

X-303

4913/2-77

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



12/21-77

9 - 10868

М.С.Хвастунов

ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД УСКОРЕНИЯ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Часть III

1977

9 - 10868

М.С.Хвастунов

ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД УСКОРЕНИЯ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Часть III

Направлено в *"Nuclear Instruments and Methods"*

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Хвастунов М.С.

9 - 10868

Индукционный метод ускорения заряженных частиц.
Часть III

Предложен метод автоматической компенсации отклонений частиц в магнитных полях ускоряющих элементов нового типа - индукторов бегущего магнитного поля. Предложены также два варианта нового ускорителя - циклического индукционного ускорителя с бегущим полем. Показано, что в процессе ускорения сгустка ионов в предлагаемом ускорителе работает механизм автоматической коррекции энергии ионов, аналогичный известной автофазировке частиц в ускорителях. Описаны преимущества нового ускорителя перед известными циклическими ускорителями.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

В предыдущих работах автора ^{/1,2/} предложены метод ускорения частиц и новый ускоритель - индукционный ускоритель с бегущим полем.

В данной статье обсуждается метод компенсации отклонений частиц в магнитных полях индукторов - новых ускоряющих элементов - и описываются два варианта нового циклического индукционного ускорителя с бегущим полем.

1. АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ЧАСТИЦ В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ИНДУКТОРОВ

В рабочих зазорах индукторов бегущего магнитного поля - новых ускоряющих элементов ^{/2/} - ускоряемые частицы движутся в скрещенных электрическом ускоряющем и магнитном отклоняющем полях. При многократном прохождении индукторов /по мере роста импульса ускоряемых частиц/ углы отклонения частиц в магнитных полях индукторов будут изменяться. Изменение направления выхода частиц из ускоряющей системы нежелательно, поэтому необходимо скомпенсировать отклонения частиц.

Скомпенсировать отклонение частиц в индукторах можно сравнительно просто, например путем расположения индукторов, схематически показанного на *рис. 1*. Пучок ускоряемых частиц e^+ входит по направлению, параллельному оси Y , в 1-й индуктор, в нем частицы ускоряются в поле \vec{E} и отклоняются вправо на угол ϕ_1 в поле \vec{B} индуктора. Затем частицы последовательно проходят 2-й, 3-й и 4-й индукторы, ускоряясь в полях \vec{E} и отклоняясь на углы ϕ_2 , ϕ_3 и ϕ_4 в полях \vec{B} этих индукторов. Из 4-го индуктора частицы выходят по тому же направлению, по которому они вошли в 1-й индуктор.

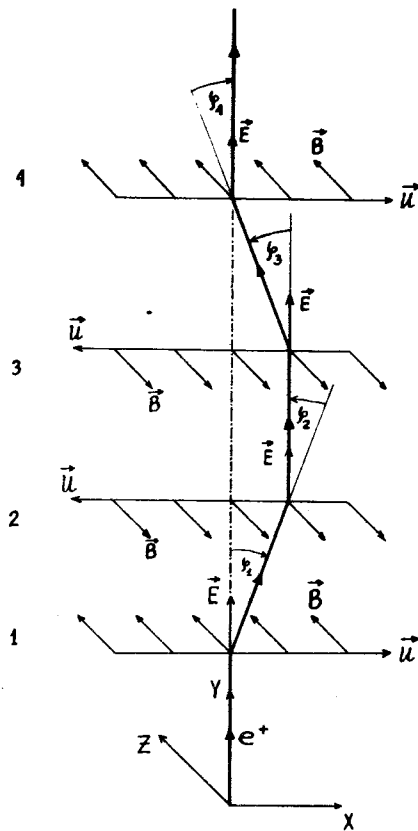


Рис. 1. Схема расположения четверки индукторов бегущего магнитного поля с автоматической компенсацией отклонений частиц в магнитных полях этих индукторов.

Магнитные поля \vec{B} в крайних /1-м и 4-м/ индукторах ориентированы по /против/ оси Z , а в средних /2-м и 3-м/ - против /по/ оси Z . В крайних индукторах электромагнитные волны распространяются со скоростью \vec{u} в положительном направлении оси X , а в средних - против оси X . Ускоряющие электрические поля \vec{E} во всех четырех индукторах имеют одинаковые направления по /против/ оси Y .

