

X-303

4912/2-77

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



12/411-77
9 - 10867

М.С.Хвастунов

ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД УСКОРЕНИЯ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ.

Часть II

1977

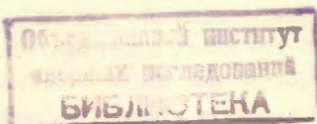
9 - 10867

М.С.Хвастунов

ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД УСКОРЕНИЯ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ.

Часть II

Направлено в "Nuclear Instruments and Methods"



Хвастунов М.С.

9. - 10867

Индукционный метод ускорения заряженных частиц,
Часть II

Предложено два варианта индукторов бегущего магнитного поля - ускоряющих элементов нового индукционного ускорителя. Предложена также схема нового линейного (спирального) индукционного ускорителя с бегущим полем и показаны его преимущества перед известными линейными ускорителями ионов.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

В предыдущей работе автора ^{/1/} был предложен метод ускорения частиц в электрическом поле, возникающем при движении магнитного поля в направлении, перпендикулярном траектории ускоряемых частиц. При этом перемещение магнитного поля обеспечивается вращением электромагнитов или с помощью многофазных обмоток, питаемых симметричной системой многофазных токов. На основе данного метода предложен новый ускоритель - индукционный ускоритель с бегущим полем. В настоящей работе дано описание одного из вариантов предлагаемого ускорителя.

Для связности изложения в первых трех пунктах в основном приводятся известные из электротехники сведения.

1. ИНДУКТОР БЕГУЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Ускоряющим элементом нового ускорителя является индуктор бегущего магнитного поля, аналогичный индуктору, обычно используемому в линейных электрических машинах, в частности в линейных индукционных насосах для жидких металлов ^{/2/}. На *рис. 1а* представлена схема известного индуктора ^{/2/} - прототипа предлагаемого. Индуктор имеет два плоских магнитопровода *1*, расположенных друг против друга параллельно плоскости XU и имеющих пазы, параллельные оси Y , в которых размещены многофазные /обычно трехфазные/ обмотки *2*. Бегущее магнитное поле возбуждается в рабочем зазоре *3* индуктора.

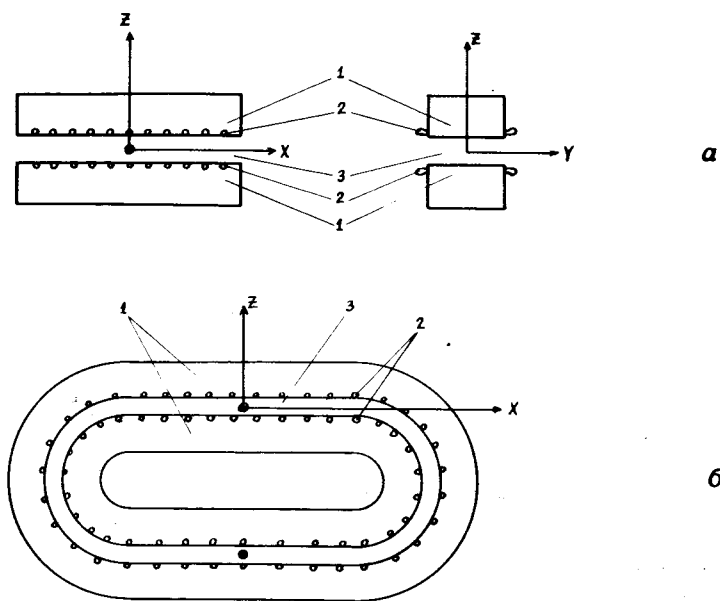


Рис. 1. Схема индуктора бегущего магнитного поля /1-й вариант/.

Как известно ^{/3/}, у обсуждаемого индуктора есть существенный недостаток, обусловленный разомкнутостью магнитопровода, а именно: наличие в рабочем зазоре, кроме бегущего магнитного поля, пульсирующих полей, присутствие которых весьма нежелательно. Поэтому представляется целесообразным с целью исключения пульсирующих полей изменить магнитную систему индуктора, сделав ее замкнутой. На рис. 1б приведена схема 1-го варианта такого индуктора. Магнитопроводы 1 индуктора имеют, как и в его прототипе, прямолинейные участки. Многофазные обмотки 2 в принципе те же, что у известного индуктора. Бегущее магнитное поле возбуждается в замкнутом рабочем зазоре 3.

