

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

826/2-80

25/2-80

P9 - 12811

М.С.Хвастунов

ЦИКЛИЧЕСКИЙ ИНДУКЦИОННЫЙ  
УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ

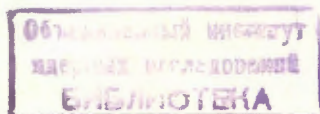
1979

P9 - 12811

М.С.Хвастунов

ЦИКЛИЧЕСКИЙ ИНДУКЦИОННЫЙ  
УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ

*Направлено в ПТЭ*



Хвастунов М.С.

P9 - 12811

#### Циклический индукционный ускоритель электронов

Описан высокоинтенсивный циклический индукционный ускоритель электронов на энергии  $40 \pm 200$  МэВ. Магнитная система ускорителя подобна магнитной системе слабофокусирующего синхротрона. В прямолинейных промежутках размещаются ускоряющие ферромагнитные сердечники и устройства ввода и вывода пучка. Ускоритель отличается от бетатрона с постоянным полем <sup>2/</sup> тем, что ведущее поле в нем переменное. Это дает возможность сильно уменьшить объем стали и снизить мощность источника питания. Интенсивность пучка ускорителя сравнима с интенсивностью бетатрона с постоянным полем /  $\sim 10^{14}$  электрон/с/ и в высокочастотном варианте /400 Гц/ с повышенной энергией инжекции / $\sim 1,5$  МэВ/ приближается к интенсивности линейного ускорителя / $\sim 10^{15}$  электрон/с/. Коэффициент полезного действия ускорителя высок и может составлять десятки процентов.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1979

Khvastunov M.S.

P9 - 12811

#### Cyclic Induction Electron Accelerator

A high-intensity cyclic induction accelerator of  $(40 \pm 200)$  MeV electrons is described. A magnetic system of the accelerator is similar to that of a weakly focusing synchrotron. The accelerating ferromagnetic cores and input and output devices are placed in the straight-line gaps. The accelerator is distinguished from the stationary field betatron by the fact that its leading field is variable in time. This makes it possible to strongly decrease the volume of steel and to reduce the source power. The intensity of the accelerator beam is comparable to that of the betatron with a stationary field ( $\sim 10^{14}$  electron/sec), and it approaches the linac intensity ( $\sim 10^{15}$  electron/sec) in a high-frequency variant (400 Hz) with an increased injection energy ( $\sim 1,5$  MeV).

The efficiency of the accelerator is high and can achieve tens of per cent.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

\* Индукционный ускоритель электронов - бетатрон давно используется в научных исследованиях и в промышленности. Долговечность классического ускорителя объясняется его достоинствами - простотой и экономичностью. Однако бетатрон уступает линейному ускорителю в интенсивности пучка. Кроме того, вес стали в нем быстро растет с увеличением энергии ускоренных электронов. Это обстоятельство, а также радиационные потери электронов ограничивают максимальную энергию электронов, ускоренных в бетатроне.

Индукционный метод ускорения не накладывает каких-либо ограничений на тип ускоряемых частиц. Однако в бетатроне нецелесообразно ускорять тяжелые частицы, поскольку объем стали в ускорителе оказывается в этом случае чрезмерно большим.

Возможности индукционного метода ускорения более полно используются в бетатроне с постоянным ведущим полем /БПП/ <sup>1-3/</sup>. В данной работе обсуждается циклический индукционный ускоритель, подобный БПП. Он отличается от обычного бетатрона и бетатрона с постоянным полем, в основном, тем, что вес стали в нем сильно уменьшен. Это придает ускорителю экономичность и делает его универсальным: в машине такого типа /с вполне приемлемым объемом стали/ можно ускорять частицы с разным отношением заряда к массе. Проведем вначале краткое обсуждение бетатрона с постоянным полем.

