

К МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА БЕТАТРОНА

Б. В. ОКУЛОВ

(Представлена научно-исследовательским институтом
ядерной физики, электроники и автоматики)

Обычно для повышения импульсной дозы тормозного излучения бетатрона до заданной величины повышают максимальную энергию бетатрона, так как доза тормозного излучения быстро растет с увеличением энергии ускоренных электронов. Однако при этом наряду с возрастанием дозы излучения возрастает вес электромагнита и его размеры [1], увеличивается емкость конденсаторной батареи, возрастает вес биологической защиты и т. д. Кроме того, при повышении энергии ускорителя уменьшается длина волны тормозного излучения, что в ряде случаев нежелательно. Например, в дефектоскопии при уменьшении длины волны тормозного излучения может снизиться контрастность фотографического изображения, а при облучении квантами высокой энергии некоторых материалов может происходить их активация и нежелательные нарушения их структуры. При увеличении энергии ускорителя снижается также полезное поле облучения. Таким образом, увеличение дозы тормозного излучения ускорителя приобретает в этом случае сравнительно дорогую цену. В то же время значительное увеличение дозы тормозного излучения может быть получено путем соответствующего увеличения энергии инъекции [2, 3], т. е. без увеличения конечной энергии ускорителя и связанных с этим нежелательных последствий.

Действительно, «критический заряд» [4], который может быть удержан магнитным полем бетатрона во время инъекции, согласно [2] в системе единиц CGSE определяется выражением

$$Q_{кр} = \frac{E_i}{2eR_0} \left[\left(\frac{E_i}{E_0} \right)^2 - 1 \right] \cdot s, \quad (1)$$

где E_i — полная энергия инжектируемого электрона,
 E_0 — энергия покоя электрона,
 e — заряд электрона, R_0 — радиус равновесной орбиты, s — площадь поперечного сечения области устойчивости.

Формула (1) справедлива для ускорителя с показателем магнитного поля на равновесной орбите $n_0 = 0,5$. В более общем случае формулу (1) можно записать в виде [5]

$$Q_{кр} = f_1(n_0) \frac{m_0 c^2}{2eR_0} \cdot s \cdot \frac{E_i}{E_0} \left[\left(\frac{E_i}{E_0} \right) - 1 \right], \quad (2)$$

где

$$f_1(n_0) = \sqrt{\frac{1-n_0}{n_0}}$$

Обозначим

$$f_1(n_0) \cdot \frac{m_0 c^2}{2e} \cdot \frac{s}{R_0} = \beta, \quad (3)$$

$$\frac{E_i}{E_0} \left[\left(\frac{E_i}{E_0} \right)^2 - 1 \right] = f_2(U_i), \quad (4)$$

где U_i — напряжение инжекции, тогда

$$Q_{кр} = \beta \cdot f_2(U_i). \quad (5)$$

Как видно из равенства (3), β является функцией s , R_0 и n_0 — важных параметров ускорителя. Для каждого данного ускорителя величина β постоянна и, согласно уравнению (5), представляет собой критический заряд, который могут удержать фокусирующие силы ведущего магнитного поля при «единичном» напряжении инжекции, когда $f_2(U_i) = 1$. Это значение критического заряда, однозначно характеризующее «емкость» ведущего магнитного поля ускорителя, удобно назвать

