первый квадрупольный магнит должен обеспечить, по крайней мере, $l_{21}^c = 1 \div 8$, т.е. $l_{12}^d = 0 \div -7$. В этом случае при $\kappa_2 = \infty \div 0$ может быть получено значение $l_{22}^d = 5$. Значения κ_1 , отвечающие этим условиям, находим, например, методом графического построения: $0,65 \leq \kappa_1 \leq 1,0$. Простым расчетом с помощью графиков *рис. 1* определяем, что для диапазона указанных значений κ_1 $-1,8 \leq l_2^d \leq -1,1$ и, следовательно, $2,8 \geq l_{12}^c \geq 2,1$. Значения κ_2 , обеспечивающие $l_{22}^c = 5$ при выделенном интервале значений l_{12}^c снова находим методом графического построения: $0,50 \leq \kappa_2 < 0,54$, где $\kappa_2 = \kappa_2 L_{02}$. Снова с помощью *рис. 2* находим, что при этих значениях κ_2 необходимые для обеспечения $l_{22}^d = 5$ значения l_{21}^d должны лежать в интервале $-2,24 \leq l_{21}^d \leq -2,06$. Это значит, что $3,24 \geq l_{21}^c \geq 3,06$, и тогда для κ_1 должно быть $0,78 \leq \kappa_1 \leq 0,79$. Таким образом, в результате проведения одного цикла направленного поиска неопределенность величины κ_1 уменьшилась с $0,35$ до $0,01$. Продолжая поиск далее, тем же методом находим $\kappa_1 = 0,784$ и $\kappa_2 = 0,515$.

Аналогичным образом ведется поиск параметров триплета квадрупольных магнитов, а именно, он сводится к поиску параметров дублета, образуемого, например, двумя последними квадрупольными магнитами при каком-либо значении κ для первого квадрупольного магнита, определяющем положение виртуального источника в каждой из двух плоскостей дублета.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в работе ^{1/1} и в настоящей статье методы графического определения параметров и коэффициентов магнитных квадрупольных элементов совместно с аналогичными графическими методами для магнитных дипольных элементов, изложенными в работах ^{1/2}, были применены для поиска оптимального варианта и расчета параметров и коэффициентов для установки снижения, коммутации и монохроматизации пучка ускоренных тяжелых ионов изохронного циклотрона У-400. В качестве иллюстрации использования этих методов на рис. 4 приведены соответствующие графические построения, определяющие все необходимые параметры системы снижения для одного из рассмотренных вариантов транспортировки выведенных из циклотрона ускоренных частиц ^{1/3}. Параметры магнитных дипольных элементов, определяющие указанные выше преобразования, равны: в радиальной плоскости $\Phi = 90^\circ$, $a_F = 0$, $\epsilon = 23,7^\circ$, $\psi_{11} = \psi_{12} = 23,7^\circ$, $\psi_{21} = \psi_{22} = 66,3^\circ$, $L_{21} = L_{12} = 0,54 R_0$, $R_0 = 100$ см, в аксиальной плоскости $\chi_{11} = \chi_{22} = 2,28$, $\chi_{21} = \chi_{12} = -0,71$, $L_{21} = L_{12} = 0,54$.

В представленном варианте транспортировки частиц параметры магнитных дипольных элементов выбраны, исходя из условия осуществления преобразования типа "телескоп" одновременно в радиальной и аксиальной плоскостях со стигматической перетяжкой пучка в промежутке между магнитами. Такое преобразование пучка частиц обеспечивает приблизительно одинаковые условия для их транспортировки через второй дипольный магнит (D_2) при любом его повороте вокруг вертикальной оси входящего в него пучка, необходимом для коммутации пучка по горизонтальным каналам.

