

222  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория нейтронной физики

Ю. П. ВАХРУШИН

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА УСКОРЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ  
СИЛЬНОТОЧНОГО ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО  
УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Автореферат диссертации  
на соискание ученой сте-  
пени кандидата технических  
наук

Научный руководитель: кандидат физико-мате-  
матических наук В. П. Сарафцев

Дубна

1967

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте  
электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова.

Стремление получить мощные потоки релятивистских электронов для исследований в области термоядерного синтеза [1, 2, 3], новых методов ускорения [4], а также получения мощных потоков  $\gamma$ -квантов привело в начале шестидесятых годов к воссозданию идеи А. Боуверса о линейном индукционном ускорителе, высказанной им относительно давно [5]. Сущность идеи заключается в использовании для ускорения заряженных частиц вихревого электрического поля последовательного ряда торoidalных трансформаторов, первичные обмотки которых включаются параллельно, а вторичные (роль их выполняет ускоряемый пучок) - последовательно. Эта система названа А. Боуверсом "магнитным соленоидом". Заряженная частица при прохождении через "магнитный соленоид" должна приобрести энергию

$$eU = eN \frac{U_1}{w_1} \quad (1)$$

Здесь  $e$  - заряд ускоряемой частицы;

$N$  - число трансформаторов;

$U_1$  - напряжение на первичной обмотке;

$w_1$  - число витков первичной обмотки.

Видно, что величина приобретаемой энергии пропорциональна напряжению первичной обмотки трансформатора. Для того чтобы энергия, приобретаемая частицами, оставалась постоянной в течение какого-то времени  $t_u$ , необходимо, чтобы  $U_1$  было постоянно в течение этого времени. Это требование можно удовлетворить, если на обмотку подавать импульс прямоугольной формы длительностью  $t_u$ .

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Из теории импульсных трансформаторов следует, что прямоугольный импульс может быть получен при линейном изменении индукции  $B$  в сердечнике импульсного трансформатора.

Подсчет показывает, что при разумных размерах ускорителя величина

$$\frac{\Delta B}{\tau_u} \geq (1-3) \cdot 10^6 \frac{мл}{сек}$$

Поэтому техническая возможность сооружения линейного индукционного ускорителя появилась после того, как были созданы специальные магнитные сплавы, например типа пермаллоев, разработаны мощные коммутрующие элементы типа современных водородных тириатронов. И сейчас возможно создание ускорителя с током до 1000а и достижима приращение энергии  $\sim 0,5$  Мэв/м.

Причем в отличие от ускорителя с обычным импульсным трансформатором в индукционном ускорителе имеет место распределенное электрическое поле и поэтому наибольшие напряженности электрического поля могут лишь незначительно превышать среднее ускоряющее электрическое поле. Это обстоятельство дает возможность создать ускоритель на значительно большие энергии, чем с обычным импульсным трансформатором, а возможность ускорения пучка с током в сотни ампер делает его пока единственным источником мощного пучка электронов релятивистских энергий.

В [5] дается общая идея ускорителя в предположении, что "магнитный соленоид" имеет бесконечно большую длину, что обуславливает наличие однородного поля в области ускоряемого пучка. В действительности же ускоритель имеет конечную энергию и, следовательно, конечную длину. Из условия необходимости размещения откачных агрегатов для создания и поддер-

жания требуемого разрежения в области пучка и приборов для измерения, фокусировки и наблюдения пучка, а также, принимая во внимание требования производства, контроля, испытания и транспортировки, целесообразно весь ускоритель разбить на отдельные секции с промежутками между ними для размещения необходимых агрегатов и приборов.

В пределах секции между сердечниками тороидальных трансформаторов (индукторов) имеется некоторый зазор, обусловленный необходимостью иметь электрическую изоляцию между сердечником и первичной обмоткой, демпфирующую среду, предохраняющую сердечник от механических и тепловых напряжений. Это все показывает, что реальной установке свойственно дискретное распределение магнитного потока. К этому надо добавить, что с внутренней стороны индукторов могут располагаться конструктивные элементы, необходимые для создания в области пучка требуемого разрежения и т.д.

Из изложенного следует, что ускоряющее поле в реальной установке является функцией координат и, следовательно, разработка ускорителя связана с исследованием величины и формы поля в зависимости от размеров и формы ускоряющей системы.

Поскольку линейный индукционный ускоритель является высокоточным, то в нем чрезвычайно сильно проявляется действие собственного пространственного заряда. Это обстоятельство требует сочетания ускоряющей секции с эффективной системой, позволяющей осуществить сохранение размеров пучка в процессе его ускорения. Анализ показывает, что линзы могут быть использованы, начиная с энергии в несколько Мэв, и вопрос о сохранении формы пучка в начальной стадии ускорения требу-

ет исследования и разработки. Наличие сильноточного пучка обуславливает также требования к разрежению в области пучка, ибо при прохождении сильноточного пучка через среду остаточного газа возникает электрон-ионные колебания, которые при недостаточно хорошем разрежении могут привести к потере устойчивости пучка.

С точки зрения сокращения размеров системы и уменьшения стоимости сооружения и эксплуатации ускорителя целесообразно отказаться от специальной вакуумной трубки и обеспечить требуемое разрежение в области пучка путем создания вакуумно-плотной ускоряющей секции.