#### 1. БЕТАТРОН С ПОСТОЯННЫМ ВЕДУЩИМ ПОЛЕМ /БПП/

Ускорение электронов в БПП производится вихревым электрическим полем, создаваемым ферромагнитными сердечниками в постоянном сильнофокусирующем ведущем поле. Основная особенность БПП - длительное время инжекции, что дает возможность на несколько порядков по сравнению с бетатроном повысить интенсивность пучка. Была построена и запущена модель четырехсекторного БПП <sup>3/</sup> с энергией электронов 1,5 МэВ. При длительности импульса инжекции 2 мкс и частоте перемагничи-

вания сердечников 50 Гц получен средний ток пучка  $\sim 0,05$  мкА или  $\sim 3 \cdot 10^{11}$  электрон/с. Планируется увеличить время инжекции до 10 мкс, частоту перемагничивания - до 200 Гц; при этом ожидаемая средняя интенсивность превысит  $10^{18}$  электрон/с.

Остановимся на недостатках БПП. Это, прежде всего, большой объем стали - как плата за использование постоянного ведущего поля. Так, в проекте <sup>/2/</sup> БПП с энергией 100 МэВ вес стали практически тот же, что и в бетатроне на 100 МэВ <sup>/7/</sup> без подмагничивания. Далее, это трудности формирования ведущего поля, растущего с увеличением радиуса, а также низкая частота бетатронных колебаний по вертикали. Эти недостатки весьма прогрессивной по своей сути системы <sup>/2/</sup> можно заметно снизить, если в структуре <sup>/2/</sup> использовать переменное ведущее поле.

## 2. ЦИКЛИЧЕСКИЙ ИНДУКЦИОННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ /ЦИУ/

В качестве магнитной системы ускорителя выбрана система ведущего поля слабофокусирующего синхротрона <sup>/1.8/</sup>. В прямолинейных промежутках размещаются устройства ввода, вывода пучка и ускоряющие ферромагнитные сердечники - индукторы.

На рисунке представлена схема варианта ускорителя с шестью элементами периодичности. Схема подобна описанной в <sup>/2/</sup>, но отличается от последней тем, что радиальный размер вакуумной камеры, индукторов и магнитов существенно меньше за счет использования переменного ведущего поля. Это дает возможность существенно уменьшить по сравнению с БПП объем стали в ускорителе. Кроме того, сформировать слабофокусирующее ведущее поле ЦИУ значительно проще, чем растущее с увеличением радиуса сильнофокусирующее ведущее поле в БПП. Далее, слабофокусирующая магнитная система ЦИУ с большими прямолинейными промежутками обеспечивает частоту вертикальных бетатронных колебаний, превышающую  $\nu_z$  в БПП.

Индукторы перемагничиваются от источника синусоидального напряжения низкой частоты, например, 50 Гц. Ускоряющее поле имеет форму полуволны синусоиды; длительность импульса ускоряющего поля равна 10 мс /при 50 Гц/.

## 3. ИНЖЕКЦИЯ ПУЧКА

В отличие от БПП длительность инжекции в ЦИУ мала и равна времени одного оборота. Сейчас имеется все необходимое для осуществления однооборотной инжекции электронного пучка с максимальной интенсивностью, определяемой эффектом прост-

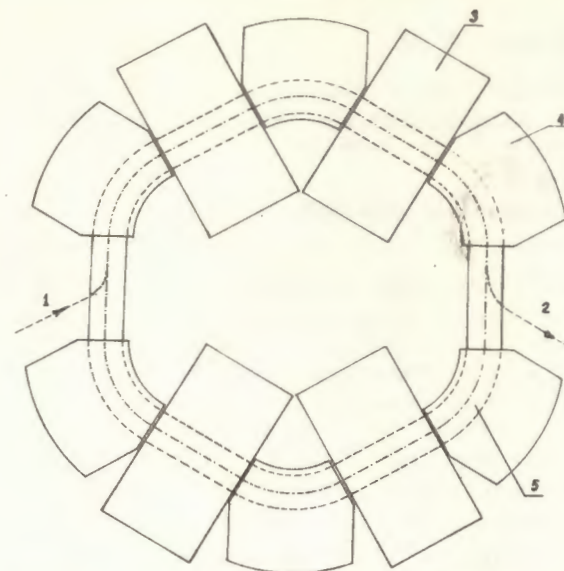


Схема циклического индукционного ускорителя: 1 и 2 - прямолинейные промежутки для ввода и вывода пучка, 3 - индукторы, 4 - магниты, 5 - вакуумная камера ускорителя.

