

и медицины весьма желательно иметь бетатроны простые и по устройству и по обслуживанию.

Остановим наше внимание именно на таком случае, когда электромагнит бетатрона возбуждается только переменным током, а необходимое соотношение 2:1 достигается соответствующим выбором профиля полюсов. Допустим, что принята простейшая конструкция полюса, изображенная на рис. 1. Существует известная взаимная связь между величинами B_0 , B_u , r_0 и r_u .

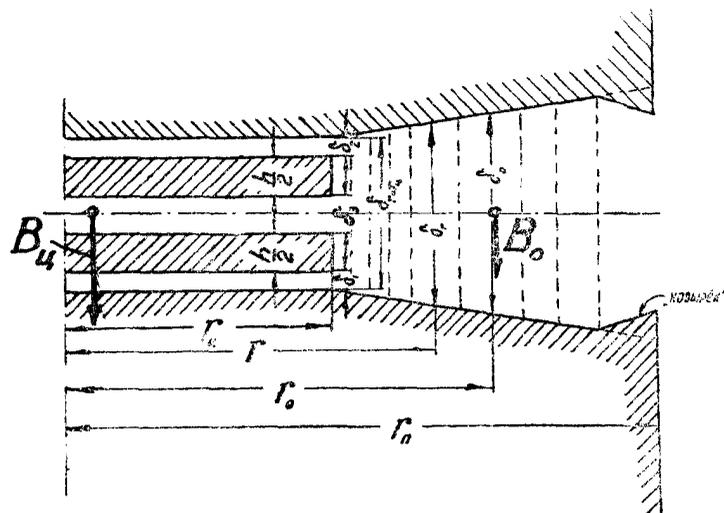


Рис. 1

Напомним ход рассуждений для вывода формулы этой связи.⁵ Если в рабочей зоне междуполюсного пространства величина $n = \text{const}$, то индукция B на окружности некоторого радиуса r может быть найдена из выражения

$$B = B_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^n. \quad (3)$$

Магнитный поток через кольцо шириной $r_0 - r_u$ в этом случае будет

$$\Phi_{o-u} = \int_{r_u}^{r_0} d\Phi = 2\pi B_0 r_0^n \int_{r_u}^{r_0} r^{1-n} dr = \frac{2\pi B_0 r_0^n}{2-n} \left(r_0^{2-n} - r_u^{2-n} \right).$$

Поток в центральной части полюсов, где $B_{um}(r) = \text{const}$

$$\Phi_u = \pi r_u^2 B_u$$

магнитный поток в круге орбиты

$$\Phi_o = \Phi_{o-u} + \Phi_u = \frac{2\pi B_0 r_0^n}{2-n} \left(r_0^{2-n} - r_u^{2-n} \right) + \pi r_u^2 B_u$$

и средняя индукция в круге орбиты

$$B_{cp} = \frac{\Phi_o}{\pi r_o^2} = \frac{2B_0 r_0^n}{(2-n)r_o^2} \left(r_0^{2-n} - r_u^{2-n} \right) + \left(\frac{r_u}{r_o} \right)^2 B_u. \quad (4)$$

Подставляя (4) во (2), получаем окончательно

$$\frac{B_{ц}}{B} = \frac{2}{2-n} \left[(1-n) \left(\frac{r_0}{r_{ц}} \right)^2 + \left(\frac{r_0}{r_{ц}} \right)^n \right]. \quad (5)$$

Это уравнение, иногда называемое уравнением вариантов, имеет множество решений в зависимости от соотношения входящих в него величин. Однако можно убедиться, что существует определенная полоса практически приемлемых решений, лежащая в границах наиболее рациональных значений этих величин. Действительно, величины B_0 и r_0 связаны соотношением (1), наибольшая величина $B_{цм}$ зависит от сорта стали, а величина n может быть выбрана в пределах значений $0 < n < 1$, соответствующих наилучшим условиям движения электронов в период инъекции и ускорения с учетом формы и размеров сечения рабочей зоны междуполюсного пространства. Так как величины B_0 , r_0 , $B_{ц}$ и n могут быть заданы, приняты или определены (хотя бы приблизительно), то в задачу расчета будет входить определение величины $r_{ц}$. Эта величина входит в знаменатель двух дробей, из которых одна в квадрате, а другая в степени n . Поэтому $r_{ц}$ может быть найдена либо методом подбора, либо графически. Решение методом подбора довольно трудоемко и не дает возможности быстрого исследования рациональности полученных результатов.

