

## Циклический ускоритель ионов с системой электростатического отклонения и фокусировки

Б.Ю. Богданович, Н.М. Гаврилов, А.В. Нестерович, А.В. Шальнов  
Московский государственный инженерно-физический институт, Россия

В настоящее время для ускорения тяжелых ионов наиболее широко используются ускорители циклотронного типа, в которых для поворота частиц используется перпендикулярное к медианной плоскости магнитное поле. Ускоряющие высокочастотные электроды—дуанты имеют форму ковшеобразных коробок, внутри которых проходят орбиты ионов. Развитие и распространение таких ускорителей сдерживается главным образом наличием крупногабаритной, тяжелой, энергоемкой и дорогой магнитной системы. Так, например, при энергии протонов 12 – 16 МэВ масса магнита составляет около 200 тонн. Настоящая работа посвящена устранению этого недостатка путем применения электростатического отклонения частиц.

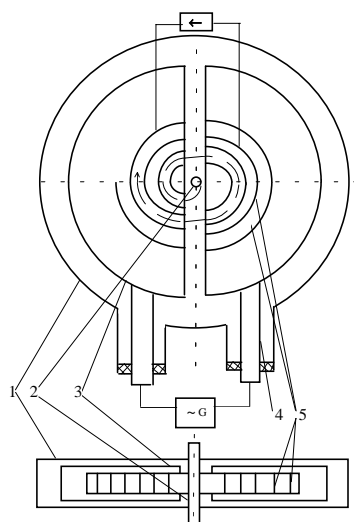


Рис. 1.

для режима постоянной частоты ВЧ-поля, что обуславливает возрастание напряженности электрического поля в дефлекторе по мере увеличения энергии ионов.

Наиболее эффективным, по крайней мере с точки зрения минимизации потерь частиц при радиальных колебаниях, является прохождение пучка по центру канала дефлектора. При оценочных расчетах можно считать прирост потенциала ионов на каждом обороте одинаковым, как это и делается для циклотронов. Радиальная и вертикальная фокусировки могут быть реализованы одним из известных способов, например, чередованием участков противоположной кривизны электродов дефлектора в вертикальном сечении [ 1, с. 253 ].

На рис. 1 изображена схема циклического ускорителя с электростатическим дефлектором, выполненным в виде пластин плоского конденсатора, расположенных вдоль траектории ионного пучка внутри дуантов. Цифрой 1 обозначена вакуумная камера, 2 – ионный источник, 3 – один из ускоряющих электродов - дуантов, соединенных посредством штока 4 с выходом ВЧ-генератора. На рисунке показаны два дуанта, хотя их количество может быть и больше в зависимости от назначения ускорителя и выбранного рабочего режима. Электроды дефлектора 5 соединены с полюсами источника постоянного напряжения, так что разность потенциалов между ними создает центростремительную силу для ионов. Стрелками указаны направления движения пучка.

Ускорение частиц осуществляется как и в обычных циклотронах. Основная трудность заключается в определении такой формы электродов дефлектора, которая бы обеспечивала постоянство периода обращения ионов, необходимое

Поле дефлектора, в котором движутся ионы, может быть аппроксимировано полем цилиндрического конденсатора переменной кривизны. Точность такой аппроксимации повышается по мере возрастания радиуса орбиты ионов. При оценочных расчетах толщину электродов можно не учитывать.

Напряженность радиального электрического поля  $E_r$ , создающего центростремительную силу при движении ионов с азимутальной скоростью  $V_\theta = \sqrt{2\eta U_\theta}$  ( $\eta = Ze/Am_{0p}$ ,  $Z$  и  $A$  – заряд и массовое число иона,  $m_{0p}$  – масса покоя протона,  $U_\theta$  – “азимутальный” потенциал) по окружности радиуса  $r$  определяется известным выражением [ 1, с. 112 ]

$$E_r = \frac{2U_\theta}{r}. \quad (1)$$

В цилиндрическом конденсаторе она выражается через радиусы внутреннего  $r_{\text{вн ут}}$  и внешнего  $r_{\text{вн е ш}}$  электродов в виде [ 2, с. 347, 360 ]

$$E_r = \frac{U_d}{r \ln(r_{\text{вн е ш}}/r_{\text{вн ут}})}, \quad (2) \text{ где}$$