ранственного заряда. Для этого требуется, прежде всего, мощный инжектор /более мощный, чем в БПП/. Максимальное число электронов, инжектированных в камеру ЦИУ, равно  $\sim 10^{12}$  /при энергии инжекции  $T_0 = 0,3$  МэВ/ и  $\sim 10^{18}$  /при  $T_0 = 1,5$  МэВ/. Время одного оборота равно 15 нс, значит, ток электронной пушки в импульсе  $\sim 15$  нс должен быть не менее 10,7 и 107 А при энергиях инжекции соответственно 0,3 и 1,5 МэВ. В настоящее время имеются электронные пушки с большим током.

Инжекция пучка в камеру может быть выполнена с помощью системы, в которой возбуждается импульсное электромагнитное поле; системы, подобной выводному устройству, осуществляющему однооборотный вывод электронного пучка из сильноточного бетатрона с энергией 25 МэВ, а также из электронного синхротрона с энергией 75 МэВ <sup>/4.5/</sup>. Для питания выводного устройства используется импульсный генератор, вырабатывающий прямоугольные импульсы напряжения длительностью  $\sim 10,5$  нс с фронтом  $\sim 1,5$  нс и амплитудой до 100 кВ. Для инжекции потребуется менее мощный генератор.

#### 4. ИНТЕНСИВНОСТЬ ПУЧКА

Число инжектированных в камеру электронов, определяемое предельным пространственным зарядом, вычислялось для циклического ускорителя <sup>8/</sup> по формуле

$$N_e = \frac{2\nu |\Delta\nu| \beta^2 \gamma^3}{R r_e} \cdot \frac{\pi b(a+b)}{2} \cdot \text{ВФ}, \quad /1/$$

где  $\nu$  - частота бетатронных колебаний,  $|\Delta\nu|$  - сдвиг частот бетатронных колебаний, обусловленный эффектом пространственного заряда,  $\beta$  - скорость электронов, отнесенная к скорости света,  $\gamma$  - отношение энергии электронов при инжекции к энергии покоя,  $R$  - средний радиус орбиты;  $r_e = 2,8 \cdot 10^{-15}$  м;  $2a$  и  $2b$  - радиальный и вертикальный размеры пучка при инжекции;  $\text{В}$  и  $\Phi$  - коэффициенты для учета эффектов банчировки пучка и влияния на него стенок камеры /сил от изображения пучка, электростатических и магнитных/. Коэффициент  $\text{В}$  равен 1, поскольку пучок в камере ЦИУ равномерно распределен по всему кольцу, а параметр  $\Phi$  вычисляется по формуле <sup>8/</sup>

$$\Phi = \left\{ 1 + \frac{b(a+b)}{h^2} \left[ \epsilon_1 (1 + \text{В} \beta^2 \gamma^2) + \epsilon_2 \text{В} \beta^2 \gamma^2 \left( \frac{h}{g} \right)^2 \right] \right\}^{-1}, \quad /2/$$

где  $2h$  - высота вакуумной камеры,  $2g$  - высота зазора магнита на равновесной орбите. Коэффициенты  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  зависят от геометрии и камеры, и полюсных наконечников. Для камеры круглого сечения  $\epsilon_1 = 0$ , а для эллиптической камеры с отношением осей, например, 2:1, величина  $\epsilon_1 = 0,172$ . Параметр  $\epsilon_2$  в нашем случае равен 0,206. Из /2/ видно, что предпочтительно использовать камеру круглого сечения.

#### 5. ОРБИТАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Магнитная система ускорителя компактна, поэтому нецелесообразно вводить большое число  $N$  элементов периодичности. А при малом  $N$  сильная фокусировка не имеет существенных преимуществ перед слабой. Поэтому была выбрана слабая фокусировка, как наиболее просто реализуемая. Число элементов периодичности было выбрано равным шести /см. табл. 1/, показатель  $n$  спада поля в магнитах взят близким к 0,5. При этом числа  $\nu_x$  и  $\nu_z$  бетатронных колебаний примерно одинаковы.