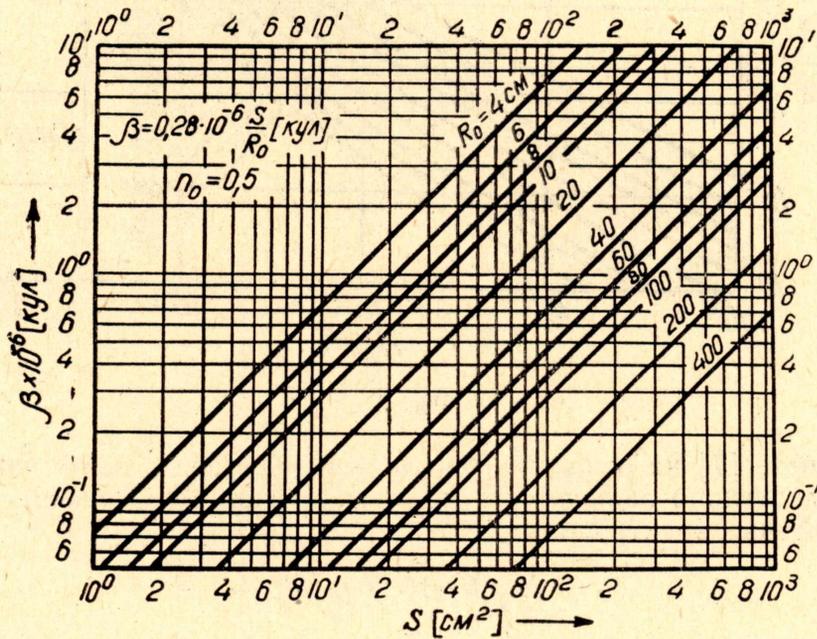


Рис. 1

характеристическим зарядом [5] и использовать для оценки (сравнения) «емкостей» ведущего магнитного поля различных бетатронов. В частном случае для бетатронов с $n_0 = 0,5$ «единичное» напряжение инжекции равно 166 кВ.

На рис. 1 приведена зависимость β от поперечного сечения области устойчивости для различных радиусов равновесной орбиты. На рис. 2 дана зависимость (при $n_0 = 0,5$) критического заряда от напряжения инжекции и величины β .

В работе [5] показано, что в бетатронах при обычно применяемых напряжениях инжекции в несколько десятков киловольт до мишени доходит заряд $\sim 0,01Q_{кр}$. В работе [5] показано также, что в сильноточном бетатроне при высоком напряжении инжекции (~ 200 кВ), когда уменьшается рассеяние электронов на остаточном газе, на неоднородностях магнитного поля, когда за счет применения инфлектора улучшаются угловые характеристики инжектируемого пучка, когда, наконец, начинают играть существенную положительную роль на захват электронов релятивистские эффекты, удается ускорить заряд, близкий к критическому. Так, например, в сильноточном импульсном двухкамерном стереобетатроне [6] был ускорен заряд $\sim 0,24Q_p$ [5]. Этот факт, а также работа [3] говорят о том, что формула (1) для расчета критического заряда может быть успешно использована при расчете бетатронов на заданную интенсивность излучения.