$U_d$  – разность потенциалов на электродах дефлектора. Условие движения пучка по центру канала позволяет упростить это выражение, выразив радиусы электродов через расстояние между ними в точке нахождения рассматриваемой частицы  $\delta r$  и радиус траектории

$$r_{\text{вн е ш}} = r + \delta r/2; \quad r_{\text{вн ут}} = r - \delta r/2. \quad (3)$$

Выражение, связывающее параметры дефлектора, радиус пучка, и значения потенциалов, имеет в этом случае вид

$$\frac{U_d}{U_\theta} = 2 \ln \frac{r + \delta r/2}{r - \delta r/2}. \quad (4)$$

Уравнение траектории пучка в полярной системе координат, то есть зависимость  $r(\theta)$ , может быть получена при введении условия постоянства времени обращения частиц  $T$

$$T \approx \frac{2\pi r}{V_e} = \frac{2\pi}{\sqrt{\eta}} \sqrt{\frac{r}{E_r}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\eta}} \sqrt{\frac{R}{E_r}}, \quad (5)$$

где  $E_r$  – соответствующая иону в точке радиуса  $R$  напряженность поля, которая может быть известна или задана заранее,  $R$  – радиус траектории на выходе из дефлектора. Последнее равенство введено для удобства практических расчетов.

В предположении постоянства прироста потенциала ионов на каждом обороте  $\Delta U$  справедливо выражение

$$U_\theta = \frac{\theta}{2\pi} \Delta U, \quad (6)$$

которое с учетом равенства ( 5 ) дает следующее уравнение траектории пучка :

$$r = \chi \sqrt{\theta}, \quad (7)$$

$$\text{где } \chi = \sqrt{\frac{\Delta UR}{\pi E_r}} = \sqrt{\frac{R\delta R}{\pi K}} ; K = \frac{U_d}{\Delta U} .$$

После соответствующих преобразований уравнения (4) с учетом уравнения (7) могут быть получены зависимости  $r_{\text{вн е ш}}(\theta)$  и  $r_{\text{вн у т}}(\theta)$

$$r_{\text{вн у т}}(\theta) = 2\sqrt{\frac{R\delta R}{\pi K}} \frac{\sqrt{\theta}}{1+\exp(\pi K/\theta)} ; r_{\text{вн е ш}}(\theta) = \exp(\pi K/\theta)r_{\text{вн у т}} . \quad (8)$$

Анализ показывает, что с увеличением числа оборотов спирали отношение ширины дефлектора  $\delta r$  к расстоянию между соседними витками для каждого электрода стремится к  $2K$ . Поскольку максимальной ширине канала соответствует расстояние между витками, то значение  $K$  может изменяться только в пределах от 0 при минимальной ширине канала до 0,5 при максимальной, что эквивалентно условию  $0 \leq U_d \leq 0,5 \Delta U$ .

При одинаковом расстоянии между электродами дефлектора, что в предположении малости их толщины соответствует оптимальным условиям с точки зрения пробоя, параметр  $K$  равен 0,25.

На рис.2 изображена траектория пучка ионов и форма электродов для нормализованных (деленных на  $\chi$ ) параметров, отмеченных звездочкой, при  $K=0,25$ , т.е.  $\Delta U = 4U_d$ . Края дуантов имеют гиперболическую форму, причем для любого витка орбиты реализуется приблизительное равенство расстояний между краями ускоряющих ( $\Delta$  и  $d$ ) и отклоняющих ( $\delta r$  и  $s$ ) электродов как в горизонтальной ( $\Delta$  и  $\delta r$ ), так и в вертикальной ( $d$  и  $s$ ) плоскостях. Это соответствует конфигурации, оптимальной с точки зрения взаимодействия пучка с ускоряющими и отклоняющими полями, так как при значительном отклонении какого-либо из размеров возможно ослабление одного или нескольких компонентов электрического или ВЧ-поля из-за экранирующего действия более близких к пучку электродов. С целью уменьшить такую возможность электроды дефлектора между дуантами могут иметь разрыв.

Гиперболическая форма краев дуантов, а также аналогичная зависимость ширины электродов дефлектора, объясняется гиперболической зависимостью ширины ускорительного канала от радиуса, т.е.  $\delta r \sim 1/r$ , как следует из уравнений (1), (6) и (7).