На рис. 2 показана схема 2-го варианта индуктора бегущего магнитного поля. Основная особенность этого варианта - поворот магнитных силовых линий в магнитопроводе индуктора в плоскость, перпендикулярную на-

правлению движения волны. Известны линейные электрические машины с подобными индукторами ^{/4/}. На рис. 2 обозначено: 1 - магнитопровод, 2 - многофазная обмотка, 3 - рабочий зазор индуктора, 4 - сквозное отверстие в индукторе, предназначенное для прохода пучка ускоряемых частиц; 1 на рис. 2б - листы электротехнической стали или пермаллоя. Магнитопровод индуктора может быть набран из таких листов так, как это схематично показано на рис. 2б. Магнитные силовые линии в зазоре индуктора ориентированы по оси Z, а в магнитопроводе - по оси Z, затем вдоль оси Y и опять вдоль оси Z. Заметим, что в 1-м варианте индуктора магнитные силовые линии в зазоре также ориентированы

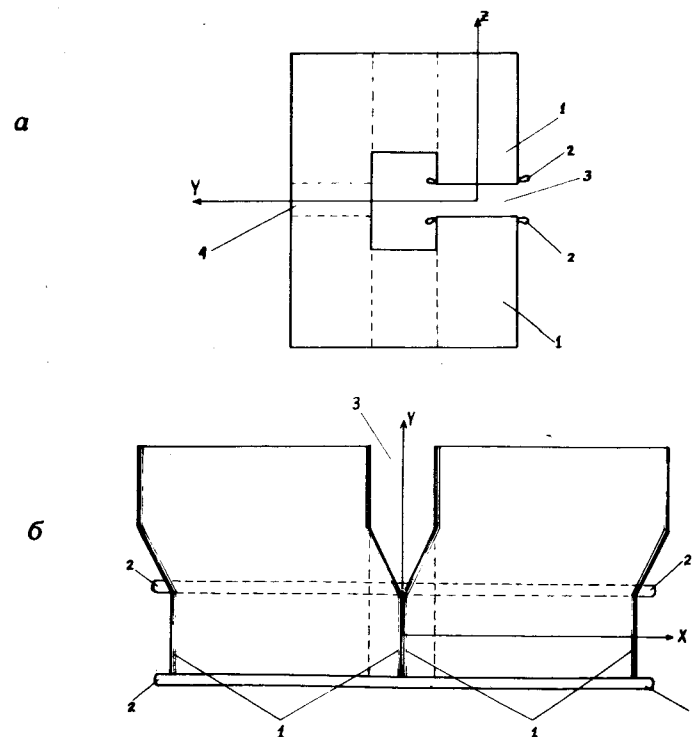


Рис. 2. Схема индуктора бегущего магнитного поля /2-й вариант/.

по оси Z, а в магнитопроводе /его прямолинейном участке/ - по или против оси X.

Второй вариант индуктора предпочтительней в тех случаях, когда требуется обеспечить высокую скорость волны в индукторе /4/. Материал магнитопровода должен иметь малые потери на перемагничивание и большое значение произведения $f_{max} \cdot B_s$, где f_{max} - максимальная рабочая частота материала, а B_s - индукция насыщения на этой частоте.

2. ВОЗБУЖДЕНИЕ БЕГУЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ ИНДУКТОРА

Метод возбуждения бегущего /или вращающегося/ магнитного поля известен /2,5,6/ и заключается в следующем: m -фазной симметричной системой токов питают m -фазную обмотку; при этом ось $(k+1)$ -й фазной обмотки смещена в пространстве относительно оси k -й фазной обмотки на угол $2\pi/m$, а $k = 1, 2, 3, \dots, m-1$.

В электротехнике преимущественно используется трехфазная система токов и трехфазные обмотки, из которых наиболее предпочтительной является двухслойная обмотка с укороченным шагом /2/. Дальнейшие рассуждения в основном приводятся применительно к такой обмотке. Известно, что форма кривой магнитной индукции в зазоре имеет форму трапеции /2,5,6/. Обычно эту кривую разлагают в ряд Фурье, и основные гармоники магнитной индукции в зазоре для всех фазных обмоток имеют вид /2,5,6/:

$$\begin{aligned} B_1 &= B_{01} \cos ax, \\ B_2 &= B_{02} \cos(ax - \frac{2\pi}{3}), \\ B_3 &= B_{03} \cos(ax - \frac{4\pi}{3}), \end{aligned} \quad /1/$$

где $a = \pi/\tau$, τ - полюсное деление обмотки /величина 2τ равна длине магнитной волны в зазоре индуктора/.