Такая система оказалась возможной, но потребовалось проведение экспериментальных исследований по определению оптимальных вакуумных характеристик такой системы.

Теоретическое и экспериментальное исследование перечисленных вопросов и составляет содержание диссертации. Необходимость проведения этой работы связана с разработкой и изготовлением в НИИЭТА им. Д. В. Ефремова линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000 на энергию 3 МэВ с током пучка 200 а. Поскольку сооружение такого ускорителя в СССР проводится впервые, то опыт, накопленный при разработке конструкции и создании ускорителя, имеет значительный интерес.

В связи с этим в диссертации отражены также вопросы конструирования и технологии изготовления ускоряющей системы.

## П.

Ускоряющее поле системы определяется уравнениями Максвелла

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0; \quad (3)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E}, \quad (4)$$

где  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  - напряженности ускоряющего и магнитного полей;  
 $\mu$  - магнитная проницаемость;  
 $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость.

Ускоряющее поле соленоидально и, следовательно, может быть введен векторный потенциал  $\vec{M}$ , так что

$$\vec{E} = \operatorname{rot} \vec{M} \quad (5)$$

В области, где изменением магнитного поля во времени можно пренебречь, может быть введен скалярный потенциал  $U$ , подчиняющийся уравнению Лапласа

$$\nabla^2 U = 0 \quad (6)$$

Из (2) и (4) получаем:

$$\text{для вакуума} \quad \nabla^2 \vec{E} = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}; \quad (7)$$

$$\text{для проводящей среды} \quad \nabla^2 \vec{E} = \sigma \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (8)$$

Длительность импульса ускоряющего поля обычно составляет доли микросекунды и правой частью уравнения (7) можно пренебречь. Отсюда для ускоряющей системы линейного индукционного ускорителя справедливо выражение

$$\nabla^2 \vec{E} = 0 \quad (9)$$

Уравнения (2), (3), (4) аналогичны по форме уравнениям, определяющим напряженность магнитного поля постоянных токов. Поэтому для определения поля "магнитного соленоида" конечной длины можно воспользоваться методом нахождения магнитного поля витков с током [6].

Нахождение решения в общем виде имеет значительные трудности и осуществимо при интегрировании на вычислительной машине. Однако для анализа поля достаточно рассмотреть выражение для поля вблизи оси системы, которое имеет вид

$$E_z = -\frac{V}{2} \left\{ \frac{\ell - \xi}{[1 + (\ell - \xi)^2]^{3/2}} \left[ 1 + \frac{3}{4} \frac{z^2}{[1 + (\ell - \xi)^2]^2} \right] + \frac{\ell + \xi}{[1 + (\ell + \xi)^2]^{3/2}} \left[ 1 + \frac{3}{4} \frac{z^2}{[1 + (\ell + \xi)^2]^2} \right] \right\}, \quad (10)$$

где  $V = \frac{\partial \varphi}{\partial t} \frac{N}{L}$  - соответствует напряжению, прикладываемому к первичной обмотке, отнесенному к единице длины системы;

$$z = \frac{\rho}{R}, \quad \ell = \frac{L}{2R}, \quad \xi = \frac{z}{R}$$

$R$  - средний радиус индуктора;

$L$  - длина системы.

Анализ выражения (10) показывает, что при недостаточно протяженной системе значительная часть поля рассеивается вне секции, а неоднородность поля, превышающая  $\sim 0,5\%$  проявляется в области  $1,5 - 2R$  от края секции.

Распределение поля может быть улучшено, если уменьшить долю энергии поля, рассеиваемой с внешней стороны системы. Это может быть сделано, если сердечники индукторов окружить с внешней стороны проводящим кожухом. Этот кожух будет экранировать ускоряющее поле от влияния проводящих масс, расположенных вблизи ускорителя. При этом необходимо также иметь в виду, что внутри ускоряющей системы могут размещаться такие узлы установки, как вакуумная трубка или элементы системы формирования пучка, что естественно сказывается на форме ускоряющего поля. Таким образом, ускоряющая система должна отличаться от "магнитного соленоида" А.Бюверса.

Две возможные разновидности систем приняты в установках ЛИУ-3000 и "Астрон" [2,7]. Форма поля в этом случае будет определяться решением уравнения Лапласа (9) с граничными условиями, определяемыми формой системы. Граничные условия будут представлять собой периодическую функцию, которую можно разложить в ряд Фурье. Составляющие ускоряющего поля также будут представлены суммой гармоник, амплитуда и частота которых определяются из сопоставления с разложением граничной функции.

Для системы, принятой для установки ЛИУ-3000, составляющие поля будут определяться следующими выражениями:

$$E_z = \varrho E_a \left[ 1 + \sum_n^m E_n I_0 \left( n \frac{2\pi}{S} \rho \right) \cos n \frac{2\pi}{S} z \right]; \quad (11)$$

$$E_\rho = \varrho E_a \sum_n^m E_n I_1 \left( n \frac{2\pi}{S} \rho \right) \sin n \frac{2\pi}{S} z \quad (12)$$

Здесь

$E_a = \frac{U_i}{S_i}$  - поле в зазоре между индукторами;

$q = \frac{S_i}{S}$  - отношение длины зазора между индукторами к осевой длине индуктора;

$$E_n = \frac{(-1)^n 4 \cos n \frac{\pi}{2} q \sin \frac{\pi n}{2} q}{\pi q n I_0(n \frac{2\pi}{S} \alpha)}$$

$\alpha$  - внутренний радиус системы;

$I_0$  - модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка;

$I_1$  - модифицированная функция Бесселя первого порядка.