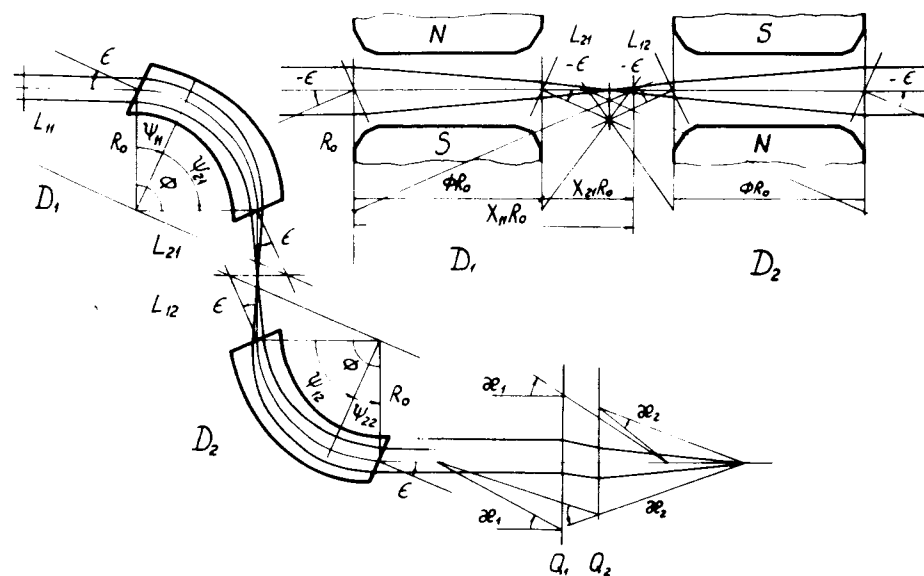


Рис. 4. Графические построения для определения параметров магнитных дипольных и квадрупольных элементов системы снижения, коммутации и монохроматизации пучка циклотрона У-400 и коэффициентов линейного преобразования пучка заряженных частиц.

Параметры системы магнитных квадрупольных элементов Q_1 и Q_2 следующие: $\kappa_1 = 0,557$, $\kappa_2 = 0,670$, $D = L_0 = 300$ мм, $l_{22} = 4$, $k_1 X_{11} = 0$, $k_1 X_{21} = 0,56$, $k_2 X_{12} = 0,32$, $k_2 X_{22} = 0,35$ в плоскости dc и $k_1 X_{11} = 0$, $k_1 X_{21} = 0,56$, $k_2 X_{12} = 1,07$, $k_2 X_{22} = -0,40$ в плоскости cd .

Построения для определения параметров квадрупольных магнитов при преобразовании пучка частиц в аксиальном сечении пучка по отношению к дипольным магнитам даны над осью квадрупольных магнитов. Построения, определяющие ход траекторий в радиальной плоскости, приведены под осью квадрупольных магнитов. В связи с этим направления отсчета углов l_1 , AB взяты обратными по отношению к указанным в тексте.

Как пример предлагаемой формы выражения коэффициентов линейного преобразования пучка частиц ниже

приведены расчеты двух коэффициентов, определяющих размер изображения на выходе системы $\Delta\eta_8$ и $\Delta\zeta_8$ в зависимости от разброса начальных углов пучка частиц $\Delta\alpha_1$ и $\Delta\beta_1$: $\Delta\eta_8 = H_\alpha \Delta\alpha_1$ и $\Delta\zeta_8 = Z_\beta \Delta\beta_1$.

$$H_\alpha = H_{\eta Q2} Z_{\beta Q1} (-A_{\eta D2}) H_{\alpha D1} =$$

$$= \left(-\frac{\text{sh} \kappa_1 X_{12}}{\text{sh} \kappa_2 X_{22}} \right) \left(-\frac{1}{\kappa_1 \text{sh} \kappa_1} \right) \left(-\frac{R_0 \cos \psi_{12}}{L_{12} \cos \psi_{22}} \right) \left(\frac{L_{21} \cos \psi_{11}}{R_0 \cos \psi_{21}} \right) = 2,815,$$

что отвечает, если учесть, что η_8 выражено в единицах $L_0 = 300 \text{ мм}$, $0,845 \text{ мм/мрад}$.

$$Z_\beta = (-Z_{\zeta Q2}) (-H_{\alpha Q1}) (-B_{\zeta D2}) Z_{\beta D1} =$$

$$= \left(-\frac{\text{sh} \kappa_2 X_{12}}{\text{sh} \kappa_2 X_{22}} \right) \left(-\frac{1}{\kappa_1 \sin \kappa_1} \right) \left(-\frac{R_0 X_{12}}{L_{12} X_{22}} \right) \left(-\frac{L_{21} X_{11}}{R_0 X_{21}} \right) = 10,63,$$

или $3,190 \text{ мм/мрад}$.

Компактность и симметрия записи выражений для коэффициентов и простота их расчетов по сравнению с известными методами расчета очевидны.

В заключение выражаю благодарность академику Г.Н.Флерову за предложение рассмотреть вопросы коммутации и монохроматизации пучка циклотрона У-400, стимулировавшие выполнение настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарантин Н.И. ОИЯИ, Р9-11808, Дубна, 1978.
2. Тарантин Н.И. ОИЯИ, Р9-11039, Р9-11040, Р9-11041, Дубна, 1977.
3. Тарантин Н.И. ОИЯИ, Р9-11536, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 июля 1978 года.