Магнитная индукция B_i ($i=1,2,3$) в зазоре максимальна по оси обмотки и по мере удаления от нее изменяется по косинусоидальному закону. Если трехфазная обмотка питается симметричной трехфазной системой токов:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_m \cos \omega t, \\ I_2 &= I_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}), \\ I_3 &= I_m \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}), \end{aligned} \quad /2/$$

то величины B_{0i} определяются известными соотношениями

$$\begin{aligned} B_{01} &= B_m \cos \omega t, \\ B_{02} &= B_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}), \\ B_{03} &= B_m \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}), \end{aligned} \quad /3/$$

где B_m - максимальная индукция на оси обмотки, определяется числом ампервитков обмотки и высотой зазора индуктора.

Подставив выражения /3/ в формулы /1/ и выполнив простые вычисления, получим формулу, описывающую бегущую /вращающуюся/ магнитную волну в зазоре индуктора /2,5,6/:

$$B = B_1 + B_2 + B_3 = \frac{3}{2} B_m \cos(\omega t - ax). \quad /4/$$

В общем случае для m -фазной обмотки формула /4/ принимает вид

$$B = \frac{m}{2} B_m \cos(\omega t - ax). \quad /5/$$

Фактически суть явления заключается в следующем /2,5,6/. Каждая фазная обмотка возбуждает пульсирующее магнитное поле, аналогичное полю в трансформаторе. Пульсирующее поле может быть разложено на две волны, бегущих в противоположных направлениях.

Смещение фазных обмоток в пространстве и фазовый сдвиг токов, питающих эти обмотки /смещение во времени/, обеспечивают взаимное гашение волн одного направления и сложение волн противоположного направления.

3. СКОРОСТЬ ВОЛНЫ В ИНДУКТОРЕ

Фазовая скорость $u = \frac{dx}{dt}$ волны в зазоре индуктора

определяется в соответствии с выражениями /4/ и /5/ из условия постоянства фазы $\omega t - \alpha x = \text{const}$ /2,5,6/:

$$u = \frac{\omega}{\alpha} = 2\pi f. \quad /6/$$

Бегущее со скоростью \vec{u} , магнитное поле \vec{B} возбуждает электрическое поле \vec{E} , определяемое известным соотношением /7/

$$\vec{E} = -\vec{u} \times \vec{B}. \quad /7/$$

В нашем случае магнитная волна распространяется в положительном направлении оси X, вектор магнитной индукции \vec{B} в волне ориентирован по или против оси Z, а электрическое поле \vec{E} волны - по или против оси Y.

В работах по электрическим машинам обычно говорят о магнитном поле, вращающемся /или бегущем/ в рабочем зазоре, несмотря на то, что в природе может существовать только единое электромагнитное поле. Для этого есть такое основание. При малых скоростях поля, используемых в электрических машинах, энергия электромагнитного поля в зазоре в основном сосредоточена в его магнитной компоненте.

Электромагнитная волна, распространяющаяся в зазоре индуктора, топологически подобна плоской электромагнитной волне в вакууме в том смысле, что тройка векторов, \vec{E} , \vec{B} и \vec{u} , образует правовинтовую систему, как и векторы \vec{E}_0 , \vec{B}_0 и \vec{c} волны в вакууме.

Плотность потока электромагнитной энергии в зазоре индуктора определяется в соответствии с /7/ известным выражением

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} = \vec{u} \cdot \text{HB}, \quad /8/$$

т.е. аналогично свободной волне волна в зазоре индуктора переносит энергию /и импульс/ в направлении своего движения.

Можно легко показать, что известное соотношение между электрической и магнитной компонентами свободной волны в вакууме

$$E_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} H_0 \quad /9/$$

преобразуется к виду, аналогичному /7/. Для этого достаточно заменить \vec{H}_0 на $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}_0$ и учесть, что $\vec{E}_0 \perp \vec{B}_0$:

$$\vec{E}_0 = -\vec{c} \times \vec{B}_0, \quad /10/$$

где $|\vec{c}| = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$.