Поскольку  $I_0(n \frac{2\pi}{S} \alpha)$  очень быстро растет с ростом  $n$ , то в широкой, наиболее интересной области, можно ограничиться только первым членом ряда в выражениях (II) и (I2). Анализ отношения амплитуды первой гармоники к постоянной составляющей, показывает, что с точки зрения однородности поля основное значение имеет величина отношения  $\alpha/S$  и для достаточно однородного поля необходимо иметь  $\alpha/S > 1$ . Амплитуда первой гармоники не превышает одного процента в области  $\rho/\alpha < 0,5$ , если  $\alpha/S > 2$ .

Для системы установки "Астрон" получаются аналогичные результаты, хотя выражения для  $E_z$  и  $E_p$  будут несколько отличаться от выражений (II) и (I2) вследствие неодинаковости граничных условий.

Анализ решения для поля на краю системы показывает, что возмущение поля сказывается на расстоянии, не превышающем трех радиусов отверстия кожуха.

Поскольку радиус отверстия для реальной системы в

несколько раз меньше среднего радиуса индуктора, то уже при  $L/2R=3$  частицы приобретают практически полную энергию, определяемую суммой напряжений на индукторах:

Из (II) видно, что если  $q=1$ , то амплитуда переменной составляющей будет равна нулю во всей области внутри ускоряющей системы. Требование  $q=1$  означает, что на всей цилиндрической поверхности радиуса  $\alpha$  соблюдается условие

$E_{2\alpha} = E_\alpha = \text{Const.}$  Такие условия могут быть созданы, если между торцами кожуха, охватывающего сердечники, разместить проводящий цилиндр, проводимость материала которого удовлетворяет условию

$$|\sigma \vec{E}| \gg |\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}|$$

Кроме этого, проводящая трубка должна удовлетворять еще ряду требований, которые накладывают дополнительные условия на величину проводимости, анализ которых показывает, что выполнение такой трубки реально.

Расчетным путем не всегда удастся определить значение ускоряющего поля в различных точках системы. Кроме того, применение расчета лишено надежности и в ряде случаев весьма трудоемко. При определении статического электрического и магнитного полей широко используется моделирование в электролитической ванне, которое основано на подобии уравнений и граничных условий исследуемых полей в вакууме и в электролите при сохранении подобия формы электродных систем. Если распределение потенциала на границе ускоряющей системы очевидно, как например, в системе ускорителя установки "Астрон", то с помощью обычной электролитической ванны с наклонным дном может

быть найдено распределение потенциала ускоряющего поля, а по полученным данным построена картина напряженности ускоряющего поля. Однако задать потенциал на границе не всегда удается и, кроме того, нагляднее моделировать непосредственно напряженность ускоряющего поля. Оказывается, что такая модель может быть создана, если выполнить следующие условия. Дно ванны должно быть сделано из диэлектрика и иметь форму гиперболы; через ось системы должна проходить проводящая плоская поверхность под углом  $45^\circ$  к поверхности электролита; поверхности индукторов трансформируются в гиперболы, и металлические поверхности заменяются на непроводящие; источники изменения магнитного потока заменяются на источники тока. В этом случае распределение потенциала на свободной поверхности электролита в ванне будет соответствовать распределению потока напряженности ускоряющего поля. С помощью разработанной модели была получена картина поля в ускоряющей секции установки ЛИУ-3000.

### Ш.

В работе [2] задача формирования пучка в начальной стадии ускорения решена созданием специальной секции ускорителя на энергию 720 кэВ с компенсацией расталкивающего действия собственного пространственного заряда пучка радиальной составляющей вихревого ускоряющего поля. Необходимое распределение градиента создается подключением к электродам соответственного количества индукторов. С целью уменьшения пучка размеры его приняты большими, 220 мм у катода. Но даже при таких размерах требуются значительные градиенты

компенсирующего поля. Это, в свою очередь, приводит к необходимости повышения электрической прочности по поверхности вакуумной трубки. Поэтому вся система помещается в бак с газообразным фреоном под давлением 2 атм. Такое решение имеет следующие недостатки:

а. Приходится принимать завышенные размеры сердечников индукторов. Они имеют внешний диаметр 860 мм, а внутренний 460 мм, в то время как в остальной части ускорителя 540 мм и 200 мм соответственно. Это приводит к увеличению расхода магнитного сплава и в 1,8 раза тока намагничивания, что, в свою очередь, вызывает увеличение необходимого количества коммутрующих элементов.

б. Требуется специальное газовое хозяйство для прогона фреона через установку. Это имеет определенные эксплуатационные неудобства.

в. Подобную систему вряд ли можно использовать при токах, превышающих 200а, так как уже при этом токе (200а) приходится применять специальные меры для увеличения электрической прочности. При больших же токах и, следовательно, в большем пространственном заряде требуются большие градиенты для компенсации его.

Положительным является использование для формирования пучка продольного магнитного поля. Однако создание его с помощью соленоида, расположенного с внешней стороны ускоряющей системы, как это делается в радиоэлектронных приборах, невозможно, ибо пермаллоевые сердечники индукторов экранируют область ускорения от внешнего магнитного поля. Размещение же соленоида внутри системы привело бы к экранированию ускоря-

этого поля. Задачу оказалось возможным решить с помощью конструкции системы, предложенной автором. Необходимое магнитное поле создается с помощью катушек, укрепленных на внутренней стороне каждого индуктора.

