

к основному магнитному полю добавить дополнительное азимутальное постоянное магнитное поле. Это поле вызовет появление в уравнениях (3а) и (3б) членов, зависящих от H_0 . Поэтому равновесный электрон будет двигаться вокруг прежней равновесной орбиты по спирали (двойная спираль). По подобным спиральям будут двигаться и электроны, смещенные от своих равновесных орбит (см. рис. 2). Меняя напряженность поля H_0 , можно получить условия оптимального захвата и ускорения электронов. Техническое осуществление дополнительного поля не представляет труда.

В научно-исследовательском институте при Томском политехническом институте рассчитан и строится стереотрон на 10 Мэв с частотой 50 гц.

На основе варианта стереотрона с управляющим полем, созданным катушками, можно построить, в частности, синхротрон с двухсторонней инжекцией электронов из областей $A-A$ и $B-B$ в область синхротронного ускорения $D-D$ —синхростереотрон (рис. 3). Используя два таких агрегата, установленных на противоположных сторонах ускоряющего сердечника, можно создать установку со встречными или пересекающимися пучками электронов или рентгеновых лучей. Указанные варианты также изучаются нами с теоретической и инженерной точек зрения.

Поступило в Редакцию 9/X 1958 г.

Применение неоднородного электрического поля для выпуска ускоренных частиц из циклотрона

А. А. Аргуманов, Е. С. Миронов

Для проведения многих ядерных исследований требуется сфокусировать выпущенный из циклотрона пучок на мишень малых размеров таким образом, чтобы угол сходимости пучка был минимальным, а интенсивность максимальной. Эту за-

дача можно решить, если потери тока и углы расходимости пучка при выпуске частиц из циклотрона малы, а расходимость пучка равномерна (размер мнимого источника расходящегося пучка мал).

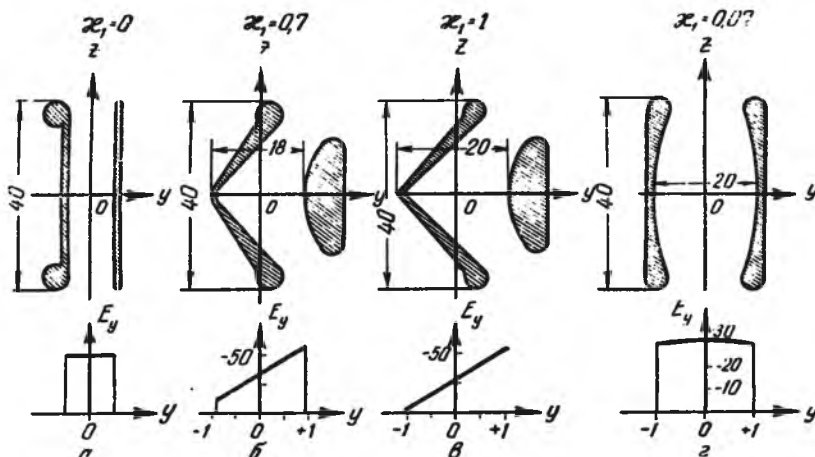


Рис. 1. Поперечное сечение электродов (в мм) и зависимость E_y от координаты y на разных участках отклоняющей системы (E в см², y в см).

дачу можно решить, если потери тока и углы расходимости пучка при выпуске частиц из циклотрона малы, а расходимость пучка равномерна (размер мнимого источника расходящегося пучка мал).

Применяемая обычно в циклотронах система выпуска типа «плоского» конденсатора не обеспечивает выполнения указанных требований. Отклоненный пучок сильно дефокусируется в горизонтальной плоскости полем рассеяния магнита, что приводит либо к большим потерям тока, либо к большим углам расходимости.

ные исследования отклоняющих систем с неоднородным электрическим полем.

Отклонение и фокусировка пучка в горизонтальной плоскости ($z=0$) осуществляются с помощью электрического поля, горизонтальная составляющая напряженности которого E_y представляется выражением

$$E_y = \frac{V}{2a} \left(1 + x_1 \frac{y}{a} \right), \quad (1)$$

где U —разность потенциалов, приложенная к электродам, $2a$ —расстояние между электродами при

$z=0$, χ —параметр, характеризующий скорость изменения напряженности электрического поля ($\chi_1 \ll 1$).

Поле, представленное выражением (1), образуется между двумя электродами (рис. 1, б, в), имеющими форму гипербола¹

$$\left(\frac{y}{a} + \frac{1}{\chi_1}\right)^2 - \frac{z^2}{a^2} = \left(\frac{1}{\chi_1} \pm 1\right)^2, \quad (2)$$

где знаки $\pm$ относятся к различным электродам. Ориентация координатных осей y и z показана на рис. 2; ось x направлена по нормали к плоскости чертежа.