Как следует из сравнения формул /7/ и /10/, максимальная скорость волны в индукторе может быть равна скорости света. Обычно в электрических машинах скорость u составляет десятки-сотни метров в секунду. Представляется весьма важным выяснить технические возможности получения больших скоростей волн в индукторе. Большие скорости u предпочтительней в индукторах, используемых в качестве ускоряющих элементов, поскольку при увеличении скорости u происходит перераспределение энергии волны между электрической и магнитной компонентами: энергия электрической компоненты возрастает, а магнитной - падает. Это означает, что при одной и той же подводимой к индукторам мощности прирост энергии на единицу длины будет больше в том индукторе, в котором скорость волны выше.

Скорость волны u в индукторе можно повышать, увеличивая полюсное деление τ индуктора /размеры индуктора/ или повышая частоту f переменного тока, питающего обмотку индуктора /или делая и то и другое/.

Возьмем значение τ в пределах $/0,2 \div 1,0/$ м. Для выяснения вопроса, какие максимальные частоты f возможны в индукторе, по-видимому, достаточно вспомнить принцип его работы /см. П.2./. Каждая фазная обмотка индуктора работает практически так же, как обмотка трансформатора. Поэтому представляется естественным полагать, что максимальная рабочая частота индуктора близка к аналогичной величине для трансформатора. Как известно, трансформаторы могут работать при весьма высоких частотах /например, сотни МГц/, определяемых в основном рабочей частотой материала магнитопровода. В настоящее время освоены промышленностью ферромагнетики /ферриты и магнитодиэлектрики/ с малыми потерями на частотах в сотни МГц и выше^{/8/}, пригодные для работы в устройствах большой мощности. Такого типа ферромагнетики могут быть использованы в индукторах бегущего магнитного поля.

Следует отметить, что высокочастотные трансформаторы часто используются без ферромагнетика. Подобно таким трансформаторам, индукторы бегущего поля могут быть выполнены без магнитопровода из ферромагнетика.

Резюмируя сказанное выше, заключаем, что технически обеспечиваемые скорости u волны в индукторе могут приближаться к скорости света.

4. ИНДУКЦИОННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ С БЕГУЩИМ ПОЛЕМ

В общих чертах новый индукционный ускоритель описан в предыдущей работе автора^{/1/}. Здесь обсуждается вариант линейного /вернее, спирального /индукционного ускорителя с бегущим полем. На рис. 3 представлена схема ускорителя: 1 - ионный источник; e^+ - пучок ускоряемых частиц; 1,2,...,n - ускоряющие элементы - индукторы бегущего магнитного поля, описанные выше /см. п.1/, 3 - вектор \vec{E} волны в индукторе; \vec{u} - скорость этой волны; \vec{E} - ускоряющее поле в индукторе.

Индукторы сфазированы друг относительно друга так, что волна в $(k+1)$ -м индукторе отстает от волны в k -м

индукторе на время пролета частицей k -го индуктора и зазора между k -м и $(k+1)$ -м индукторами. На рис. 3 схематично показано положение волн в отдельных индукторах относительно траектории ускоряемых частиц в те моменты времени, когда частицы входят в данный индуктор.

При высоких частотах переменного тока такую фазировку можно обеспечить путем соответствующего выбора длин кабелей, по которым подводится энергия к индукторам, а при низких - с помощью фазовращателей.

Работа ускорителя происходит следующим образом. Частицы из источника предварительно разгоняются в