Поскольку вопрос о форме релятивистского пучка, распространяющегося в продольных магнитном и электрическом полях, ранее не рассматривался, то в диссертации делается вывод уравнения, определяющего форму пучка, и проводится его анализ.

Задача решается при следующих предположениях, действительных для линейного индукционного ускорителя:

- 1) потенциал, обусловленный пространственным зарядом пучка, не влияет на продольное движение частиц;
- 2) ускоряющее электрическое и фокусирующее магнитные поля имеют лишь продольные составляющие;
- 3) пучок имеет ламинарную структуру, т.е. нет пересечений траекторий частиц;
- 4) магнитное поле у катода равно нулю.

В общем случае уравнение движения заряженной частицы в электромагнитном поле имеет вид

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = e\vec{E} + e(\vec{v} \times \vec{B}), \quad (13)$$

где  $\vec{P} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  — импульс частицы.

Из уравнения для  $\dot{v}$ -ой составляющей импульса следует

$$\dot{v} = \frac{1}{2} \frac{eB}{m_0} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (14)$$

Рассматривая пучок с током  $I_n$  как бесконечно длинный цилиндр с радиусом  $\rho$ , с помощью формулы Гаусса и закона Био и Савара после преобразования (13) получаем уравнение, определяющее форму, силноточного электронного пучка:

$$\begin{aligned} \rho (m_0^2 c^2 + P^2) \frac{d^2 \rho}{dP^2} + \rho^2 \frac{d\rho}{dP} + \frac{1}{2} \rho \left( \frac{Bc}{E} \right)^2 \rho &= \\ &= \frac{I_n m_0^2 c^2}{2\pi \epsilon_0 e E^2} \frac{1}{\rho}. \end{aligned} \quad (15)$$

В этом уравнении  $\rho = |\vec{P}|$

Правая часть уравнения соответствует силе, вызывающей расталкивание пучка, а последний член в левой части соответствует силе, стягивающей пучок к оси. Сила, вызывающая расплывание пучка, обратно пропорциональна, а сила, стягивающая пучок, прямо пропорциональна радиусу. Отсюда следует, что для каждого  $\rho(z)$  должно существовать такое значение  $\rho = \rho_1(\rho)$ , при котором сила, действующая на периферийную частицу пучка, двигающуюся параллельно оси, равна нулю. Из (15) имеем

$$\rho_1(\rho) = \frac{m_0}{B} \sqrt{\frac{2 I_n}{\pi \epsilon_0 e \rho}} \quad (16)$$

Решение уравнения (15) ищется в виде

$$\rho(\rho) = \rho_1(\rho) + \Delta \rho(\rho),$$

причем  $\Delta \rho \ll \rho_1$ ,

Рассматривается два случая:

$$1) B = \text{Const} \quad \text{и} \quad 2) B \sim \frac{1}{\rho},$$



В процессе решения при  $B = \text{const}$  показывается, что для того, чтобы имели место малые отклонения радиуса пучка от величины  $\rho_i(P)$ , кроме выбора соответствующим образом условий ввода пучка в магнитное поле, необходимо, чтобы выполнялось соотношение

$$2 \left( \frac{Bc}{E} \right)^2 \gg 1 \quad (17)$$

В реальных условиях, как правило,  $2 \left( \frac{Bc}{E} \right)^2 > 10^3$  и условие (17) выполняется. Решение уравнения (15) будет иметь вид

$$\rho = \rho_i(P) + [\rho_i(P_{ин}) - \rho_i(P_{ин})] \cos \left[ \frac{Bc}{\sqrt{2}E} \left( azc \operatorname{Sh} \frac{P}{m_0c} - azc \operatorname{Sh} \frac{P_{ин}}{m_0c} \right) \right] +$$

$$+ [\rho_i'(P_{ин}) - \rho_i'(P_{ин})] \frac{\sqrt{2}P_{ин}}{eB} \sin \left[ \frac{Bc}{\sqrt{2}E} \left( azc \operatorname{Sh} \frac{P}{m_0c} - azc \operatorname{Sh} \frac{P_{ин}}{m_0c} \right) \right] \quad (18)$$

Индексом "ин" обозначено начальное значение величины. Таким образом в однородном ускоряющем электрическом поле и параллельном ему однородном магнитном поле пучок совершает пульсации вокруг среднего радиуса, величина которого уменьшается с увеличением энергии частиц.

Решение уравнения при  $B = \frac{m_0}{\rho_i(P_{ин})} \sqrt{\frac{2I_n}{\pi \epsilon_0 e P}}$  может быть найдено при  $P^2 \gg m_0^2 c^2$  и также имеет колебательный характер, однако в отличие от случая  $B = \text{const}$  амплитуда колебаний растет по мере увеличения энергии частиц пучка.

Наряду с влиянием собственно пространственного заряда

пучка в диссертации рассматривается также рассеяние пучка на атомах остаточного газа и неустойчивость пучка, обусловленная электрон-ионными колебаниями электронов пучка и образованных ими ионов остаточного газа.