Гораздо большие возможности дает метод графического решения. При практических расчетах удобно пользоваться графиками, построенными на основании уравнения (5) в координатах $\frac{B_{ср}}{B_0} = f(r_{ц})$ для различных зна-

чений $r_0 = \text{const}$ и $n = \text{const}$. На рис. 2 приведены такие графики для $r_0 = 9 \div 30 \text{ см}$ и для наиболее часто принимаемых величин $n = 3/4, 2/3, 1/2$. График дает возможность быстро выбрать подходящее $r_{ц}$ для любого бетатрона с энергией от 4 до 30 Мэв. Кроме того, этот график может быть полезен для общего анализа взаимной зависимости величин, входящих в (5), представленной здесь в достаточно наглядной форме, что значительно упрощает задачу выбора рациональных вариантов основных данных для полюсов бетатронов в данном диапазоне максимальных энергий. В частности, на графике легко проследить влияние n на соотношение размеров полюсов.

Если за ширину рабочей зоны междуполюсного пространства принять величину $a = 2(r_0 - r_{ц})$, то из графика следует, что увеличение n во всех случаях (для $r_0 = \text{const}$ или $r_{ц} = \text{const}$) ведет к увеличению a , осо-

бенно при больших значениях $\frac{B_{ц}}{B_0}$. При $\frac{B_{ц}}{B_0} = \text{const}$ для больших r_0

увеличение n приводит к значительному возрастанию a . Для малых бетатронов такое возрастание a более заметно, чем для больших. Заметим, что для всех практически приемлемых вариантов бетатрона в данном диапазоне энергий увеличение n с $1/2$ до $3/4$ приводит к увеличению ширины рабочего пространства не более, чем на $5 \div 6 \text{ мм}$. Однако величина n заметно влияет на величину энергии бетатрона. В самом деле, если $r_0 = \text{const}$ и

$r_{ц} = \text{const}$, то увеличение n уменьшает $\frac{B_{ц}}{B_0}$, а это при $B_0 = \text{const}$ при-

водит к увеличению $B_{ом}$, то есть позволяет при неизменных габаритах бетатрона получить от него большую энергию электронов. По графику легко проследить, что для малых бетатронов (малые r_0) и при больших значениях

$\frac{B_{ц}}{B_0}$ такое увеличение энергии относительно больше, чем для больших

бетатронов (большие r_o) и малых $\frac{B_{ц}}{B_o}$. Из графика следует также, что для рациональных конструкций малых бетатронов отношение $\frac{B_{ц}}{B_o}$ всегда

