

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



7697

Р9 - 7697

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛ

Л.С.Барабаш, Л.Н.Беляев, И.А.Голутвин,
Г.В.Долбилов, И.Н.Иванов, В.Д.Инкин,
А.Д.Коваленко, В.Г.Новиков, Э.А.Перельштейн,
В.П.Саранцев, В.А.Свиридов, И.М.Хохлов

О КОЛЛЕКТИВНОМ УСКОРИТЕЛЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
ОТДЕЛА НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ ОИЯИ

1974

ОТДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ

P9 - 7697

Л.С.Барабаш, Л.Н.Беляев, И.А.Голутвин,
Г.В.Долбилов, И.Н.Иванов, В.Д.Инкин,
А.Д.Коваленко, В.Г.Новиков, Э.А.Перельштейн,
В.П.Саранцев, В.А.Свиридов, И.М.Хохлов

О КОЛЛЕКТИВНОМ УСКОРИТЕЛЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
ОТДЕЛА НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ ОИЯИ

**Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ**

ВВЕДЕНИЕ

Начало экспериментального осуществления коллективного метода ускорения с использованием электронного кольца в качестве ускоряющего сгустка было положено работами В.И.Векслера и др. в Объединенном институте ядерных исследований. Результаты работы по созданию электронного кольца опубликованы в 1967 году /1/. Экспериментальное подтверждение метод получил после успешного ускорения ионов азота и гелия /2,3/.

После 1967 г. исследования по коллективному методу получили широкое распространение, причем в основном разрабатывается схема ускорителя, предложенная в ОИЯИ, по которой компрессия электронного кольца происходит в импульсном магнитном поле в специальной вакуумной камере, именуемой адгезатором или компрессором.

Перспективность коллективного ускорителя, по крайней мере для ускорения тяжелых ионов, очевидна, и поэтому не удивителен интерес, проявленный к нему со стороны физиков многих стран. В 1972 году в Дубне состоялся симпозиум по коллективным методам ускорения /4/, на котором выступили с обзорными докладами, иллюстрирующими развитие метода, физики ОИЯИ, ИТЭФ /СССР/, Беркли и Мерилленда /США/, Гаршинга и Карлсруэ /ФРГ/, а также представители Франции и Японии. Начались работы по коллективному методу в Канаде и Италии. Все перечисленные институты имеют экспериментальные установки для отработки узлов будущих ускорителей. В 1971 году на Международной конференции по источникам и ускорителям многозарядных ионов в Гатлинбурге /5/ были представлены три проекта коллективных ускорителей тяжелых ионов.

Ниже рассказывается о коллективном ускорителе тяжелых ионов, который создается в ОНМУ ОИЯИ, и перспективах его использования.

Перспективы исследований на пучках ускорителя

Ускоренные ядра уже много лет широко используются для решения разнообразных задач ядерной физики. За это время определились тенденции развития ускорителей тяжелых ионов: в первую очередь, они связываются с увеличением массы ускоряемых ядер и интенсивности пучков. Наметилась тематика физических исследований на них; ее подробное рассмотрение проведено в серии публикаций Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ /⁶⁻⁸/. Нет необходимости повторять содержание этих работ, убедительно продемонстрировавших широкие перспективы исследований на ускорителях тяжелых ионов. Цель вводных параграфов нашей статьи состоит в том, чтобы информировать читателя о некоторых новых возможностях в физических исследованиях с тяжелыми ионами, специфичных для коллективного ускорителя.

Особенности пучков коллективного ускорителя

Коллективный ускоритель тяжелых ионов имеет особенности /по сравнению с используемыми в настоящее время циклотронами или линейными ускорителями/, которые могут открыть путь для постановки совершенно новых экспериментов или для применения новых методов исследования уже известных проблем. Например, такой ускоритель позволяет, в принципе, получать ядра тяжелых элементов, полностью лишенные электронной оболочки. Электроны кольца автоматически производят ионизацию тяжелых атомов, захваченных в кольцо.

Невозможно переоценить экспериментальную возможность проведения исследований с "голыми" ускоренными ядрами тяжелых элементов /⁹/. Наличие пучков тя-

желых элементов со свободными электронными оболочками позволяет подойти вплотную к исследованиям в интереснейшей области квантовой электродинамики, связанной с сильными полями, где "не работает" теория возмущений.