Эффект рассеяния электронов пучка вызван упругими соударениями их с атомами остаточного газа. Вероятность рассеяния электрона под углом  $\theta$  в элемент  $d\Omega$  телесного угла при прохождении среды протяженностью  $dz$  определяется по формуле Мотта [8]. Интегрирование ее приводит к выражению, связывающему давление среды остаточного газа и рассеяние пучка при движении электронов, близком к прямолинейному

$$\rho \leq 7,5 Z^{3/4} \frac{\frac{N_0 - N(L)}{N_0} \frac{1}{L}}{1 + \frac{(m_0 c^2)^2}{LeE(m_0 c^2 + eU_{ин}) + eU_{ин}(eU_{ин} + 2m_0 c^2)}}, \quad (19)$$

где  $Z$  - атомный номер рассеивающих частиц;

$\frac{N_0 - N(L)}{N_0}$  - рассеяние пучка;

$L$  - длина ускорителя;

$\rho$  - давление среды остаточного газа, торр.

При  $E = 0$  выражение (19) упрощается

$$\rho \leq 7,5 Z^{3/4} \frac{N_0 - N(L)}{N_0} \frac{1}{L} (1 - \tau^2), \quad (19^x)$$

где  $\tau$  - отношение энергии покоя электрона к его полной энергии.

Если, например, энергия инжекции пучка равняется 50 кэВ, а длина ускорителя 20 м, то рассеяние, не превышающее 0,1%, будет иметь место при  $\rho < 5 \cdot 10^{-4}$  торр.

При наличии продольного магнитного поля электроны помимо поступательного движения будут вращаться вокруг оси пучка с угловой скоростью  $\dot{\varphi}$  и траектория движения электронов будет иметь вид спирали. Это приводит к тому, что длина пути электронов становится больше длины ускорителя, что должно сказываться на рассеянии пучка. Однако из решения для этого случая следует, что при условиях, имеющих место обычно в реальных ускорителях, рассеяние пучка примерно только вдвое превышает величину, определяемую из (19<sup>X</sup>).

Оказывается, что определяющим фактором при определении допустимого давления среды остаточного газа являются электрон-ионные колебания в пучке [9, 10]. Инкремент нарастания колебаний  $\gamma = \omega_0$

$$\text{где } \omega_0 = \omega_p \left( \frac{m_0}{m_i} \frac{n_i}{n_e} \right)^{1/3} \quad (20)$$

Здесь  $\omega_p$  — ленгмювская частота;  
 $m_i$  — масса иона;  
 $n_i$  — плотность ионов;  
 $n_e$  — плотность электронов.

Плотность ионов увеличивается во времени, но можно показать, что  $\gamma \sim t^{1/3}$  и, следовательно, для анализа допустимого давления можно принять инкремент, соответствующий плотности ионов в конце импульса.

В этом случае

$$\gamma = 3 \cdot 10^8 \frac{j^{1/2} (\rho t_H)^{1/3}}{\sqrt{1 - \tau^2}} \quad (21)$$

Поскольку поля, обусловленные колебаниями, достигают ве-

личины, соизмеримой с внешними в течение сотен периодов колебаний, то можно полагать, что неустойчивости в пучке ещё не успеют развиться, если время импульса пучка не превышает десятков периодов. Тогда

$$\rho \leq 10^{-19} \frac{(1 - \tau^2)^{3/2}}{j^{3/2} t_H^2} \quad (22)$$

Для параметров пучка в установке ЛИУ-3000 требуемое давление лежит в диапазоне ( $10^{-5} + 10^{-6}$ ) торр. Увеличение плотности пучка в пять раз потребует улучшения разрежения на порядок. В случае формирования потока Бриллюэна при выборе допустимого давления помимо учета колебаний необходимо принимать во внимание тот факт, что частичная компенсация пучка может привести к нарушению соотношения между током пучка и выбранным магнитным полем и радиусом пучка, т.е. к отклонению начальных условий от равновесных. Если скорость накопления ионов достаточно мала и их плотность значительно меньше плотности электронов пучка в течение всего времени импульса, то будет наблюдаться небольшое уменьшение равновесного радиуса и, следовательно, пульсации из-за изменения равновесных условий входа пучка в магнитное поле. Если время пролета электроном ускорителя значительно меньше времени импульса, то очевидно, что изменением радиуса вдоль длины ускорителя из-за уменьшения тока пучка можно пренебречь. Если же время пролета соизмеримо с длительностью импульса, то будет наблюдаться плавное уменьшение радиуса пучка вдоль длины ускорителя.

Анализ допустимой величины давления, исходя из допустимых отклонений начальных условий от равновесных, показывает, что

величина разрежения должна лежать в диапазоне  $10^{-5}$  торр.

#### IV.

Существенное сокращение радиальных размеров ускоряющей системы возможно достигнуть, если устранить вакуумную трубку, а секцию выполнить вакуумно-плотной. Это удалось сделать при разработке ЛИУ-3000, однако в связи с этим появились разветвленные поверхности из эпоксидного компаунда, и потребовалось экспериментальное изучение такой системы как с целью отработки технологии изготовления индукторов, так и с целью определения исходных данных для расчёта вакуумной системы и выяснения её эксплуатационных характеристик. Изучались следующие вопросы:

- 1) надежность одновременного уплотнения многих стыков по поверхности эпоксидного компаунда, обработанной в условиях массового изготовления индукторов;
- 2) величина десорбции с поверхности индуктора, обусловленная как самими материалами, из которых выполнен индуктор, так и технологическим процессом обработки поверхностей индуктора, при котором они могли подвергаться воздействию масла, эмульсии, влаги и т.д.;
- 3) эксплуатационные характеристики ускоряющей секции;
- 4) влияние ускоряющей системы на эмиссионную способность электронной пушки;
- 5) поведение системы при прохождении через нее сильнооточного пучка электронов (разложение компаунда под действием излучения и рассеянного пучка и изменение в связи с этим разрежения и состава остаточных газов).