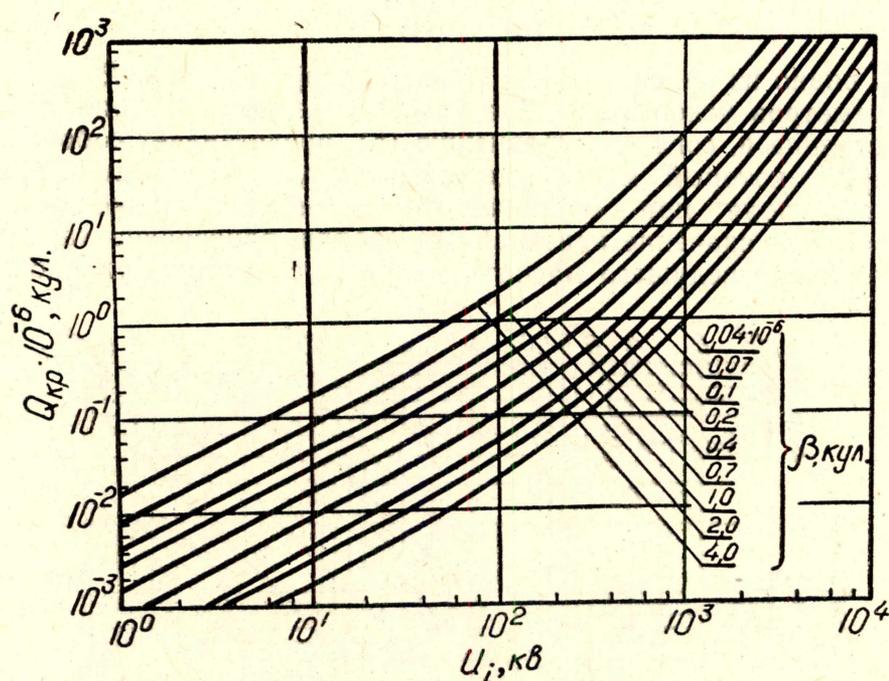


Рис. 2

В работе [7] на основании анализа экспериментальных данных получена следующая зависимость дозы тормозного γ -излучения от энергии ускоренных электронов

$$D = K_0 \cdot 10^{-16} Q_m \cdot E^3, \quad (6)$$

где Q_m — заряд электронов, сброшенных на мишень, E — энергия электронов в Мэв, K_0 — коэффициент оптимальности мишени.

Имеет смысл рассмотреть уравнения (1) и (6) совместно с учетом некоторого коэффициента K_y , отражающего, какую часть электронов от $Q_{кр}$ можно ускорить и довести до мишени в данном ускорителе. Таким образом,

$$Q_m = K_y \cdot Q_{кр}. \quad (7)$$

Из уравнений (5), (6) и (7) имеем

$$D = 10^{-16} K_0 \cdot K_y \cdot f_1(n_0) \cdot \beta \cdot f_2(U_i) \cdot E^3, \quad (8)$$

или

$$E\left(\frac{A}{D}\right)^{1/3} = [f_2(U_i)]^{-1/3}, \quad (9)$$

где $A = 10^{-16} \cdot K_0 \cdot K_y \cdot \beta \cdot f_1(n_0)$.

Из уравнения (9) и соответствующей ему кривой равных импульсных доз (рис. 3) следует, что одна и та же доза может быть получена при различных определенных сочетаниях конечной энергии ускоренных