Очевидным достоинством коллективного ускорителя тяжелых ионов является его способность ускорять любые ядра различных элементов вплоть до самых тяжелых. Менее очевидным, но чрезвычайно важным для экспериментов достоинством такого ускорителя является пространственная /и, соответственно, временная/ структура его пучка. Для ускорения заряженных частиц коллективным методом необходимо создание плотной электронной среды, которая удерживает ионы. В качестве такой среды используется кольцо электронов в магнитном поле. Если размер сечения кольца составляет несколько миллиметров, а скорость ускоренных ионов $\beta \approx 0,1$, то время взаимодействия с мишенью оказывается $\approx 10^{-10}$ сек. Столь короткий сброс пучка на мишень позволяет иметь стартовый сигнал для запуска аппаратуры, измеряющей интервал времени между взаимодействием ионов с мишенью и попаданием продуктов взаимодействия на детектирующую аппаратуру с точностью до ≈ 100 нсек. Эта особенность ускорителя, позволяя по времени пролета измерять скорость частиц и обеспечивая отличные условия для их сепарации, существенно расширяет арсенал методических возможностей эксперимента, открывает новые пути в экспериментальной физике тяжелых ионов /в частности, для исследования проблемы существования "острова" сверхтяжелых элементов с $Z \approx 110-126$ - одной из интереснейших задач ядерной физики/.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СИТУАЦИЯ В КОЛЛЕКТИВНОМ МЕТОДЕ УСКОРЕНИЯ

Теоретические оценки допустимых параметров ускорителя тяжелых ионов

Для коллективного ускорителя многозарядных ионов определяющими являются следующие два параметра: 1/набор энергии на нуклон на единице длины

$$U = K \frac{2\nu}{a_r + a_z} \cdot Z^*/A \text{ /МэВ/см/, } /1/$$

где $\nu = 10^{-13} N_e / 2r_0$ - погонный электрон, N_e - число электронов в кольце, r_0 - большой радиус, $a_{r,z}$ - радиальный и аксиальный размеры малого сечения кольца, Z^* - зарядность иона, K - отношение величины ускорения к предельно допустимому; $2/\nu$ - число ускоряемых ионов N_i .

Если ставится задача - получить на длине ускорения ≈ 1 м энергию на нуклон $\approx 7-10$ МэВ при числе ускоренных ионов в импульсе 10^{11} , то, подставляя в формулу /1/ кажущиеся сегодня реальными параметры кольца $a_{r,z} \approx 1-2$ мм, $r_0 \approx 4$ см и выбирая $(Z^*/A) \approx 1/10$ и $K \approx 1/5$ /по оценкам /10/, при $K \leq 1/5$ ускорение идет без потерь ионов/, видим, что необходимое число электронов в кольце должно быть $N_e \approx 5 \cdot 10^{13} - 10^{14}$. В процессе формирования таких интенсивных пучков методом адиабатического сжатия в адгезаторе и ускорением наиболее трудно обеспечить их устойчивость. Самыми опасными представляются азимутальные неустойчивости.

Пороговое число частиц N_e для таких неустойчивостей пропорционально энергетическому разбросу электронов в кольце и обратно пропорционально так называемому импедансу кольца в камере Z_k . Увеличение энергетического разброса нецелесообразно, т.к. оно ведет к росту a_r и, в соответствии с /1/, - к уменьшению U . Поэтому повышение N_e обеспечивается уменьшением импеданса. Так как величина Z_k характеризует отношение азимутальных электрических полей к создающим их токам, то, очевидно, уменьшения Z_k можно добиться, располагая металлические экраны вблизи кольца. На экранах и в непосредственной близости от них электрические поля значительно меньше, чем в пустом пространстве.

Приближение металлических поверхностей к кольцу при его сжатии имеет и отрицательные последствия. Во-первых, металлическая камера адгезатора экранирует внешние магнитные поля, сжимающие кольцо, что ограничивает допустимую частоту внешних полей /для выбранной сейчас камеры допустимая частота $f \leq 1000$ Гц/.

Во-вторых, приближение боковых стенок камеры к кольцу ухудшает условия одночастичной устойчивости из-за полей изображений в стенках, которые необходимо компенсировать соответствующим выбором геометрии внешнего поля.

В конце сжатия кольца и при его ускорении возникает опасность резонансных неустойчивостей на собственных модах камеры /11/ и волноводных резонансов. Для подавления этих неустойчивостей предполагается использовать металлическую трубу, радиус которой меньше $r_0^{1/2}$, и уменьшать добротность на резонансных модах до значенной $Q \approx 40$.

Из электронно-ионных неустойчивостей наиболее опасная - шланговая. Предельное число ускоренных тяжелых ионов, определяемое теоретическим условием устойчивости по отношению к изгибаниям типа "змейка", при типичных параметрах электронных колец составляет $\approx 10^{11}$.