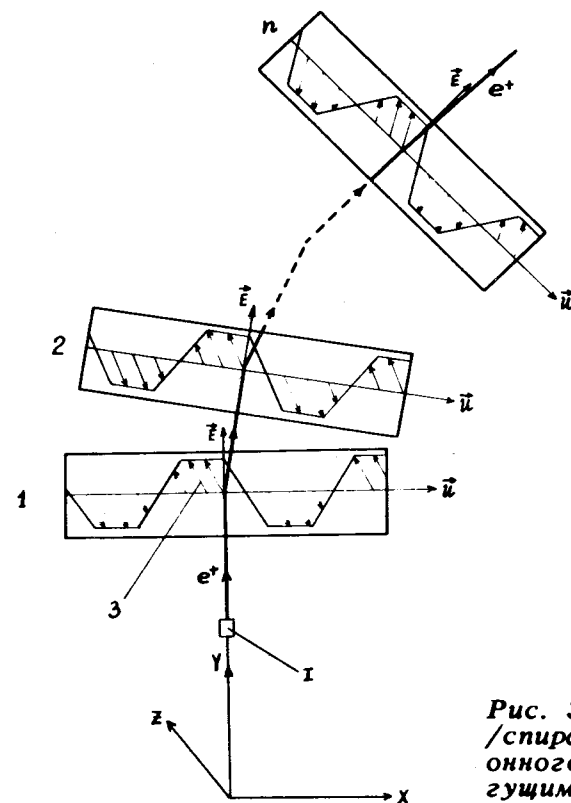


Рис. 3. Схема линейного /спирального/ индукционного ускорителя с бегущим полем.

электростатическом поле, пройдя разность потенциалов порядка 500 кВ. В момент времени, когда в зазоре 1-го индуктора к оси ускоряющей системы - траектории ускоряемого пучка - подходит плоская вершина волны с нужным направлением электрического поля /вдоль оси Y/, начинается ввод частиц в ускоряющую систему.

Инжекция частиц производится непрерывно в течение отрезка времени t_0 , равного, например в случае трехфазной двухслойной обмотки с укороченным шагом, величине

$$t_0 = \frac{T}{6} - t_c, \quad /11/$$

где $T = 1/f$, а t_c - время пролета частицами 1-го индуктора. Поскольку индукторы сфазированы друг относительно друга, то введенный сгусток частиц будет попадать во все последующие индукторы в нужное время и будет ускоряться.

Возможны два режима работы ускорителя: непрерывный, когда на выходе ускорителя сгустки ускоренных частиц длительностью t_0 следуют с частотой f переменного тока, и импульсный, аналогичный режиму работы известных линейных ускорителей ионов.

Движение частиц в зазоре индуктора происходит в скрещенных электрическом и магнитном полях, и их траектории в зазорах - участки трохойд. Отклонение частиц в различных индукторах легко подсчитать и учесть путем соответствующего расположения индукторов.

Фокусировка частиц производится магнитными линзами, расположенными с некоторым интервалом в промежутках между индукторами /на рис. 3 эти элементы не показаны/.

5. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСКОРИТЕЛЯ С БЕГУЩИМ ПОЛЕМ

Ускоряющие поля E в зазорах индукторов могут достигать больших значений, ограниченных лишь величинами доступных в настоящее время мощностей высоко-

частотных источников питания и электрической прочностью многофазной обмотки.

Кинетическая энергия T частиц с зарядом Z на выходе ускорителя равна:

$$T = T_0 + Z \cdot \sum_{i=1}^n E_i \cdot \ell_i, \quad /12/$$

где T_0 - энергия инжектируемых частиц, E_i - ускоряющее поле в i -м индукторе, ℓ_i - размер этого индуктора вдоль направления, определяемого вектором \vec{E}_i . Энергетический разброс частиц $\Delta T/T$ незначителен в условиях, когда магнитопроводы индукторов не насыщены и тем самым обеспечено постоянство индукции B и ускоряющего поля E на плоской вершине волны; по предварительным оценкам, величина $\Delta T/T$ не превышает 1%.

Амплитуда S_i плотности потока энергии в зазоре i -го индуктора равна:

$$S_i = \frac{1}{\mu_0} u B_i^2, \quad /13/$$

где B_i - амплитуда индукции в зазоре. Если высота зазора - h_i , то мощность p_i волны в зазоре определяется выражением

$$p_i = \frac{1}{\mu_0} u B_i^2 h_i \ell_i. \quad /14/$$

Прирост мощности ускоряемого пучка в зазоре индуктора составляет величину

$$\Delta p_{ei} = u B_i \ell_i I_e, \quad /15/$$

где I_e - ток пучка /в отдельном сгустке/. Величину тока пучка можно получить из условия $\Delta p_{ei} = \eta p_i$, где η - к.п.д. индуктора /доля мощности волны в индукторе, переданная ускоряемому пучку/:

$$I_e = \frac{\eta}{\mu_0} B_i h_i. \quad /16/$$

Число частиц в сгустке в соответствии с /16/ и /11/ равно:

$$n_0 = \frac{k}{Z} I_e t_0,$$

/17/

где $k = 0,624 \cdot 10^{19} a^{-1} c^{-1}$, Z - заряд ускоряемых частиц в единицах заряда электрона.