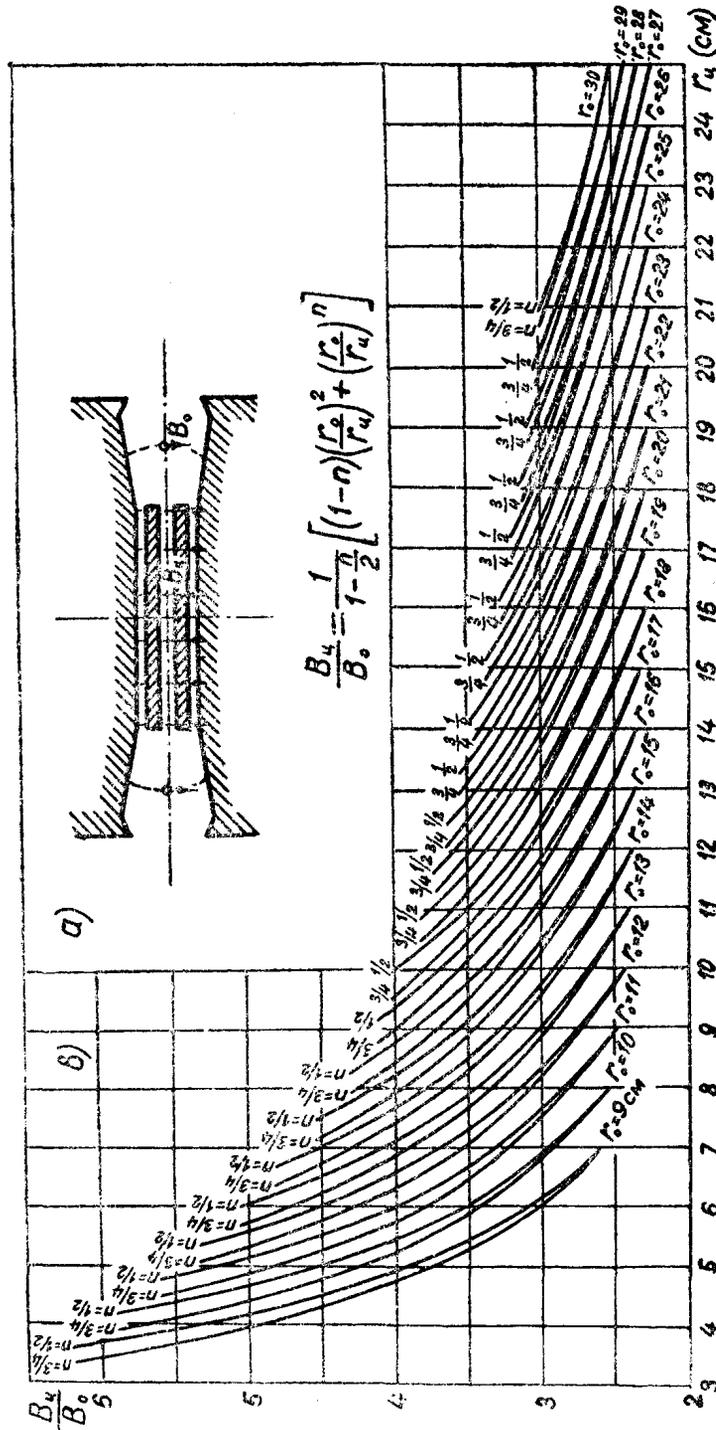


Рис. 2

должно быть больше, чем для больших. Это значит, что для больших бетатронов на орбите можно пользоваться более высокими значениями B_o . Следует заметить, что при $B_{от} = \text{const}$ и $r_o = \text{const}$ повышение $B_{цт}$ дает возможность уменьшить $r_{ц}$, то есть увеличить ширину рабочего пространства. Эффект этого явления особенно ошутим для больших бетатронов.

Во всех случаях при выборе вариантов величина a должна быть такой, чтобы в междуполосном пространстве при размещении в ней вакуумной камеры с электронной пушкой имелось достаточно места для движения ускоряемых электронов.

Уравнение (5) было выведено при условии, что в полюсах и дисках нет центрального осевого отверстия, которое обычно устраивается из конструктивных соображений. Однако уравнение (5) и график (рис. 2) остаются справедливыми и для случая, когда такое отверстие предусматривается. В этом случае за расчетную величину $B_{цт}$ принимается среднее значение индукции в круге радиуса $r_{ц}$. Так как индукция в стали B_{Fe} ограничивается насыщением стали, то увеличение центрального отверстия приводит к уменьшению расчетного $B_{цт}$.

Для малых бетатронов отношение радиуса отверстия к $r_{ц}$ обычно бывает больше, чем для больших бетатронов. Соответственно, для малых бетатронов приходится пользоваться более низкими значениями расчетной индукции $B_{цт}$, чем для больших.