Наиболее совершенная компенсация отклонений будет иметь место в случае, когда прирост Δp импульса p ча-

стиц при одном прохождении четверки индукторов составляет малую величину от p /например, $\Delta p/p \leq 10^{-3}$ /. Вся совокупность индукторов разбита на группы по четыре индуктора. Следует отметить, что компенсация отклонений может быть осуществлена также другими способами, при этом число индукторов в группе может отличаться от четырех.

2. ЦИКЛИЧЕСКИЙ ИНДУКЦИОННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ С БЕГУЩИМ ПОЛЕМ

На рис. 2 и 3 представлены схемы двух вариантов предлагаемого циклического ускорителя с бегущим полем. Большинство элементов нового ускорителя известно и широко используется в ускорительной технике /3/. Это

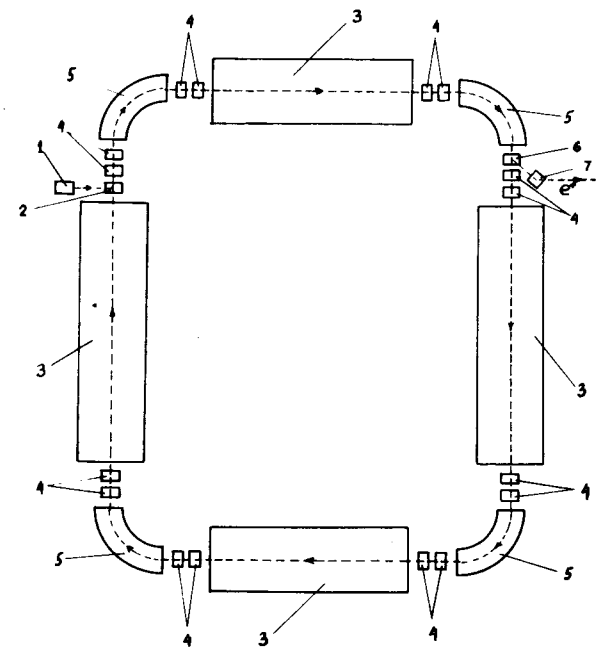


Рис. 2. Схема циклического индукционного ускорителя с бегущим полем /1-й вариант/.

ионный источник 1, импульсный магнит 2, дублиеты квадрупольных магнитных линз 4, отклоняющие магниты 5 /рис. 2/ и магнитные зеркала 5 /рис. 3/, кикер-магнит 6, септум-магнит 7 и магнитные линзы 8. Магнитные зеркала 5 /рис. 3/ подобны магнитным зеркалам, применяющимся в электронной оптике /4/. Линзы 8 /рис. 3/ имеют щелевидное входное окно /5/. Новые элементы ускорителя - индукторы бегущего магнитного поля 3, используемые в качестве ускоряющих устройств /2/. Совокупность индукторов разбита на группы, например по четыре индуктора, как это описано выше /см. п.1/.

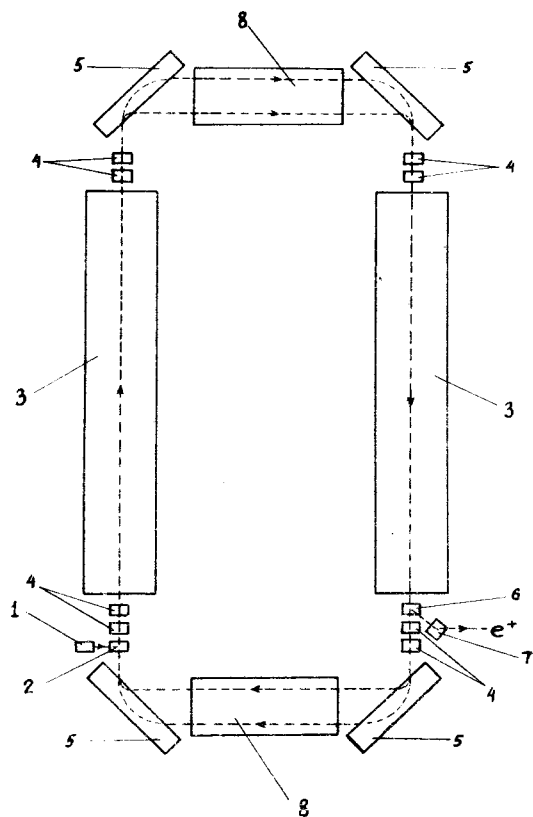


Рис. 3. Схема циклического индукционного ускорителя с бегущим полем /2-й вариант/.