Отношение  $l/s$  длины прямолинейного промежутка к длине орбиты в отдельном магните выбиралось таким, чтобы: 1/ числа

Таблица 1

Параметры магнитной системы ЦИУ

№ пп	П а р а м е т р	В е л и ч и н а	
		Данная работа	/2/
1.	Энергия электронов, МэВ	100	100
2.	$N$ , число элементов периодичности	6	15
3.	$n$ , показатель спада (роста) поля	0,5	6
4.	$l/s$ , отношение длины прямолинейного промежутка к длине орбиты в магните	1,87	
5.	$\nu$ , числа бетатронных колебаний	а) по вертикали	0,7
		б) по радиусу	2,8
6.	Средний радиус орбиты, м	а) начальный	1,4
		б) конечный	2,8
7.	Максимальная индукция на конечном радиусе, $\tau$	0,79	0,96
8.	$F$ , формфактор огибающей пучка	1,20	

бетатронных колебаний отстояли как можно дальше от резонансных значений; 2/ формфактор  $F$  огибающей пучка не сильно отличался от единицы; 3/ длина  $l$  была достаточной для размещения индукторов и устройств ввода и вывода пучка. Были выбраны  $l/s = 1,87$ , при этом  $\nu_x = \nu_z = 1,24$ , и формфактор  $F = 1,20$ . При сдвиге частот  $|\Delta\nu| = 0,2$ , обусловленном эффектом пространственного заряда пучка, рабочая точка ускорителя на диаграмме резонансов в процессе ускорения смещается от  $\nu_0 = 1,04$  до  $\nu = 1,24$ . При этом она не пересекает ни одной резонансной линии до 4-го порядка включительно.

#### 6. УСКОРЯЮЩЕЕ ПОЛЕ

Ускоряющее поле возбуждается на оси индукторов и в зазорах магнитов /магнит имеет С-образную форму, вертикальная стойка ярма расположена снаружи и не охватывается орбитой/.

При одном обороте в камере ЦИУ частица проходит разность потенциалов, равную

$$U = U_i + U_p = \omega(\Phi_i + \Phi_p) \sin \omega t, \quad /3/$$

где индекс  $i$  относится к индукторам, а  $p$  - к магнитам,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  - частота питающего напряжения,  $\Phi_i$  - амплитуда суммарного магнитного потока, создаваемого индукторами,  $\Phi_p$  - амплитуда переменного потока магнитов, охватываемого орбитой:

$$\Phi_i = k(R - r)\ell_i B_i, \quad /4/$$

$$\Phi_p = k \frac{2\pi}{2-n} B_p \rho^n (\rho^{2-n} - \rho_0^{2-n}), \quad /5/$$

где  $k$  - коэффициент заполнения, который учитывает наличие изолирующих слоев в индукторах и магнитах, собранных из ленточной электротехнической стали,  $r$  и  $R$  - внутренний и внешний радиусы индуктора, имеющего форму полого цилиндра со стенкой  $t_i = R - r$ ,  $\ell_i$  - суммарная длина индукторов,  $B_i$  - индукция в сердечнике, усредненная по сечению,  $\rho$  - радиус равновесной орбиты в магнитах,  $\rho_0$  - радиус окружности, ограничивающей область поля,  $n$  - показатель спада ведущего поля и  $B_p$  - амплитуда переменной составляющей индукции на равновесной орбите в зазоре магнита. Усредненная по орбите напряженность ускоряющего поля равна.

$$E = E_i + E_p = \frac{\omega}{L} (\Phi_i + \Phi_p) \sin \omega t, \quad /6/$$

где  $L = 2\pi\rho + N\ell$  - длина орбиты,  $N$  - число элементов периодичности,  $\ell$  - длина прямолинейного промежутка. Решая уравнение движения заряженной частицы в поле /6/, легко получить формулу для вычисления импульса этой частицы:

$$P_t = P_0 + p_m(1 - \cos \omega t), \quad /7/$$

где  $P_0$  и  $P_t$  - начальный и конечный импульсы частицы /МэВ/с/,  $2p_m$  - прирост импульса частицы в процессе ускорения /МэВ/с/.

$$p_m = p_{mi} + p_{mp}, \quad /8/$$

$$p_{mi} = cZ\Phi_i/L \quad \text{и} \quad p_{mp} = cZ\Phi_p/L, \quad /9/$$

$c = 300$ ,  $Z$  - заряд частицы в единицах заряда электрона.