Такие вопросы, как надежность уплотнений, величина натекания и состав остаточных газов, предельное давление, время откачки, изучались на специальных стендах в процессе отработки конструкции и технологии изготовления индукторов.

Влияние ускоряющей системы на эмиссионную способность пушки, поведение системы при прохождении через нее пучка электронов изучались в процессе наладки и запуска первых секций ускорителя.

Изучение десорбции с опытного индуктора и образцов осуществлялось путем измерения статического натекания и масс-спектрометрического газоанализа в динамическом режиме с помощью прибора МСХ-3 ("Хронотрон") на специальном стенде.

При экспериментах на ускорителе в качестве масс-спектрометрического анализатора использовался прибор ИПДО-1 с омегатронным датчиком РМО-4С. Этот прибор в отличие от "Хронотрона" обладает большей стабильностью чувствительности и, кроме того, позволяет вести запись спектра остаточных газов с помощью самописца. Измерения на установке проводились при включенном и выключенном накале электронной пушки, при наличии и отсутствии ускоряющего поля в системе, при прохождении через систему ускоренного и неускоренного пучка электронов.

Масс-спектры прогретого и непрогретого образцов, выполненных из эпоксидного компаунда, приведены в табл. I и 2 соответственно.

Таблица 1

Компонента газовой смеси	Масса а.е.м.	Парциальное давление $P_i \times 10^7$ , торр	Относительное содержание, %
$N_2 + CO$	28	18,4	92
$O_2$	32	0,5	2,7
$CO_2$	44	1,1	5,3
Суммарное давление $P = 2 \cdot 10^{-6}$ торр.			

Таблица 2

Компонента газовой смеси	Масса а.е.м.	Парциальное давление $P_i \times 10^7$ , торр	Относительное содержание, %
$OH$	17	4,3	19,0
$H_2O$	18	15,3	68,0
$N_2 + CO$	28	2,9	12,2
$CO_2$	44	0,2	0,8
Суммарное давление $P = 2,2 \cdot 10^{-6}$ торр			

Данные показывают, что с поверхности непрогретого эпоксидного компаунда десорбируются те же компоненты, которые присутствуют в атмосфере. В масс-спектре прогретого образца отсутствуют, как и следовало ожидать, пары воды, тогда как содержание компоненты с массовым числом 28 велико. Это объясняется, по-видимому, развивающимся при прогреве разложением компаунда с выделением окиси углерода  $CO$ . Испытание опытных

индукторов показало, что в секции может быть получено разрежение  $\leq 5 \cdot 10^{-6}$  торр, однако газовыделение, приведенное к поверхности эпоксидного компаунда, оказалось выше, чем газовыделения с контрольного образца. Учитывая то, что в процессе изготовления индуктора компаунд не должен был претерпевать структурных превращений, резко меняющих характер и интенсивность десорбции, следует предположить, что наблюдаемое увеличение газовыделения объясняется технологическими причинами, проявившимися в наличии в вакуумной полости щелей малой проводимости, и нарушениями вакуумной гигиены в производственных условиях.

Близость удельных величин газовыделения с поверхностями прогретых и непрогретых образцов и индуктора при одинаковых условиях их последующей тренировки показывает малую эффективность прогрева для обезгаживания компаунда. Более того, попытка температурного обезгаживания компаунда может привести к ухудшению вакуумных характеристик материала. Иными словами, прогрев, вызывая преимущественно термическое разложение полимера, лишь в незначительной степени ускоряет процесс удаления сорбированных материалом паров и газов.

Необходимо отметить также, что десорбция при прогреве полимера обладает значительной инерционностью.

Анализ массового состава спектра непосредственно после прогрева показывает рост относительного содержания компоненты с массовым числом 28. Это явление может быть объяснено диссоциацией молекул малеинового ангидрида, входящего в состав полимера, при его прогреве с выделением свободной окиси углерода, накоплением последней в объеме компаунда и

последующим медленным выделением ее сквозь толщу материала в вакуумный объем. При таком механизме явления следует ожидать, что время восстановления исходного, т.е. существовавшего до начала прогрева газовыделения компаунда в процессе окончания прогрева будет пропорционально температуре и длительности разогрева и толщине полимерной компоненты индуктора.

На основе испытания опытных индукторов конструкция их была усовершенствована и после тридцатичасовой вакуумной тренировки натекание с одного индуктора составляло  $\sim 0,8$  лторрбек, что соответствовало значению газовыделения, полученного для контрольных образцов.

Анализ результатов, полученных при наладке и запуске первых секций ускорителя, показывает, что в системе достигается требуемое разрежение  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  торр, обеспечивается надежное уплотнение по поверхности эпоксидного компаунда, разрежение не меняется при прохождении через систему неускоренного или ускоренного пучка, эмиссионная способность пушки не меняется при сообщении объема ускоряющей системы с объемом электронной пушки.