В рабочих зазорах индукторов возбуждаются бегущие электромагнитные волны /2/, магнитные и электрические компоненты которых описываются известными соотношениями:

$$\vec{B}_i = \vec{B}_{mi} \cdot \sin(\omega t \pm ax_i), \quad /1/$$

$$\vec{E}_i = -\vec{u}_i \times \vec{B}_i, \quad /2/$$

где $i = 1, 2, 3, 4$.

Частота $f = \omega/2\pi$ переменного тока, питающего обмотки индукторов, может быть низкой и составлять единицы - десятки герц. Поэтому задача фазировки индукторов /2/ в данном случае максимально упрощается. Индукторы каждой группы располагаются так, что начала отсчетов их многофазных обмоток находятся на оси ускоряющей системы - на оси Y /см. рис. 1/: величины x_i в /1/ равны нулю. В момент времени $t = 0$ поле на оси Y равно нулю, а в последующие моменты времени в 1-м и 4-м индукторах слева, а во 2-м и 3-м индукторах справа к оси Y подходят соответственно положительные и отрицательные полуволны магнитного поля /см. рис. 1/. В момент $t = T/4$, где $T = 1/f$, поле на оси ускоряющей системы максимально, при $t = T/2$ поле на оси Y отсутствует, и при $t > T/2$ поле меняет свой знак.

Индукторы целесообразно выбрать идентичными. В соответствии с изложенным выше компоненты поля на оси Y в зазорах индукторов определяются соотношениями

$$E = 2r f B_m \sin \omega t, \quad /3/$$

$$B = B_m \sin \omega t, \quad /4/$$

где $2rf = u$, а r - полюсное деление индуктора.

В момент времени $t = 0$ ионы e^+ из источника 1 /см. рис. 2 и 3/ с помощью импульсного магнита 2 вводятся в вакуумную камеру и направляются по равновесной орбите /инжекция частиц выполняется так же, как в известных ускорителях/. В течение полупериода ионы ускоряются полем /3/ и в момент $t = T/2$ с помощью

кикер- и септум-магнитов 6 и 7 выводятся из камеры ускорителя /вывод частиц - как в известных ускорителях/. Частота следования импульсов ускоренных ионов равна частоте f переменного тока в индукторах. Ведущее магнитное поле в 1-м варианте /рис. 2/ - переменное: магнитное поле в зазорах отклоняющих магнитов 5 изменяется во времени в соответствии с ростом импульса ускоряемых ионов. А во 2-м варианте ведущее поле - магнитное поле в зеркалах 5 - постоянно. Фокусировка частиц осуществляется с помощью дублетов квадрупольных линз 3 и линз 8 с щелевым окном.

3. АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ЭНЕРГИИ ЧАСТИЦ В ЦИКЛИЧЕСКОМ УСКОРИТЕЛЕ С БЕГУЩИМ ПОЛЕМ

Ионы из источника перед вводом в камеру ускорителя разгоняются в электрическом поле, проходя разность потенциалов U около 1 МВ. Ионы с кинетической энергией qU имеют достаточно большой импульс, чтобы можно было пренебречь малыми отклонениями их траекторий от оси ускоряющей системы.

Длительность t_0 сгустка инжектированных частиц примем равной $t_0 = L/v_0$, где L - длина орбиты, а v_0 - скорость ионов. Рассмотрим поведение этого сгустка частиц в процессе ускорения. Поскольку частицы ускорятся растущим во времени полем /3/, то поведение частиц, первыми вошедших в камеру /в момент времени t'_1 /, будет отличаться от поведения частиц в конце сгустка /инжектированных в момент времени $t'_2 > t'_1$, $t_0 - t'_2 - t'_1$ /. Назовем частицы, введенные в момент $t'_0 = (t'_1 + t'_2)/2$, равновесными, а частицы с моментами инжекции (t'_1, t'_0) и (t'_0, t'_2) - соответственно опережающими и запаздывающими относительно равновесных частиц на времена $-\Delta t_1 = 0 \div + (t'_1 - t'_0)$ и $\Delta t_2 = 0 \div + (t'_2 - t'_0)$ ($-\Delta t_1 < 0$, $\Delta t_2 > 0$).