Сравнение габаритов циклотрона с электростатическим и магнитным отклонениями показывает, что радиус камеры циклотрона в случае электростатического отклонения  $R_E$  меньше, чем  $n$  радиусов при магнитном отклонении  $R_H$  ( $n$  удобно назвать параметром сравнения), если реализуются предельные значения напряженности магнитного и электрического полей (соответственно 1,4 Тл и 100 кВ/см) при условии

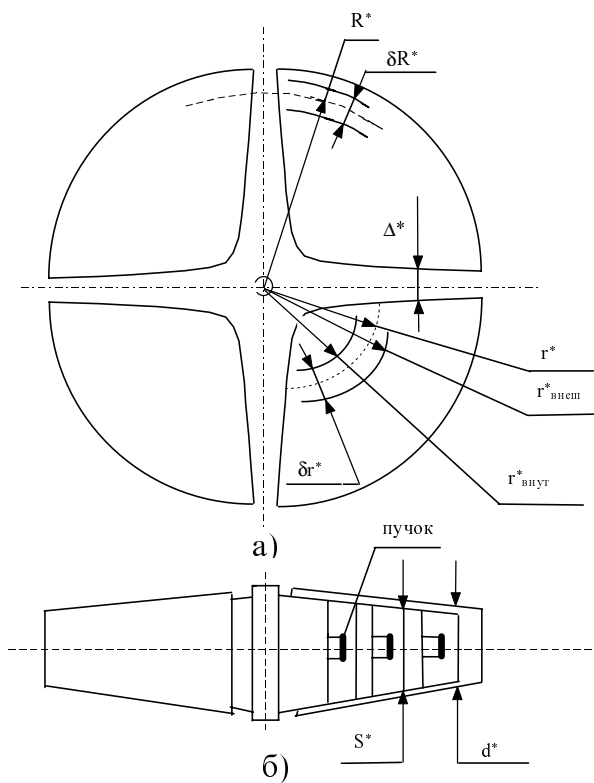
$$U(R) \leq 0,5An^2, \quad (10)$$

где  $U(R)$  – потенциал ионов на выходе ускорителя в МВ. Эта зависимость иллюстрируется на рис.3, из которого следует, что в предложенном ускорителе наиболее предпочтительно ускорение ионов до 10 МэВ на нуклон. В таблице при-

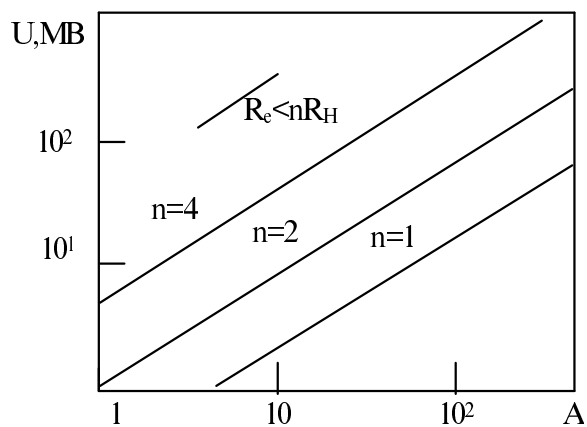
ведены примеры параметров ускорителя для  $\delta R=1\text{ см}$ ,  $U_d=100\text{ кВ}$ ,  $\Delta U=2U_d=200\text{ кВ}$ .  
Частота ВЧ-поля не конкретизируется, так как она определяется зарядом ионов.

N п/п	A	$U(R)$ , МВ	$R_E$ , м	$n$
1	1	4	0,4	4
2	10	10	1,0	2
3	100	100	10,0	2
4	100	25	2,5	1
5	250	62,5	5,0	1

Ожидается, что реализация данного предложения позволит снизить массу, габариты, стоимость и мощность циклотрона и повысить КПД, особенно при ускорении тяжелых ионов.



**Рис.2.** Схема ускорителя с гиперболическими электродами в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях (пояснения в тексте).



**Рис.3.** Области преимущественного использования ускорителя ( $R_E < nR_H$ ) для различных параметров сравнения.

#### Список литературы

1. Комар Е.Г. Основы ускорительной техники. — М: Атомиздат, 1975.
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. — М. : Наука, 1968.