

**К ВОПРОСУ О ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЧКА
УСКОРЕННЫХ ИОНОВ В ЦИКЛОТРОНЕ ОТ УСКОРЯЮЩЕГО
НАПРЯЖЕНИЯ**

В. А. КОЧЕГУРОВ, Ю. П. ХАРИТОНЕНКО

Выяснение зависимости интенсивности пучка в ускорителях от других регулируемых параметров является необходимым при расчете и проектировании систем автоматического регулирования этих установок. Задача, решенная в данной работе, возникает, в частности, при разработке математической модели циклотрона как объекта регулирования, необходимой для синтеза и исследования цепи обратной связи.

Если циклотрон работает в импульсном режиме, то интенсивность пучка [2]

$$I = \frac{ZeN_{\tau}}{t}, \quad (1)$$

где Z — кратность заряда частицы;

e — заряд электрона;

t — длительность импульса;

N_{τ} — число ускоренных частиц (за импульс), достигших мишени на выходе из ускорительной камеры.

Обозначим ток инжекции

$$I_0 = \frac{ZeN_0}{t}.$$

Здесь N_0 — число инжектируемых частиц за импульс. Тогда интенсивность пучка на удаленной мишени

$$I = I_0 \frac{N_{\tau}}{N_0}. \quad (2)$$

Учитывая соизмеримость толщины отсекающей пластины дефлектора и шага траектории Δr ускоренных частиц на конечном радиусе в диапазоне реально допустимого ускоряющего напряжения V_m , можно считать

$$N_{\tau} = F(V_m) \Delta r N_0, \quad (3)$$

где

$$\Delta r = \frac{2E_0 V_m}{300 ZH \sqrt{2E_0 E}} \sin \varphi.$$

Здесь E_0 — энергия покоя иона;

H — напряженность магнитного поля;
 E — энергия иона на конечном радиусе;
 φ — фаза ускоряющего напряжения в момент пересечения ион-ион ускоряющего промежутка, отсчитываемая от момента прохождения напряжения через нуль.

Качественный анализ формулы (3) показывает, что число ускоренных частиц N_τ не может быть больше числа инжектируемых ионов N_0 и равно нулю при $\Delta r = 0$. Из этих условий

$$F(V_m) = \frac{300ZH\sqrt{2E_0E}}{2E_0E}, \quad (4)$$

$$N_\tau = N_0 \sin \varphi.$$

С учетом (4) формула (2) принимает вид:

$$I = I_0 \sin \varphi. \quad (5)$$

Далее покажем зависимость фазы φ от ускоряющего напряжения. Энергия на конечном радиусе [2]

$$E = 2 \sqrt{\frac{2E_0ZV_m}{\pi} (\cos \varphi - \cos \varphi_0)}, \quad (6)$$

где $\varphi_0 \approx \frac{\pi}{2}$ — фаза В. Ч. — напряжения в начале цикла ускорения (после первого полуоборота) [1].

Из равенства (6) найдем:

$$\cos \varphi = \frac{\pi E^2}{4E_0ZV_m}. \quad (7)$$

Подставляя в (7) $\varphi = 0$ — значение фазы, при котором ускорение прекращается, найдем напряжение нулевой интенсивности:

$$V_0 = \frac{\pi E^2}{4ZE_0}. \quad (8)$$

Произведя подстановку (8) в (7), найдем

$$\cos \varphi = \frac{V_0}{V_m}; \quad \sin \varphi = \frac{\sqrt{V_m^2 - V_0^2}}{V_m}.$$

Итак, зависимость интенсивности пучка от ускоряющего напряжения выразится формулой

$$I = I_0 \frac{\sqrt{V_m^2 - V_0^2}}{V_m}. \quad (9)$$

Для циклотрона НИИ ЯФ (г. Томск), рассчитанного на ускорение дейтронов до энергии 13,5 Мэв на радиусе $r = 52,5$ см,

$$V_0 = 75 \text{ кВ},$$

зависимость (9) показана на рис. 1, где точками обозначены результаты эксперимента.

Зависимость (9) справедлива в том случае, если траектория пучка проходит таким образом, что „нож“ дефлектора находится точно посередине между последней и предпоследней орбитами. В реальном случае изменение амплитуды V_m ускоряющего напряжения ведет к изменению числа оборотов (n) частиц, достигающих конечного радиуса.

