

C 3450

3-121

Заббаров В. Б., Маторов И. М.

1124/80



Б1-9-80-29

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-9-80-29

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1980

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория нейтронной физики

В.Б.Заббаров, И.М.Матера

51-9-80-29

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЭЛЕКТРОНОВ

ИЗ ЛИУ 30/250 НА НЕРАЗМЕРЯЕМУЮ МИШЕНЬ

L

15. 01. 80

г.Дубна, 1979 г.

Аннотация

Выбран оптимальный вариант трассы электронного пучка от его выхода из линейного индукционного ускорителя ЛИУ-30/250 до неразмножающей мишени, которая будет установлена вместо реактора ИБР-30. Длина трассы - 120 м.

По известным формулам, приближённо учитывающим действие объёмного заряда в равноплотных электронных пучках цилиндрического сечения, с помощью ЭВМ рассчитаны необходимые параметры оптических элементов трассы.

Введение.

Линейный индукционный ускоритель ЛИУ-30/250 /1/ на энергию электронов 30 МэВ, ток 250 А, длительность импульса 0,5 мксек, частоту следования 50 Гц и среднюю мощность пучка 200 кВт целесообразно использовать не только как инжектор импульсного бустера, но также и для генерации нейтронных импульсов на неразмножающей мишени.

С этой целью следует создать электроннооптический тракт от выхода из ускорителя до места расположения работающего теперь реактора ИБР-30, который будет заменён неразмножающей мишенью ЛИУ-30.

Для снижения мощности нежелательной γ -вспышки на детекторах экспериментаторов, бомбардировку мишени лучше всего делать вертикально направленным пучком, причём, с учётом композиции здания ИБР-30, более экономично бомбардировать её сверху.

В свете вышесказанного, трасса пучка на мишень, установленную вместо ИБР-30, должна включать в себя / рис. 1 /:

- а/ поворот пучка на 90° в горизонтальной плоскости,
- б/ прямую 90-метровую базу,
- в/ три последовательных поворота пучка на 90° в вертикальной плоскости, разнесённых друг от друга примерно на 10 метров. Первый поворот направляет пучок вертикально вверх, второй - горизонтально и третий - вертикально вниз.

Для поворотов дисперсионного пучка из ЛИУ-30/250 / дисперсия $\frac{\Delta E}{E} \approx \pm 5\%$ / на угол 90° нами выбрана система из двух серийных одинаковых магнитов с однородным полем СП-033 и углом поворота 45° каждый. Для поддержания требуемых поперечных размеров пучка будут использованы дублиеты типовых квадрупольных линз СП-036.

Ввиду большой мощности пучка, в тракте потери интенсивности

недопустимы, т. к. они могут привести к выходу из строя всей системы транспортировки. Рассчитанный тракт этому требованию удовлетворяет, если пучок на выходе из ШУ-30 будет достаточно ламинарным.

§ I. Уравнения движения в поворотных магнитах, квадрупольных линзах и свободных промежутках.

Транспортировка сильноочного пучка требует учёта кулоновских сил расталкивания между электронами. Наличие поворотов приводит к тому, что сечение пучка в тракте приобретает форму эллипса. Это исключает возможность использовать известные уравнения движения для аксиальносимметричного пучка. В работе /2/ получены уравнения движения для монохроматического пучка в случае его эллиптического сечения. Они получены при следующих допущениях:

- 1/ электронный пучок является ламинарным,
- 2/ при прохождении через квадрупольные линзы электронный пучок круглого сечения приобретает в поперечном сечении форму эллипса,
- 3/ величина деформации пучка в радиальном направлении мала по сравнению с длиной пучка в осевом направлении,
- 4/ плотность заряда равномерно распределена по сечению пучка,
- 5/ осевой составляющей электрического поля за счёт пространственного заряда пренебрегается,
- 6/ пренебрегается азимутальными смещениями траекторий относительно оси пучка.

Уравнения для промежутка без магнитных полей имеют вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{\mathcal{E}}{x+y} \\ \ddot{y} = \frac{\mathcal{E}}{x+y} \end{cases}, \quad \mathcal{E} = \frac{e\mathcal{I}(1-\beta^2)^{3/2}}{\pi \cdot m_0 \beta^3 \cdot \epsilon_0 \cdot v} \quad /1/$$

e, m_0, v - абсолютная величина заряда, масса покоя и скорость электрона; $\beta = \frac{v}{c}$; \mathcal{I} - ток.

x, y - координаты точки на границе эллипса.