Изменение ΔE ускоряющего поля, обусловленное разбросом Δt моментов инжекции частиц, может быть описано в соответствии с /3/ выражениями

$$\Delta E = 2\tau f \omega B_m \cos \omega t \cdot \Delta t, \quad /5/$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\pi/2}{\text{tg} \omega t} \cdot \frac{\Delta t}{T/4}, \quad /6/$$

где $T=1/f$. Для равновесных частиц примем $\Delta E=0$, тогда для опережающих частиц

$$\Delta E_1 = -2\tau f \omega B_m \cdot \cos \omega t \cdot \Delta t_1, \quad /7/$$

а для запаздывающих частиц

$$\Delta E_2 = 2\tau f \omega B_m \cos \omega t \cdot \Delta t_2, \quad /8/$$

т.е. опережающие /запаздывающие/ частицы попадают в более слабые /сильные/ ускоряющие поля, чем равновесные частицы. По этой причине темп набора энергии опережающих /запаздывающих/ частиц в процессе ускорения будет меньше /больше/ скорости набора энергии равновесных частиц. Это приведет к тому, что опережающие /запаздывающие/ частицы будут сближаться с равновесными и это сближение /сжатие сгустка частиц/ будет происходить тем быстрее, чем больше величина Δt_1 (Δt_2) частицы /см. /7/ и /8//. При этом энергии частиц будут приближаться к энергии равновесной частицы. При любых случайных изменениях положения частицы в сгустке и отклонениях энергии частицы от равновесной энергии автоматически включается описанный выше механизм сжатия сгустка частиц и коррекции их энергии. В данном случае мы имеем дело с явлением, аналогичным известной автофазировке частиц в ускорителях.

Процесс сжатия сгустка будет иметь место в течение 1-й половины цикла ускорения /при $0 \leq \omega t \leq \pi/2$ /. Ситуация меняется во 2-й половине цикла ускорения ($\pi/2 \leq \omega t \leq \pi$): функции $\cos \omega t$ и $\text{tg} \omega t$ в /5/, /6/, /7/ и /8/ изменяют свои знаки, что приводит к медленному расплыванию сгустка частиц по орбите и некоторому увеличению энергетического разброса частиц. Если в процессе ускорения скорость частиц практически не ме-

няется, только растет импульс частиц /инжектируются в камеру ускорителя релятивистские частицы/, то, как легко в этом убедиться, расплывание сгустка ускоренных частиц велико и в конце цикла ускорения сгусток частиц может занимать по длине всю камеру ускорителя. Ситуация иная в случае ускорения нерелятивистских частиц: скорость частиц наиболее значительно изменяется в 1-й половине цикла ускорения, когда происходит сжатие сгустка, а во 2-й половине - изменения скорости существенно меньше и соответственно этому эффект расплывания сгустка частиц не полностью компенсирует эффект сжатия этого сгустка. Кроме того, величины Δt_1 и Δt_2 в /7/ и /8/ по мере роста скорости частиц уменьшаются /максимальные значения Δt_1 и Δt_2 равны $t_0/2$, где t_0 - время полного оборота частиц по орбите/.

Поэтому "дефокусирующее" действие ускоряющего поля /см. /7/ и /8// во 2-й половине цикла ускорения существенно меньше "фокусирующего" действия этого поля в 1-й половине цикла ускорения.

4. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ С БЕГУЩИМ ПОЛЕМ

Изменение импульса частиц в процессе ускорения описывается известным уравнением

$$\frac{dp}{dt} = qE, \quad /9/$$

где q - заряд частицы в единицах заряда электрона.

Ускоряющее поле E сосредоточено в рабочих зазорах индукторов. Для удобства введем эффективное ускоряющее поле E_e равномерно распределенное по всей орбите. Поле E_e определим из условия $qE \cdot \Delta t_0 = qE_e \cdot \Delta t$, где Δt_0 - время пролета частицами индукторов /время, в течение которого действует поле E /, а Δt - полное время оборота. Скорость частиц в течение одного оборота изменяется незначительно, поэтому $\Delta t_0 / \Delta t = \ell_0 / \ell = g$, где ℓ_0 - длина части орбиты, находящейся в рабочих зазорах индукторов, а ℓ - полная длина орбиты. Эффективное