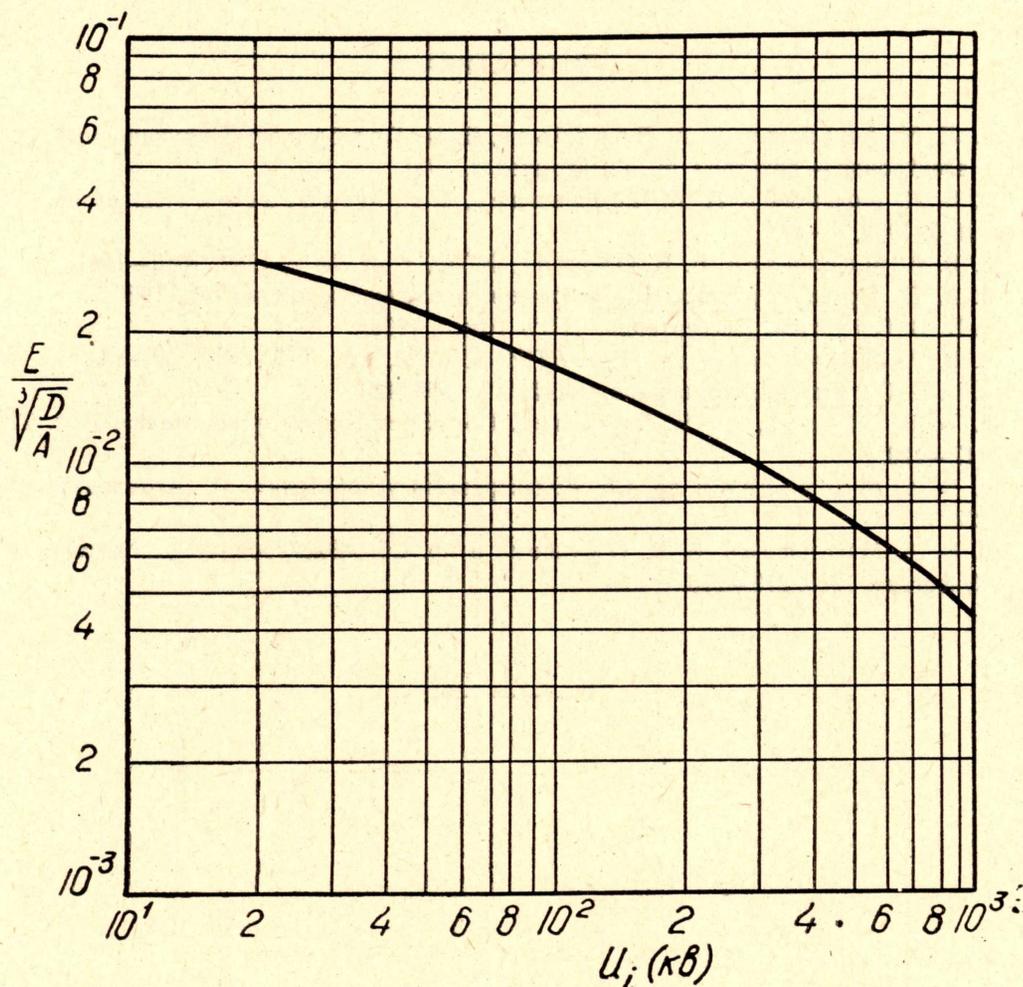


Рис. 3

электронов и напряжения инжекции. С увеличением напряжения инжекции необходимая полная энергия ускорителя уменьшается. Например, при повышении напряжения инжекции с 60 до 260 кВ конечная энергия ускорителя может быть уменьшена в 2 раза. В соответствии с этим могут быть уменьшены размеры электромагнита, его вес, стоимость и т. д. Это необходимо учитывать при разработке новых, более экономичных бетатронов.

Ряд конструкций высоковольтных инжекторных устройств на напряжение до 200—300 кВ уже продолжительное время успешно применяется в бетатронах [5, 8—10], так что этот диапазон напряжений инжекции можно считать освоенным. Дело заключается лишь в том, чтобы такие напряжения инжекции использовались в возможно большем ко-

личестве бетатронов, как уже построенных, так и проектируемых. Простые расчеты показывают, что повышение напряжения инжекции с обычного значения в $40 \div 50$ до $200 \div 300$ кВ (при прочих равных условиях) приводит к понижению стоимости ускоренных электронов или соответствующего тормозного излучения в несколько раз.

Таким образом, имеет смысл выбирать максимальную энергию ускорителя, исходя из оптимальных условий взаимодействия тормозного излучения с облучаемым объектом. А необходимую импульсную дозу выгодно получать за счет достаточно высокого напряжения инжекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Ананьев, А. А. Воробьев, В. И. Горбунов. Индукционный ускоритель электронов — бетатрон. М., Госатомиздат, 1961.
2. Б. Н. Родимов, П. А. Черданцев, Т. А. Медведева. Изв. вузов, «Физика», № 5, 1959, 6—13.
3. В. А. Москалев, Б. В. Окулов. ЖТФ, т. 32, № 9, 1962, 1040—1041.
4. А. П. Гринберг. Методы ускорения заряженных частиц. М., 1950.
5. Б. В. Окулов. Диссертация. ТПИ, Томск, 1968.
6. В. А. Москалев и др. Изв. ТПИ, том 122, изд. ТГУ, 1962, 50—53.
7. Б. В. Окулов. Атомная энергия, № 11, 1968, 426.
8. Б. В. Окулов, А. Е. Ерзылев. Сб. «Электронные ускорители». Изд. ТГУ, 1961, 117—123.
9. В. А. Москалев и др. Сб. «Электронные ускорители». М., Атомиздат, 1966, 112—122.
10. В. А. Москалев, Б. В. Окулов и др. Сб. «Электронные ускорители». М., Изд. «Энергия», 1968, 273—276.