Более сильное ограничение числа ионов связано с магнитным способом ускорения колец. Для того чтобы размеры кольца не изменялись значительно, требуется $(N_i/N_e) \leq 10^{-3}$.

Результаты экспериментов по коллективному методу ускорения

В настоящее время опубликованы результаты нескольких экспериментов /3, 4, 13-15/ по коллективному методу, устанавливающие реальность создания ускорителей на его основе.

При ускорении α -частиц в модели коллективного ускорителя ОИЯИ параметры кольца были следующими: $N_e \approx 5-8 \cdot 10^{12}$, $r_0 \approx 6$ см, $a \approx 0,1$ см. Это означает, что на однозарядный ион действует сила до 37 МэВ/м ($K=1$). На длине ускорения $0,4$ м α -частицы приобретали энергию 30 МэВ. В одном цикле ускорения поток α -частиц достигал $\approx 10^9$.

Эффективность коллективного ускорения определяется возможностями электронного кольца в соответствии с /1/. В современных установках кольца, дающие 40 МэВ/м,

для равномерного распределения плотности по сечению и 20 МэВ/м - для гауссовского, получают и воспроизводятся достаточно уверенно. Так, в США /Беркли/ в 1969 году были получены кольца с $N_e = 4 \cdot 10^{12}$, $a \approx 2 \text{ мм}$, $r_0 \approx 3,5 \text{ см}$ /13/, как следует из последнего сообщения /14/, все эксперименты идут с числом частиц $\approx 7 \cdot 10^{12}$. Группа в Беркли, исследуя взаимодействие кольца с газом ксенона, показала отсутствие электрон-ионных неустойчивостей вплоть до полной нейтрализации заряда кольца.

Поскольку для ускорения тяжелых ионов не требуется релятивистской скорости поступательного движения кольца, специалисты в области коллективного ускорителя считают приемлемыми кольца с ускоряющей силой 60 МэВ/м ($Z=1$) для сооружения такого ускорителя. Для этого требуется кольцо с числом частиц $7-8 \cdot 10^{12}$. Подчеркнем, что экспериментальный материал, собранный в настоящее время, дает основание говорить о получении колец с числом частиц $N_e \approx 2-3 \cdot 10^{13}$.

Проекты коллективных ускорителей тяжелых ионов

В настоящее время работа над проектами ускорителей тяжелых ионов ведется в ряде лабораторий. Один из первых проектов предложен в Беркли /16/. Ориентируясь на кольцо $U/K = F = 150 \text{ МэВ/м}$ и ускорение ^{238}U с $Z^* = 23$, авторы этого проекта считают, что ускоряющий соленоид длиной $1,7 \text{ м}$ обеспечит им прирост энергии 10 МэВ/нуклон . В дальнейшем предполагается увеличение соленоида до 120 м с целью получения конечной энергии 300 МэВ/нуклон . Непропорциональное увеличение энергии связано с увеличением большого радиуса кольца при ускорении в спадающем магнитном поле, из-за чего эффективная кулоновская сила уменьшается. Планируется иметь в таком кольце 10^9 ионов урана и частоту повторения циклов $\approx 100 \text{ Гц}$. Уменьшение эффективной ускоряющей силы электронного кольца компенсируется в таком ускорителе увеличением длины ускоряющего соленоида.

Установки в Беркли и Карлсруэ /17/ имеют схему, идентичную со схемой ускорителя ОИЯИ. Модификации

такой классической схемы осуществляются в лабораториях Мерилленда /США/ /18/ и Гаршинга /ФРГ/ /19/. Обе эти модификации интересны с точки зрения сооружения будущих коллективных ускорителей тяжелых ионов.

В Гаршинге пучок инжектируется в магнитное поле, создаваемое одним токовым витком и экраном специального профиля. При нарастании тока в витке кольцо сжимается и одновременно выводится. Хотя ускоряющие возможности такого кольца относительно невелики - экспериментаторы получили кольцо с $N_e = 5 \cdot 10^{12}$, $a \approx 0,35 \text{ см}$ и $r_0 \approx 2,3 \text{ см}$ - такая схема компрессии проста и экономична.

В Мерилленде идет запуск так называемого статического адгезатора. Электронный пучок инжектируется в постоянное магнитное поле под углом к силовым линиям и образует длинный цилиндрический слой. Специальное магнитное обрезающее устройство делает из этого слоя набор колец, которые попадают в нарастающее в пространстве магнитное поле и сжимаются. В момент сжатия кольцо нагружается ионами и ускоряется. Авторы ожидают получения колец с ускоряющей силой 115 МэВ/м /5/. В феврале 1973 года группа Мерилленда /18/ приступила к экспериментам с пучком. Такая схема компрессии обладает, по-видимому, большими возможностями в плане повторения циклов ускорения.