поле E_e равно: $E_e = gE = 2grfB \sin \omega t$ /см. /3//. Подставляя величину E_e вместо поля E в /9/ и выполняя интегрирование, получим

$$p = p_0 + \frac{1}{\pi} qgrB_m (1 - \cos \omega t), \quad /10/$$

где p_0 - начальный импульс частиц /при $\omega t = 0$ /. Конечный импульс частиц равен /при $\omega t = \pi$ /:

$$p_m = p_0 + \frac{2}{\pi} qgrB_m \quad /11/$$

и не зависит от частоты f переменного тока в индукторах. Аналогичная ситуация имеет место в бетатроне. Если p_m и p_0 выражены в МэВ/с, r - в метрах, а B_m - в тесла, то формула /11/ принимает вид

$$p_m = p_0 + agqrB_m, \quad /11a/$$

где $a = 1,91 \cdot 10^2 \frac{\text{МэВ}}{\text{В} \cdot \text{с}}$.

Энергия W_e сгустка /импульса/ частиц равна

$$W_e = qNT_m, \quad /12/$$

где N - число частиц в импульсе, а T_m - кинетическая энергия частиц с импульсом p_m . С другой стороны, энергия импульса частиц может быть записана в виде

$$W_{e0} = \frac{\eta \mathcal{P}}{2f}, \quad /13/$$

где η - доля мощности волны в индукторе, переданной сгустку частиц, \mathcal{P} - суммарная мощность всех индукторов. Приравнявая правые части выражений /12/ и /13/, получим формулу для числа частиц в импульсе:

$$N = \frac{k}{2} \cdot \frac{\eta \mathcal{P}}{qfT_m}, \quad /14/$$

где $k = 0,624 \cdot 10^{13} \text{ МэВ/Дж}$, \mathcal{P} - в Вт, T_m - в МэВ.

Зная число N частиц в импульсе, их заряд и частоту повторения импульсов, можно вычислить средний ток пучка:

$$I_e = \frac{ak}{2} \cdot \frac{\eta \mathcal{P}}{T_m},$$

/15/

где $a = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, I_e - в амперах.

В таблице приведены для иллюстративных целей оценки основных параметров циклического ускорителя с бегущим полем. Оценки выполнены для ионов водорода и дейтерия /2-й вариант ускорителя/, двухзарядных ионов гелия и шестизарядных ионов углерода /1-й вариант ускорителя - см. п. 2/.

Параметры индукторов во всех случаях выбраны одинаковыми: полюсное деление $\tau = 6$ м, амплитуда индукции в зазоре $B_m = 1,8$ Т, высота зазора $h = 0,05$ м, $\eta = 0,01$; геометрический фактор g ускорителя взят равным 0,3. Частота переменного тока в индукторах для 1-го варианта ускорителя выбрана равной 1 Гц, а для 2-го - 50 Гц. Кинетическая энергия T_m ускоренных ионов составляет сотни МэВ, энергия на нуклон $T_m/A \approx 60$ МэВ, число N ионов в импульсе $\sim 10^{15}$, средний ток пучка - единицы - десятки мА, энергия W_e импульса - десятки кДж, длительность T импульса при однооборотном выводе - десятые доли микросекунды. В последнем столбце таблицы приведены ориентировочные размеры ускорителя.

Ориентировочные значения суммарной мощности \mathcal{P} индукторов для 1-го варианта ускорителя составляют $0,78 \cdot 10^7$ Вт (He_2^4) и $1,88 \cdot 10^7$ Вт (C_6^{12}), а для 2-го варианта - $0,78 \cdot 10^9$ Вт/ H_1^1 и H_1^2 /. При низких значениях параметра η индукторов / $\eta = 0,01$ / они работают в режиме холостого хода. Поэтому мощность индукторов в данном случае - это реактивная мощность, а от источника питания потребляется мощность, идущая на ускорение сгустка ионов /1% от мощности \mathcal{P} /, и мощность /несколько процентов от \mathcal{P} /, необходимая для покрытия потерь на перемагничивание ферромагнетика индукторов и на покрытие тепловых потерь в их обмотках.