При этом величины  $L$ ,  $t_i$ ,  $\rho$  и  $\rho_0$  выражены в метрах,  $B_i$  и  $B_p$  - в тесла. Ведущее поле в соответствии с /7/ описывается выражением

$$B_t = B_0 + B_m(1 - \cos \omega t), \quad /10/$$

где  $B_m = B_p$ .

## 7. ПРОЦЕДУРА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ

Оценка параметров индукторов и магнитов выполнялась известным способом. Весь объем индуктора - полого цилиндра со стенкой толщиной  $t_i = R - r$  разбивался на ряд тонких концентрических слоев так, чтобы можно было считать постоянными магнитное поле и индукцию в каждом слое. Выбиралось определенное значение индукции на внутреннем радиусе, по кривой намагничивания материала  $B(T) - H(A/m)$  определялось магнитное поле  $H_T$  на этом радиусе и вычислялось необходимое количество ампервитков  $wI = 2\pi r H_T$ . Далее последовательно вычислялись поля  $H$  во всех слоях и по кривой намагничивания находилась индукция в них. Для каждого слоя вычислялись объем, масса, магнитный поток и с использованием кривой удельных потерь  $P(Wt/kg) - B(T)$  устанавливались потери, связанные с перемагничиванием в слое. Затем путем суммирования определялись для всего индуктора масса, потери в стали, магнитный поток, индуктивность, реактивная мощность и мощность потерь в обмотках.

Магнит имеет С-образную форму. Его можно представить в виде полого цилиндра с толстой стенкой и вырезом по образующей - зазором для вакуумной камеры. Процедура оценки параметров магнита подобна описанной выше.

## 8. ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЦИУ

Была проведена оценка параметров ЦИУ на энергии электронов 40 МэВ /при частоте перемагничивания сердечников  $f = 400$  Гц/ и 50, 100 и 200 МэВ /при  $f = 50$  Гц/. В индукторах и магнитах использовалась рулонная электротехническая сталь Э330А толщиной 0,35 мм /при  $f = 50$  Гц/ и Э360А толщиной 0,1 мм /при  $f = 400$  Гц/. Коэффициент  $k$  заполнения выбран 0,9 для стали Э330А и 0,8 - для Э360А.

Два прямолинейных промежутка ЦИУ отведены для устройств ввода и вывода пучка, а в четырех размещаются индукторы.

В табл. 1 приведены основные параметры магнитной системы. Для сравнения во второй колонке указаны некоторые данные проекта <sup>12/</sup> бетатрона с постоянным полем. Частота бетатронных колебаний по вертикали в БПП заметно ниже величины  $\nu_z$  в ЦИУ. Радиальный размер вакуумной камеры в БПП не менее 1,4 м, что значительно превышает величину  $2h = 7$  см - диаметр камеры в ЦИУ; как следствие этого - существенный выигрыш в объеме стали в ЦИУ. Величины  $N$ ,  $n$ ,  $l/s$ ,  $\nu$  и  $F$  одинаковы для всех вариантов ускорителя.

В табл. 2 и 3 представлены основные параметры индукторов и магнитов. Величина индукции на внутреннем радиусе сердечника принята равной  $B_r = 1,8$  Т /при  $f = 50$  Гц/ и  $1,5$  Т /при  $f = 400$  Гц/. Потери в индукторах связаны, в основном, с потерями в стали. Основная часть потерь в магнитах - с потерями в обмотках, они оценивались в медном проводнике при плотности тока  $2$  А/мм<sup>2</sup>.