Используя эти уравнения, можно записать уравнения /3/ для крайних электронов пучка эллиптического сечения, первоначально находящихся в точках А и В /рис.2/, при прохождении пучка через квадрупольные линзы:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dz^2} = \frac{\mathcal{L}}{x+y} \pm Kx \\ \frac{d^2y}{dz^2} = \frac{\mathcal{L}}{x+y} \mp Ky \end{cases}, \quad \mathcal{L} = \frac{\mathcal{E}}{v^2} \quad /2/$$

Величина K представляет собой отношение градиента магнитного поля в квадрупольной линзе к импульсу частицы.

Для пучка из ЛИУ-30/250:

$$E = 30 \text{ МэВ}, \mathcal{I} = 250 \text{ А}, \beta = 0,99985, \gamma = 58,708, \mathcal{L} = 3,04 \cdot 10^{-7}$$

Как уже отмечалось, для поворота пучка будут использованы секторные магниты с однородным полем. Для упрощения расчётов мы пренебрегаем краевыми эффектами и влиянием объёмного заряда в этих магнитах. Тогда уравнение движения в медианной плоскости имеет вид:

$$x'' + \frac{x}{\rho} = \frac{\delta}{\rho} \quad /3/$$

δ - относительное отклонение энергии частицы от номинала.

ρ - радиус кривизны равновесной траектории в поворотном магните.

В плоскости, перпендикулярной медианной плоскости магнита, магнитное поле не влияет на пучок, и последний проходит его как свободный промежуток длиной $d \cdot \beta / \alpha$ - угол поворота α .

Уравнения движения в этом случае имеют вид:

$$y'' - \frac{e}{\chi_{эл} + y} = 0, \quad \chi_{эл} = \chi_k - A \quad /4/$$

A - координата центра тяжести пучка,

χ_k - координата крайнего электрона.

Дифференцирование в /3/ и /4/ вдоль направления касательной к равновесной траектории. Решение /3/ можно записать в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} \chi \\ \chi' \\ \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha; & \beta \sin \alpha; & \beta(1 - \cos \alpha) \\ -\frac{\sin \alpha}{\beta}; & \cos \alpha; & \sin \alpha \\ 0; & 0; & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \chi_0 \\ \chi'_0 \\ \delta \end{pmatrix} \quad /5/$$

тогда /4/ можно переписать в виде:

$$y'' - \frac{e}{\chi \cdot \cos \alpha + \beta \sin \alpha \cdot \chi'_0 - A \cdot (\cos \alpha - \beta \sin \alpha \cdot \chi'_0) + y} = 0 \quad /6/$$

На входе в первую пару поворотных магнитов были приняты начальные данные: $\chi_0 = y_0 = 1 \cdot 10^{-2}$ м, $\chi'_0 = y'_0 = 3 \cdot 10^{-6}$ рад для всех электронов в рассмотренном диапазоне энергий.

§2. Программа расчёта, результаты и некоторые практические замечания к конструированию системы транспортировки пучка на независимую мишень.

Для расчёта тракта были составлены две программы. Первая для проводки монохроматического пучка с энергией 30 МэВ. Вторая программа - для электронов с энергией, отличающейся на $\pm 5\%$ от

номинальной. Расчёты позволили выбрать градиенты квадрупольных линз, расстояния между квадрупольными линзами, а также оптимальные расстояния между секторными магнитами.

Для решения дифференциальных уравнений была использована стандартная программа **JNTSP**, основанная на методе Рунге-Кутты.

Полученные градиенты дублетов квадрупольных линз представлены в таблице I.

№ дублета	э/см	э/см
Д1	5	6
Д2	4	6
Д3	8	8
Д4	7	6
Д5	2	1
Д6	8	7
Д7	7	7
Д8	8	7
Д9	8	1
Д10	8	4

Таблица I. Градиенты дублетов квадрупольных линз.

Поперечные сечения пучка на участках трассы показаны на рис. 3. Результаты расчёта позволяют провести пучок с дисперсией $\pm 5\%$ без потерь.

Надёжность работы данной системы будет обеспечена за счёт слежения поля поворотных магнитов и линз за медленными колебаниями средней энергии электронов пучка и за счёт аварийного отключения питания источника ЛИУ-3С/250 при быстрых и недопустимых по амплитуде изменениях.

В заключение следует отметить, что данная система транспортировки будет довольно сложна в наладке и работе, однако такой вариант потребует наименьшего количества строительных переделок имеющихся в наличии помещений.

Взависимости от

Литература

1. В.Д.Ананьев, Д.И.Блохинцев и др. ОИЯИ, 13-4392, Дубна, 1969.
Ю.П.Вахрушин, И.М.Матора. У.Ф.Н., 110, VI, 117, 1973.
2. В.А.Кочегуров и др. "Применение аналоговых вычислительных машин для исследования движения заряженных частиц", М., "Атомиздат", 1970.
3. Тарасов В.С. Основы теории и конструирования математических машин непрерывного действия. Труды Ленинградского политехнического института, Л., 1961.