Если приращение энергии за оборот [1]

$$\frac{dE}{dn} = 2ZV_m \sin \varphi, \quad (10)$$

то полная энергия на конечном радиусе

$$E = 2ZV_m \int_0^n \sin \varphi dn = 2ZV_m n \overline{\sin \varphi}, \quad (11)$$

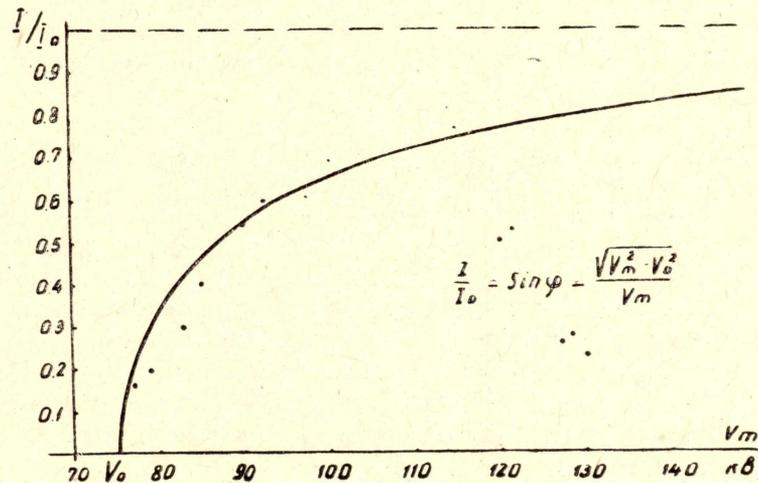


Рис. 1

где

$$\overline{\sin \varphi} = \frac{1}{n} \int_0^n \sin \varphi dn \approx \frac{1 + \sin \varphi_n}{2}, \quad (12)$$

φ_n — фаза на конечном радиусе.

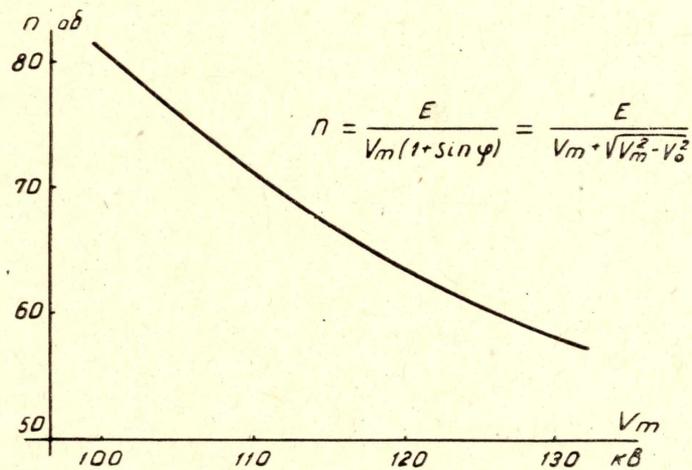


Рис. 2

Теперь из (11) с учетом (12) нетрудно получить число оборотов иона в функции ускоряющего напряжения:

$$n = \frac{E}{2ZV_m \overline{\sin \varphi}} = \frac{E}{ZV_m(1 + \sin \varphi_n)} = \frac{E}{V_m + \sqrt{V_m^2 - V_0^2}}.$$

Задаваясь для n рядом целых чисел, получим из графика (рис. 2) ряд значений V_m , при которых конечный радиус точно равен заданному (табл. 1).

Таблица 1

n (об)	56	57	58	59	60	61	62	63
V_m (кв)	133,5	131,3	129,3	127,4	125,5	123,9	122,3	120,8
n (об)	64	65	66	67	68	69	70	71
V_m (кв)	119,3	117,7	116,3	114,8	113,6	112,4	111,2	109,9
n (об)	72	73	74	75	76	77	78	79
V_m (кв)	108,8	107,7	106,6	105,5	104,4	103,6	102,8	102

Из табл. 1 нетрудно видеть необходимость стабилизации ускоряющего напряжения при дискретных значениях полученного ряда; причем при больших значениях V_m стабилизация требует меньшей точности. В самом деле, необходимость стабилизации ускоряющего напряжения диктуется необходимостью сохранения целого числа оборотов ускоренных частиц, так как в противном случае центр сечения пучка не попадает в центр сечения входной щели дефлектора. При этом для того, чтобы изменить число оборотов иона на единицу, потребуется изменение ускоряющего напряжения при 102 кв — на 0,785%, а при 133 кв — на 1,65%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Д. Ливингуд. Принципы работы циклических ускорителей, ИЛ, 1963.
2. Е. Г. Комар. Ускорители заряженных частиц. Атомиздат, 1964.