При проведении исследований на ускорителе было отмечено изменение зазора между индукторами, что приводило к возможности возникновения пробоя между соседними индукторами. Увеличение зазора на 3 мм привело к полному прекращению пробоя.

У.

При разработке конструкции и технологии изготовления ускоряющей системы необходимо учитывать помимо перечисленных следующие требования:

- 1) обеспечение высоковольтной изоляции между сердечником и обмоткой индуктора и между соседними индукторами при возможно меньшем осевом размере системы с целью получения возможно большей величины ускоряющего поля;
- 2) обеспечение возможно меньших радиальных размеров;
- 3) возможность создания продольного магнитного поля;
- 4) обеспечение требуемых допусков на ускоряющее и магнитное поля;
- 5) технология изготовления сердечников должна обеспечивать минимальные потери в них электромагнитной энергии и возможность изготовления их в сотнях экземпляров;
- 6) при большом количестве индукторов естественно стремиться к тому, чтобы все они имели идентичные размеры и конструкции и состояли из элементов, доступных для изготовления штамповкой, литьем и т.д.

Указанные требования удалось удовлетворить при следующей конструкции индуктора.

Сердечник выполняется из ленты сплава 50НП толщиной 0,02 мм. Он наматывается на специальном станке, причем одновременно с намоткой методом катафореза наносится изоляция из окиси магния. После намотки сердечник отжигается по специальной программе в вакуумной печи при максимальной температуре  $1150^{\circ}\text{C}$ . После отжига сердечник помещается в изоляционные шайбы, выполненные из стеклослюда на эпоксидной смоле.

связующем. Плотность между сердечником и шайбами заполняется синтетическим каучуком, а стыки между шайбами заделываются эпоксидным компаундом холодного отверждения. Таким образом, образуется замкнутый в механическом и электрическом отношении каркас с помещенным в нем сердечником.

С целью обеспечения возможности испытания электрической прочности изоляции от сердечника имеется вывод, проходящий через каркас. При такой конструкции достигается необходимая изоляция сердечника от первичной обмотки индуктора, сохраняются магнитные характеристики в процессе изготовления, транспортировки и эксплуатации индуктора. Первичная "обмотка" индуктора выполняется в виде тора прямоугольного сечения (по форме сердечника). Такая форма обмотки дает возможность получить осевую симметрию ускоряющего поля и минимальные поля рассеяния, осуществить отвод выделяющейся в сердечнике энергии и позволяет выполнить индуктор в виде вакуумно-плотного элемента. Тор состоит из двух половин, сваренных по внутреннему периметру вакуумно-плотным швом. По наружному периметру припаиваются змеевики, через которые пропускается вода для охлаждения индуктора. Изолированный сердечник и тор скрепляются по наружному периметру специально подобранным эпоксидным компаундом с помощью специальной формы. Боковая поверхность эпоксидного каркаса обрабатывается на станке, что позволяет обеспечить уплотнение между индукторами с помощью резиновых прокладок и дает возможность расположить индукторы соосно при их сборке в секцию. Секция состоит из 12 индукторов, которые скрепляются с помощью шпилек и фланцев таким образом, что секция оказывается окру-

женной с внешней стороны кожухом типа "белые колесо".

С помощью резиновых прокладок между индукторами осуществляется герметизация секции, что дает возможность получать разрежение в секции без специальной вакуумной трубки. В случае необходимости внутрь системы может быть встроена и трубка.

С внутренней стороны индукторов имеется возможность закрепить катушки, создающие магнитное поле для поддержания размеров пучка. Выводы от катушек проходят между индукторами и через уплотнения в эпоксидном каркасе выводятся из вакуумного объема.

В диссертации обосновывается выбранная конструкция и технология изготовления, а также даются рекомендации по выбору вакуумной системы.

#### VI.

В заключительной части диссертации приводятся результаты испытания первой секции линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000. Полученные результаты свидетельствуют о том, что принципы, положенные в основу расчета и конструирования ускорителя ЛИУ-3000, правильны и могут являться исходными при создании линейных индукционных ускорителей.

В этой же части проводится сравнение основных параметров установок ЛИУ-3000 и "Астрон", из которого следует, что в установке "Астрон" имеет место более высокий градиент ускоряющего поля, полученный за счет снижения экономической эффективности ускорителя, менее удачно решена система формирования пучка.

## В Ы В О Д Ы

1. В "магнитном соленоиде" А.Боуверса конечной длины значительная часть энергии рассеивается во внешнем пространстве

2. Сердечники индукторов целесообразно с внешней стороны окружить проводящими кожухами. При этом основная часть энергии сосредоточивается внутри ускоряющей системы. Ускоряющее поле помимо постоянной составляющей имеет переменную. Амплитуда гармоник может быть сведена до пренебрежимой величины в области, занятой пучком, при соответствующем выборе размеров индукторов.

3. Амплитуда гармоник может быть равна нулю, если внутрь системы ввести проводящую трубку, замкнутую на внешнем кожухе. Величина проводимости трубки определяется из тех соображений, чтобы, во-первых, ток проводимости был существенно больше токов смещения; во-вторых, ослаблением поля проводящими стенками трубки можно было пренебречь, в-третьих, размагничивающее поле тока, протекающего по трубке, было допустимым и, в-четвертых, чтобы осуществлялся отвод наводимого заряда за достаточно малое время.