Индукторы ускорителя аналогичны индукторам бегущего магнитного поля, применяемым в индукционных насосах жидких металлов и на транспорте /2,6,7/, к.п.д. которых составляет $\eta_0 \approx 25\%$. Представляется естествен-

Таблица
Основные параметры циклического ускорителя с бегущим полем

Параметры Ионы	f (Гц)	P_m (МэВ/с)	T_m (МэВ)	T_m/A (МэВ/ НУКЛОН)	W_e (кДж)	N (1/имп- пучка)	I_e (мА)	t (с)	$a \times b$ (м x м)
H_1^1	50	663	210	210	$0,78 \cdot 10^5$	$2,32 \cdot 10^{15}$	18,6	$0,37 \cdot 10^{-6}$	12 x 30
H_1^2	50	681	118	59,0	$0,78 \cdot 10^5$	$4,12 \cdot 10^{15}$	33,0	$0,62 \cdot 10^{-6}$	12 x 30
He_2^4	1	1362	242	60,5	$0,39 \cdot 10^5$	$0,52 \cdot 10^{15}$	8,0	$0,56 \cdot 10^{-6}$	15 x 15
C_6^{12}	1	4086	726	60,5	$0,94 \cdot 10^5$	$2,24 \cdot 10^{14}$	6,4	$1,4 \cdot 10^{-6}$	40 x 40

ным полагать, что параметр η индукторов ускорителя /аналог к.п.д. индуктора/ может достигать величин η_0 ; при этом интенсивности пучков ускоренных ионов будут превышать значения, приведенные в таблице, в ~25 раз.

Имеется также резерв повышения энергии ионов на выходе ускорителя. Как видно из выражения /11/, этот резерв - в увеличении полюсного деления τ индукторов. Нет никаких принципиальных ограничений для увеличения параметра τ индуктора /7/. Представляется вполне целесообразным увеличить полюсное деление в несколько раз, например в три раза: $\tau = 18$ м. При этом импульсы ускоренных ионов могут достигать величин ~2 ГэВ / H_1^1 и H_1^2 /, ~4 ГэВ / He_2^4 / и ~12 ГэВ (C_6^{12}).

5. ПРЕИМУЩЕСТВА ЦИКЛИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ С БЕГУЩИМ ПОЛЕМ

Предлагаемый ускоритель является ускорителем трансформаторного типа: его ускоряющая система состоит из набора индукторов-трансформаторов с бегущим магнитным полем /8/, первичные обмотки которых /многофазные обмотки индукторов/ индивидуальные, а вторичная обмотка общая - пучок ускоряемых частиц. С этой точки зрения обсуждаемый ускоритель похож на линейный индукционный ускоритель /ЛИУ/ /3/, но отличается от него тем, что у циклического ускорителя-трансформатора вторичная обмотка многовитковая /пучок ионов в процессе ускорения многократно проходит индукторы/, а у ЛИУ - вторичная обмотка одновитковая /пучок частиц проходит индукторы один раз/. Отсюда происходят и преимущества предлагаемого ускорителя перед известными циклическими ускорителями: простота конструкции, высокие интенсивности пучков, простота системы питания и экономичность /высокий к.п.д. ускорителя/.

Циклический индукционный ускоритель с бегущим полем может обеспечить пучки ионов с энергией от единиц МэВ до нескольких ГэВ, т.е. полностью перекрывает энергетическую область циклотрона, изохронного циклотрона и синхрофазотрона /3/ и при этом существенно

/на 1-3 порядка/ превосходит известные циклические ускорители по интенсивности пучка.

6. КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Предложен метод автоматической компенсации отклонений частиц в магнитных полях ускоряющих элементов нового типа - индукторов бегущего магнитного поля. Предложено также два варианта нового ускорителя - циклического индукционного ускорителя с бегущим полем. Показано, что в процессе ускорения сгустка ионов в предлагаемом ускорителе работает механизм автоматической коррекции энергии ионов, аналогичный известной автофазировке частиц в ускорителях. Описаны преимущества нового ускорителя перед известными циклическими ускорителями.

Автор благодарен В.П.Дмитриевскому, И.Н.Семенюшкину, М.Д.Шафранову, А.Г.Бонч-Осмоловскому, С.Б.Рубину и А.Б.Кузнецову за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хвасунов М.С. ОИЯИ, 9-10772, Дубна, 1977.
2. Хвасунов М.С. ОИЯИ, 9-10867, Дубна, 1977.
3. Комар Е.Г. Основы ускорительной техники. Атомиздат, М., 1975.
4. Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика. Наука, Л., 1968.
5. Штеффен К. Оптика пучков высокой энергии. Мир, М., 1969.
6. Вольдек А.И. Электрические машины. Энергия, Л., 1974.
7. Laithwaite E.R. Proc. IEEE, v.63, No.5, May 1975, p.250.
8. Нейман Л.Я., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники, ч. II, Госэнергоиздат, М.-Л., 1959.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 июля 1977 года.