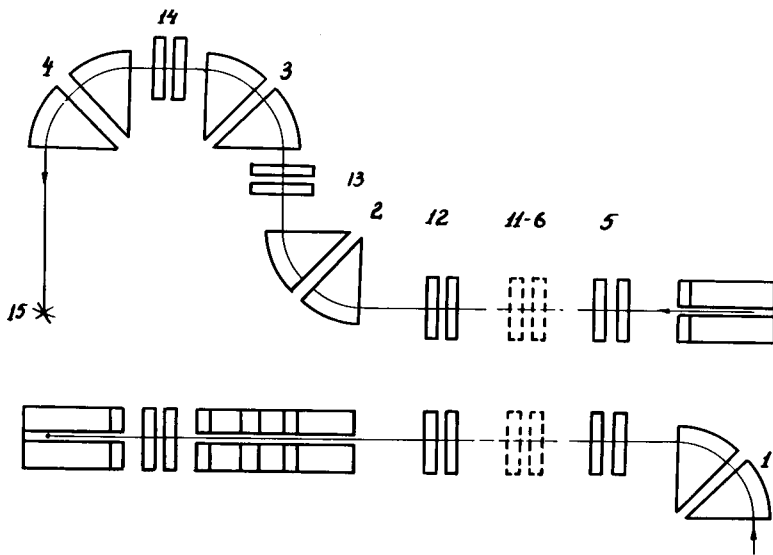


Рис.1 Трасса пучка на неумножающую мишень / вверху - в горизонтальной, внизу - в вертикальной плоскостях /.

1 - 4 - поворотные магниты

5 - 14 - дублеты линз

15 - неумножающая мишень.

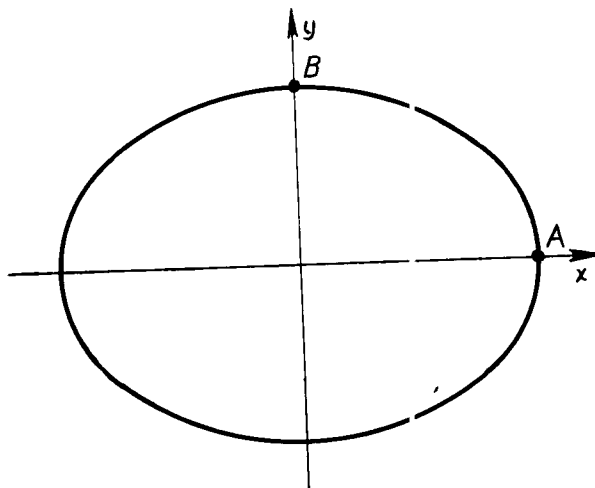
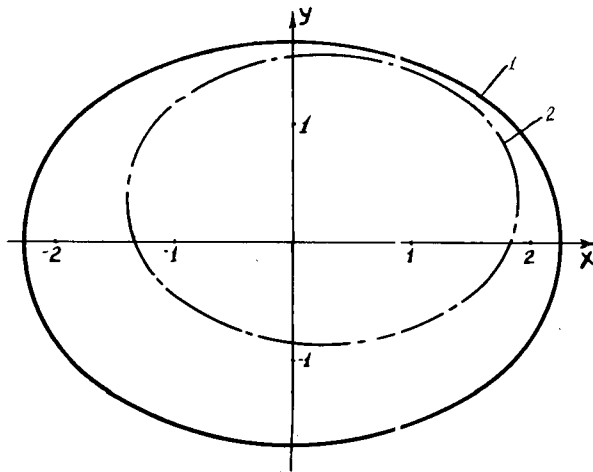
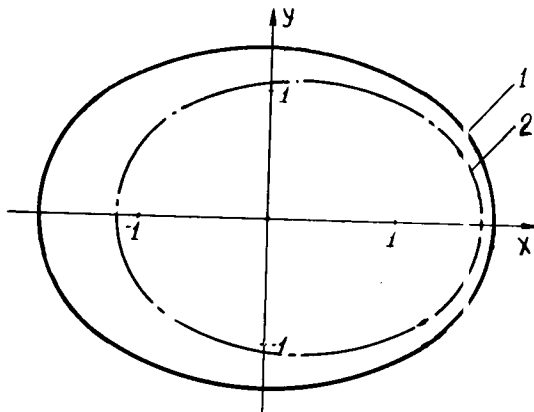


Рис.2 Поперечное сечение пучка эллиптического сечения.



а)



б)

Рис.3 Поперечные сечения пучков вдоль трассы / а - на неразмножающей мишени, б - после первого поворота на 90° и прямого 90-метрового отрезка /.

1 - для пучка с номинальной энергией,

2 - для пучка с энергией, отличающейся от номинальной на 5%.