В табл. 4 даны основные параметры ЦИУ. Для сравнения в колонках 7,8 и 9 приведены данные из проекта сильноточного бетатрона с энергией 50 МэВ <sup>12/</sup>, проекта БПП <sup>12/</sup> с энергией 100 МэВ и параметры работающего бетатрона <sup>17/</sup> без подмагничивания. Диаметр пучка при инжекции взят равным  $2a = 5$  см. Интенсивность пучка ЦИУ сравнима с таковой сильноточного бетатрона и приближается к интенсивности пучка БПП. Более того, высокочастотный ЦИУ / $f = 400$  Гц/ с повышенной энергией инжекции / $T_0 = 1,5$  МэВ/ по своей интенсивности примерно на порядок превосходит БПП и приближается к линейным ускорителям электронов / $\sim 10^{15}$  электрон/с/. Объем стали в ЦИУ в 6-10 раз меньше, чем в обычном бетатроне и в БПП; мощность потерь и мощность источника питания примерно в 10 раз меньше, чем в бетатроне.

Электроны вводятся в камеру ЦИУ при фазе ускоряющего напряжения  $\phi_{in} = 0^\circ$  и выводятся из нее или сбрасываются на мишень при  $\phi_{out} = 126^\circ \div 138^\circ$  для разных вариантов ЦИУ. При выводной фазе радиационные потери электронов составляют малую долю от прироста энергии за оборот - не более 10%.

### 9. ОСНОВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА УСКОРИТЕЛЯ

Наиболее важным преимуществом ЦИУ перед обычным бетатроном и БПП является его экономичность: небольшой объем стали, пониженная мощность источника питания и высокая интенсивность пучка. Коэффициент полезного действия ЦИУ рекордно высок. Например, в высокочастотном варианте ЦИУ / $f = 400$  Гц/ с энергией электронов 40 МэВ максимальная мощность ускоренного пучка равна  $P_e = 21,3$  кВт, а мощность потерь  $P_a = 31$  кВт.

Таблица 2

Параметры индукторов ЦИУ

№ пп	П а р а м е т р	В е л и ч и н а			
		40 МэВ	50 МэВ	100 МэВ	200 МэВ
1.	$r$ , внутренний радиус, см	6	6	6	6
2.	$R$ , внешний радиус, см	21	18	18	18
3.	$l_i$ , суммарная длина, м	1,96	1,57	3,53	7,04
4.	$M_i$ , масса стали, т	1,53	0,98	8,0	78,0
5.	$B_i$ , амплитуда индукции, Т	1,32	1,70	1,63	1,53
6.	$P_{li}$ , мощность потерь, кВт	20	1,6	11,5	86
7.	$P_{rl}$ , реактивная мощность, кВт	78	31	149	685

Таблица 3

Параметры магнитов ЦИУ

№ пп	П а р а м е т р	В е л и ч и н а			
		40 МэВ	50 МэВ	100 МэВ	200 МэВ
1.	$t_r$ , радиальный размер зазора, см	16	16	16	16
2.	$l_r$ , суммарная длина, м	1,57	1,26	2,51	5,03
3.	$M_r$ , масса стали, т	1,06	1,1	2,2	4,4
4.	$z_r$ , высота зазора, см	8	8	8	8
5.	$B_0 + B_m$ , постоянная составляющая индукции в зазоре, Т	0,346	0,505	0,503	0,564
6.	$B_m$ , амплитуда переменной составляющей индукции в зазоре, Т	0,321	0,495	0,497	0,561
7.	$P_{ar}$ , мощность потерь, кВт	11	9	18	34
8.	$P_{rr}$ , реактивная мощность, кВт	1300	490	1270	2540