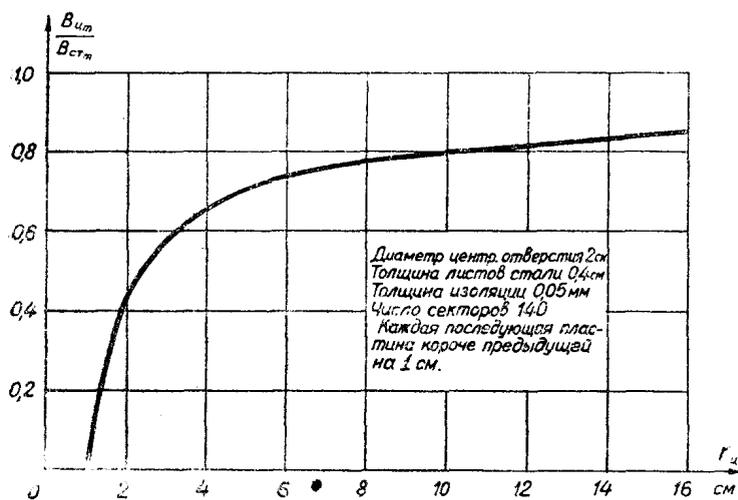


Рис. 3

Такое же влияние на расчетную величину $B_{цт}$ оказывает коэффициент заполнения полюсов сталью. Средняя величина коэффициента заполнения полюсов сталью с увеличением $r_{ц}$ сначала быстро, а затем более медленно возрастает. Поэтому для малых бетатронов приходится принимать еще более низкие значения расчетной $B_{цт}$. Коэффициент, учитывающий такое снижение $B_{цт}$ относительно допустимых значений B_{Fe} для стали, определяется в каждом конкретном случае в соответствии с предполагаемой конструкцией полюсов с учетом толщины листов стали и изоляции между ними. На рис. 3, например, представлено отношение средней индукции $B_{цт}$ в круге $r_{ц}$ к максимально допустимой для бетатрона индукции в стали (B_{Fe}) в зависимости от $r_{ц}$ для случая, когда и диски изготовлены из листов стали толщиной 0,4 мм с изоляцией между листами 0,05 мм при диаметре центрального отверстия 2 см (без учета краевого эффекта). Для больших значений $r_{ц}$ это отношение в данном случае не может быть более 0,89.

В заключение сделаем некоторые общие замечания относительно дальнейшего хода проектирования полюсов бетатрона. Для повышения экономичности бетатрона необходимо стремиться к уменьшению высоты междуполосного пространства. Пределом этого уменьшения служит высота пространства, в котором происходит движение ускоряемых электронов,

плюс конструктивные размеры вакуумной камеры. Высота этого пространства определяется характеристиками магнитного поля и условиями впуска электронов в камеру.

Характеристики магнитного поля в основном задаются формой профиля полюсов, размерами и взаимным расположением центральных дисков и в некоторой степени определяются общей конструкцией и технологией изготовления бетатрона.

Существуют теоретические методы определения контуров профиля полюсов. Однако при всей сложности и трудности эти методы пока еще не дают надежных результатов. Профиль, рассчитанный теоретически, нуждается в серьезной экспериментальной корректировке.

На практике широкое распространение получил экспериментальный метод определения требуемого профиля полюсов с помощью электролитической ванны. В этом случае предварительная форма профилированной части полюсов может быть рассчитана по упрощенным формулам и в процессе последующих исследований соответствующим образом исправлена.

В практике расчета часто поступают так: считая силовые линии в рабочей зоне междуполюсного пространства прямыми и перпендикулярными к плоскости орбиты, подсчитывают необходимый профиль полюсов в этой зоне, используя соотношение $\delta_r = \delta_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^n$, где δ_0 — расстояние между полюсами на равновесной орбите радиуса r_0 ; δ_r — то же в любой другой точке этой зоны на расстоянии r от центра полюса.

За наружный радиус полюса обычно принимается величина $r_n \cong 2r_0 - r_{ц}$. Суммарный зазор в центральной части полюсов $\delta_{ц} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$ определяется

как $\delta_{ц} = \delta_0 \frac{B_{от}}{B_{цт}}$, суммарная высота центральных дисков, — как $h = \delta_{r=r_0} - \delta_{ц}$.

Число центральных дисков обычно принимается равным двум, а высота каждого диска — равной $h/2$. Расстояние между дисками (δ_1 , δ_2 и δ_3), а также форма и размеры „козырька“ на периферийной части полюсов могут быть ориентировочно определены, пользуясь методом подобия на основании данных о конструкциях действующих бетатронов.

Более точно эти величины могут быть определены опытным путем в электролитической ванне так, чтобы величина n в большей части рабочей зоны междуполюсного пространства была равна расчетной. Заметим, что, изменяя взаимное расстояние между центральными дисками, а также величину и форму „козырька“, всегда можно добиться такой картины магнитного поля, для которой $n = f(r)$ будет наиболее благоприятной.

Имея картину силовых линий магнитного поля, можно величину n для любой точки поля определить с достаточной точностью, как $n = \frac{r}{r_n}$,

где r — расстояние рассматриваемой точки от центра междуполюсного пространства, а r_n — радиус кривизны силовой линии в данной точке плоскости орбиты. Окончательная характеристика принятых размеров и формы профиля полюсов может быть произведена лишь после всестороннего исследования структуры магнитного поля между полюсами данной конструкции или на уменьшенной модели этих полюсов.