4. Возможно осуществить моделирование ускоряющего поля в электролитической ванне с гиперболическим дном, причем распределением потенциала в ванне моделируется функция потока напряженности ускоряющего поля.

5. Электронно-оптические системы с линзами из-за большой расходимости пучка могут быть использованы при энергии, превышающей несколько Мэв. При меньших энергиях целесообразно использовать продольное магнитное поле, величина которого получается наименьшей для потока Бриллюана. Допустимая неодно-

родность магнитного поля составляет несколько процентов при условии сохранения малых колебаний пучка относительно равновесного радиуса.

6. При распространении пучка в постоянном продольном магнитном поле и параллельном ему ускоряющем поле средний радиус его монотонно убывает  $\sim \frac{1}{\sqrt{P}}$ . При отклонении начальных условий от равновесных пучок испытывает колебания относительно равновесного радиуса с постоянной амплитудой, определяемой начальными условиями, энергией инжекции и величиной тока пучка. Период же пульсаций увеличивается по мере увеличения энергии.

При распространении пучка в магнитном поле  $\sim \frac{1}{\sqrt{P}}$  средний радиус остается постоянным, но амплитуда колебаний увеличивается по мере ускорения. Поскольку энергия, затрагиваемая на создание магнитного поля, составляет незначительную долю от величины энергии, которую приобретает пучок в ускорителе, то более предпочтительным является вариант с постоянным вдоль оси ускорителя магнитным полем.

7. Рассеяние на остаточном газе относительно мало и в области давления, меньшего  $10^{-4}$  торр, не превышает одного процента при длине ускорителя в несколько десятков метров. Определяющим же фактором при выборе давления являются колебания в пучке, обусловленные ионизацией остаточного газа. Палагая, что длительность импульса инжектированных электронов

$10^{-6}$  сек, допустимая область давления оказывается в интервале  $10^{-5} + 10^{-6}$  торр. Причем более низкое давление необходимо в начальной части ускорителя, где энергия ещё недостаточно велика. Это требование сочетается с условием, предъяв-

ляемым к величине давления остаточного газа, при использовании в электронной пушке оксидного катода.

8. Десорбция с поверхности индукторов имеет величину, при которой возможно осуществить откачку и поддерживать давление в области пучка  $\leq 5 \cdot 10^{-6}$  торр с небольшим количеством высоковакуумных агрегатов.

Ускоряющая система достаточно быстро оттренировывается и в ней без труда поддерживается давление  $\leq 5 \cdot 10^{-6}$  торр. В оттренированной системе (без напуска атмосферы) требуемое разрежение достигается примерно через два часа после включения высоковакуумных агрегатов.

9. Спектральный состав остаточных газов при исследовании десорбции с поверхности опытных индукторов и контрольных образцов мало отличается от атмосферного. В спектре же остаточного газа в ускорителе содержатся тяжелые углеводороды, наличие которых по-видимому обусловлено миграцией масла из паромасляных агрегатов вследствие недостаточно хорошей защиты азотными ловушками.

10. Давление в области ускоряющей системы не изменяется при прохождении через систему ускоренного или неускоренного сильноточного пучка электронов.

11. Конструкция ускоряющей секции без трубки позволяет в значительной степени удовлетворить требованиям, предъявленным к ускорителю. Фиксация и положение индукторов с помощью паза и буртика обеспечивают незначительные отклонения осей индукторов от оси ускорителя при допусках на обработку, вполне выполнимых при массовом производстве.

12. Разработанная применительно к большим радиальным размерам технология изготовления сердечников из ленты толщиной

0,02 мм позволяет получать сердечники с коэффициентом заполнения до 0,75 при хороших магнитных характеристиках.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [7, 11, 12, 13]. Некоторые результаты докладывались также на совещании по новым методам ускорения в ИЯФ СО АН СССР в 1964 г.



## Л И Т Е Р А Т У Р А

- I. N.Christofilos, Nuclear fusion, Supplement, part 1, p.159, 1962.
2. N. Christofilos at al.  
В кн:"Труды Международной конференции по ускорителям".  
(г.Дубна, 1963) стр.1073, 1964, Москва.
3. W.A.S. Lamb, I.R.E. Rtanv. Nucl. Sci., 9, 53, 1962.
4. В.И.Векслер. "Атомная энергия", 2, 427, 1957.
5. A.Bowersy, Elektrische Höchstspannungen, 1939, Berlin.
6. В.Смайт. Электростатика и электродинамика, Изд-во иностранной литературы, 1954, Москва.
7. А.В.Анацкий, О.С.Богданов, П.В.Букаев, Д.П.Вахрушин и др. "Атомная энергия", 21, 439, 1966.
8. В.Розву, R.Greisen. Rev.Mod.Phys., 13, 240, 1941.
9. Я.Б.Файнберг, В кн."Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза", "Наукова думка", 2, 115, 1963, Киев.
10. О.Випеман, Phys. Rev. 115, 503, 1959.
11. Ю.П.Вахрушин, В.П.Саранцев, О.В.Семенов. Препринт ОИЯИ, 9-3287-2, 1967.
12. Ю.П.Вахрушин и др. Препринт ОИЯИ, 9-3288-2, 1967.
13. Ю.П.Вахрушин и др. Изобретение, заявка № I.053629/26-25, Решение от 9 сентября 1966 г.