Таблица 4  
Основные параметры ЦИУ

Параметр	Величина							
	3	4	5	6	7	8	9	10
1. T, конечная энергия, МэВ	40	50	100	200	50	100	100	100
2. T <sub>0</sub> , энергия инжекции, МэВ	1,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
3. Интенсивность:	а) 10 <sup>12</sup> электрон/имп.	8,3	1,2	0,6	0,3	0,64	2,0	0,002
	б) 10 <sup>14</sup> электрон/сек	33,2	0,6	0,3	0,15	0,32	1,0	0,001
4. U <sub>m</sub> , амплитуда ускоряющего напряжения, кВ	0,84	0,103	0,46	2,06		1,1		
5. f, частота перемагнитивания, Гц	400	50	50	50	50	50	50	50
6. M, масса активной стали, т	2,6	2,1	10,2	83	12	105		130
7. P, мощность источника питания, кВт	1410	532	1450	3350				24000
8. P <sub>л</sub> , мощность потерь, кВт	31	11	30	120	120			200
9. A, адмитанс ускорителя, 10 <sup>-3</sup> м.рад	2,84	3,53	1,77	0,87				
10. p, радиус орбиты в магните, м	0,25	0,20	0,40	0,80				0,83
11. R, средний радиус орбиты, м	0,72	0,57	1,15	2,30			1,4/2,8	

КПД ускорителя равен

$$\eta = P_e / (P_e + P_a) = 40,7\%$$

Если в индукторах и магнитах вместо стали Э360А использовать высококачественный пермаллой, напр., 40НКМП<sup>8/</sup>, то потери в ферромагнетике снизятся почти в 10 раз, и суммарная мощность потерь в индукторах и магнитах составит величину  $P_a = 11$  кВт, а КПД ускорителя будет равен  $\eta = 66\%$ . Если в ЦИУ используется высокоэффективное устройство вывода пучка /напр.,  $\epsilon = 80\%$ /, то в этом ускорителе ~53% подводимой электроэнергии преобразуется в кинетическую энергию выведенного электронного пучка.

ЦИУ на высокие энергии, напр., 100 ÷ 200 МэВ, могут конкурировать с электронным синхротроном. Интенсивность пучка в ЦИУ выше, чем в синхротроне, поскольку фактор банчировки  $V = \Delta\phi / 2\pi$  для ЦИУ равен 1, а для синхротрона меньше 1 /  $\Delta\phi$  - азимутальная протяженность сгустка электронов в камере ускорителя/. Кроме того, ускоряющая система ЦИУ проще и экономичнее синхротронной. Масса стали в ЦИУ больше, чем в синхротроне, однако ее величина /10 ÷ 80 т/ вполне приемлема.

Другое достоинство ЦИУ - универсальность, возможность ускорения частиц с разными значениями Z/A без существенных перестроек режима работы ускорителя. Напр., в электронном ЦИУ с энергией 200 МэВ полный природ. импульс за все время действия ускоряющего поля равен 278 МэВ/с. Если энергия инжекции протонов равна 0,3 МэВ, то их конечный импульс будет равен 302 МэВ/с, а кинетическая энергия - 47 МэВ.

#### КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Возможности индукционного метода ускорения в обычном бетатроне и в бетатроне с постоянным полем использованы не полностью. Технически осуществим циклический индукционный ускоритель с более высокими технико-экономическими параметрами, чем в известных индукционных ускорителях.

Автор благодарен В.С.Алфееву, Д.Л.Новикову, Э.А.Перельштейну, А.Б.Кузнецову, А.Д.Коваленко и М.Д.Шаfranову за полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коломенский А.А., Лебедев А.Н. Теория циклических ускорителей. Физматгиз, М., 1962.



2. Канунников В.Н. и др. АЭ, 1975, т.38, вып.4, с.234.
3. Канунников В.Н. и др. Труды шестого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978. ОИЯИ, Дубна, 1979, т. II, с.319.
4. Москалев В.А., Шашов В.В. Труды VII межвузовской конференции по электронным ускорителям. Атомиздат, М., 1970, вып. 2, с.30.
5. Воробьев А.А., Кононов Б.А., Евстигнеев В.В. Электронные пучки бетатронов. Атомиздат, М., 1974.
6. Брук Г. Циклические ускорители заряженных частиц. Атомиздат, М., 1970.
7. Westendorp W.F., Charlton E.E. Journ. Appl. Phys., 1945, v.16, p.581.
8. Справочник по электротехническим материалам./Под ред. Корицкого Ю.В. и др./"Энергия", Л., 1976, т.3.
9. Булаев О.Ф. и др. Труды шестого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978. ОИЯИ, Дубна, 1979, т. II, с.310.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 сентября 1979 года.