В приведенной таблице даны для иллюстративных целей оценки параметров линейного ускорителя с бегущим полем для случаев ускорения различных частиц: протонов, α -частиц и десятизарядных ионов урана ($U(10)$).

Ионы из источника перед вводом в 1-й индуктор разгоняются в электрическом поле - проходят в поле разность потенциалов 500 кВ. Геометрия индукторов для всех трех сортов частиц выбрана одинаковой: $r = 1$ м, $h_i = 0,01$ м и $l_i = 0,1$ м; его к.п.д. $\eta = 0,1$; амплитуда индукции в зазоре $\vec{B} = 0,2$ в.с/м²/тесла/.

Частоты f переменного тока выбраны из условия $T/6 > t_e/cm$. выражение 11/. Длительности t_0 сгустков частиц составляют единицы наносекунд, мощности p_i индукторов в течение отрезков времени t_0 - сотни мВт, ток пучка I_e в сгустке - порядка сотни ампер, число частиц n_0 в сгустке $\sim 10^{12}$.

Ускоритель работает в импульсном режиме, аналогичном режиму работы линейных ускорителей ионов - инжекторов больших циклических ускорителей. Число сгустков N в импульсе - 100, частота следования импульсов - 1 Гц. При этом длительности импульсов t - порядка десятков микросекунд, средние мощности p_i индукторов - около десятка кВт, число частиц в импульсе $\sim 10^{14}$, и в каждом импульсе сгустки частиц следуют с частотой f , а средний ток I_e пучка в импульсе составляет единицы ампер.

Ускоряющие поля E_i , характеризующие прирост энергии частиц на единицу длины ускорителя, могут достигать больших значений /единицы МВ/м/ и в принципе могут превышать поля в известных линейных ускорителях ионов^{/9/}. Наиболее существенное преимущество ускорителя - в большом среднем токе I_e пучка в импульсе; величина \bar{I}_e примерно на два порядка превышает средний ток в импульсе известных линейных ускорителей ионов^{/9/}. При этом длительность импульса t примерно на порядок меньше, чем в известных.

Таблица. Основные параметры ускорителя

Параметры	f (МГц)	u_i (м/с)	E_i (В/м)	P_i (Вт)	t_0 (нс)	N_0 (И/сгустков-тор)	t (мкс)	P_i (Вт)	\bar{I}_e (а)	I_e (а)	N (И/импульс)
P	10	$2 \cdot 10^7$	$4,0 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^8$	6,4	$6,4 \cdot 10^{12}$	10,0	$0,64 \cdot 10^4$	10,3	160	$6,4 \cdot 10^{14}$
α	8	$1,6 \cdot 10^7$	$3,2 \cdot 10^6$	$5,1 \cdot 10^8$	6,5	$3,2 \cdot 10^{12}$	12,5	$0,64 \cdot 10^4$	8,2	160	$3,2 \cdot 10^{14}$
(10)	3	$0,6 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^8$	5,8	$0,58 \cdot 10^{12}$	33,3	$0,64 \cdot 10^4$	2,8	160	$0,58 \cdot 10^{14}$

6. КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

1. Предложено два варианта индукторов бегущего магнитного поля - ускоряющих элементов нового индукционного ускорителя.

2. Предложена схема нового линейного /спирального/ индукционного ускорителя с бегущим полем и показаны его преимущества перед известными линейными ускорителями ионов.

Автор выражает искреннюю благодарность В.П.Дмитриевскому, И.Н.Семенюшкину, М.Д.Шафранову, Л.П.Зиновьеву, А.Г.Бонч-Осмоловскому, В.И.Илющенко и П.И.Филиппову за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хвастунов М.С. ОИЯИ, 9-10772, Дубна, 1977.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. Изд. "Энергия", Л., 1974.
3. Штурман Г.И. Электричество, 1946, 10, 43.
4. Laithwaite Eric R. Proc. IEEE, 1975, v. 63, No. 5, p. 250.
5. Круг К.А. Основы электротехники, т. 2, Госэнергоиздат, М.-Л., 1946.
6. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники, ч. II, Госэнергоиздат, М.-Л., 1959.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. Физматгиз, М., 1962.
8. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы. Изд. Высшая школа, М., 1976.
9. Catalogue of high-energy accelerators. Compiled by: M.H.Blewett, N.Vogt-Nilsen. CERN, Geneva, September, 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 июля 1977 года.