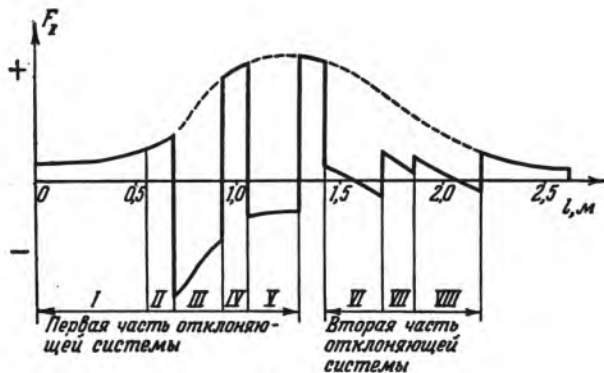


Рис. 2. Зависимость результирующей вертикальной упругой силы F_z от пути частицы l в отклоняющей системе.

Вертикальная составляющая напряженности электрического поля

$$E_z = -\frac{U}{2a} \chi_1 \frac{z}{a}$$

оказывает на пучок дефокусирующее действие, тогда как поле рассеяния магнита фокусирует его.

В основу расчета фокусировки было положено условие равенства магнитной фокусирующей и электрической дефокусирующей сил, действующих вдоль оси y на всем пути движения частиц в поле рассеяния:

$$\beta e \frac{\partial H_z}{\partial y}(x, 0, 0) z = e \frac{\partial E_z}{\partial z}(x, 0, 0) z, \quad \left(\beta = \frac{v}{c}\right).$$

Из этого выражения следует, что

$$\chi_1(x) = -\frac{\beta}{E_0} \frac{\partial H_z}{\partial y}(x, 0, 0), \quad \left(E_0 = \frac{U}{2a}\right).$$

При этом условии достигается максимальная фокусировка пучка в горизонтальной плоскости без дефокусировки его по вертикали.

Расчеты показали, что нелинейность спада магнитного поля рассеяния приводит к увеличению горизонтального размера мнимого фокуса пучка, выпущенного из циклотрона. Коррекция этого дей-

ствия может быть произведена с помощью электрического поля

$$E_y = E_0 \left(1 - \chi_2 \frac{y^2}{a^2}\right),$$

где

$$\chi_2 = -\frac{a^2}{2E_0} \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2}.$$

При $\chi_2 \ll 1$ такое поле может быть создано с помощью двух электродов, выполненных в виде дуг окружности (рис. 1, г) с радиусом кривизны

$$\rho = a \frac{1 + \chi_2}{2\chi_2}.$$

Отклоняющая система, рассчитанная для выпуска из полутораметрового циклотрона пучка дейтронов с энергией 20 Мэв, состоит из двух частей. Напряжение на электродах первой части, находящейся в дуанте, 68 кэ, а на электродах второй части (вне дуанта)—80 кэ. Общая угловая протяженность системы 157°, входная апертура—8 мм, выходная—50 мм.

Вся система разделена на восемь участков (см. рис. 2) с различной формой электродов. Поперечные сечения электродов и изменение напряженности электрического поля E_y для участков I, III, IV, V показаны на рис. 1, а, б, г, е соответственно. Электроды на участках VI—VIII подобны изображенным на рис. 1, г, а на участке II—подобны электродам участка IV.

На рис. 2 изображен график упругой силы, действующей на частицу в вертикальной плоскости. Знак плюс указывает на фокусировку, а минус—на дефокусировку. Пунктирная линия относится к компоненту упругой силы, вызванному спадом магнитного поля. Скачки результирующей упругой силы обусловлены действием электрического поля отклоняющей системы.

В горизонтальной плоскости действуют те же силы, что и в вертикальной, но с обратным знаком. Однако имеется еще компонент, создающий дополнительную фокусировку по горизонтали, пропорциональную квадрату кривизны траектории.

Отклоняющая система, параметры которой были приведены выше, позволяет уменьшить угол горизонтальной расходимости выпущенного пучка по сравнению с обычно применяемой системой («плоский» конденсатор) приблизительно в 5 раз без дополнительных потерь тока в пучке и без увеличения вертикальной расходимости. Такая система была впервые предложена авторами в 1954 г. при разработке проекта циклотрона для ускорения многозарядных ионов. Впоследствии подобная система (без корректирующих электродов) была рассчитана сотрудниками НИИЭФА И. М. Матора для циклотрона с диаметром полюсов 1,2 м. Испытания этой системы, проведенные сотрудниками НИИЭФА, дали хорошие результаты. При соответствующем выборе параметров рассмотренная отклоняющая система позволяет выпускать из циклотрона как параллельные, так и сходящиеся пучки.

В заключение авторы благодарят Л. М. Неменова за предложение темы настоящей работы.

¹ Л. М. Неменов и др. Атомная энергия, II, 1, 36 (1957).