В стадии технической подготовки экспериментов находятся в данный момент группы экспериментаторов Франции, Японии, Италии и Канады.

УСКОРИТЕЛЬ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ОНМУ ОИЯИ

Параметры ускорителя тяжелых ионов

Магнитная система адгезатора ускорителя позволяет формировать кольца с числом электронов $N_e = 10^{13} - 5 \cdot 10^{13}$ и плотностью электронов $n_e \approx 0,5 - 2,5 \cdot 10^{13} \text{ 1/см}^3$. Этими цифрами во многом определяются другие ожидаемые параметры ускорителя, значения которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Некоторые параметры коллективного ускорителя тяжелых ионов

1. Ускоряемые ядра - от X_e до U
2. Энергия ионов - $E \leq 10 \text{ МэВ/ати}$
3. Количество ионов в импульсе - $N_i \approx 10^{-3} N_e \approx 5 \cdot 10^{10}$
4. Частота посылок - 1 - 5 Гц
5. Поток тяжелых ионов - $N_i \approx$ до $2 \cdot 10^{11} \text{ I/сек.}$
6. Энергетический спектр - $(\Delta E/E) \approx 5 \cdot 10^{-2}$
7. Эмиттанс - $\pi a \theta \approx 30 \text{ мрад. см}$
8. Время взаимодействия с мишенью $\Delta t \approx 10^{-10} \text{ сек.}$

Ускоритель тяжелых ионов, основанный на коллективном методе, состоит, по сути дела, из двух крупных установок. Сильноточный линейный индукционный ускоритель электронов является инжектором коллективного ускорителя. Адиабатический генератор заряженных токов - АДГЕЗАТОР /как назвал его В.И.Векслер/ предназначен для формирования электронных колец, загрузки их ионами и предварительного ускорения кольца. Ускорение кольца до конечной энергии производится соленоидом в спадающем по длине магнитном поле. Ниже основные узлы ускорителя описаны подробнее.

Инжектор - сильноточный импульсный линейный ускоритель электронов

Электронный импульсный ускоритель, используемый в качестве инжектора, сконструирован, исходя из требования обеспечить следующие параметры ускоренного пучка:

- Энергия частиц в пучке - $E = 3,0 \text{ МэВ}$
 Максимальный ток в импульсе - $I \approx 1000 \text{ А}$
 Длительность импульса - $\tau = 10-15 \text{ нсек}$
 Частота повторения импульсов - $f = 10 \text{ Гц}$

Энергетический разброс электронов при $E = 3 \text{ МэВ}$
 $(\Delta E/E) = 3\%$.

Эмиттанс при $E = 3,0 \text{ МэВ}$. $\epsilon = \pi a \theta \leq 0,1 \text{ см. рад.}$

В основе конструкции лежит принцип индукционного ускорения Боуверса /20/.

Ускоряющее поле создается системой из ряда последовательно соединенных импульсных трансформаторов-индукторов, выполненных на тороидальных ферритовых сердечниках с одновитковой первичной обмоткой, возбуждаемой прямоугольными импульсами наносекундной длительности. Генератор импульсов состоит из сосредоточенных емкостей, водородного тиратрона и корректирующей нелинейной линии, включенной последовательно в разрядный контур. В качестве источника электронов используется холодный катод. Фокусировка пучка обеспечивается соленоидальным импульсным магнитным полем.

Общее описание ускорителя

Инжектор состоит из 5 ускоряющих секций по 18 индукторов в каждой. Одна из этих секций конструктивно объединена с источником электронов. Внутри секций имеются диафрагмированные ускорительные трубки с апертурой 40 мм, которые стыкуются /рис. 1/ посредством переходных камер, связанных с вакуумными насосами. В камерах установлены последовательно соединенные соленоидальные катушки для создания фокусирующего магнитного поля, пояс Роговского, измеряющий ток пучка, вентиль-натекатель, позволяющий дистанционно изменять давление внутри ускорительного тракта, и манометрическая лампа. Каждые три индуктора питаются от одного импульсного генератора, собранного на тиратроне типа ТГИ1-2500/50, в качестве накопителя энергии используется блок высоковольтных конденсаторов общей емкостью 37.000 нФ, которые разряжаются на три нелинейные линии, включенные параллельно. Выход каждой линии посредством трех параллельно соединенных кабелей с общим волновым сопротивлением 17 Ом и длиной 1,5 м соединен с индуктором.

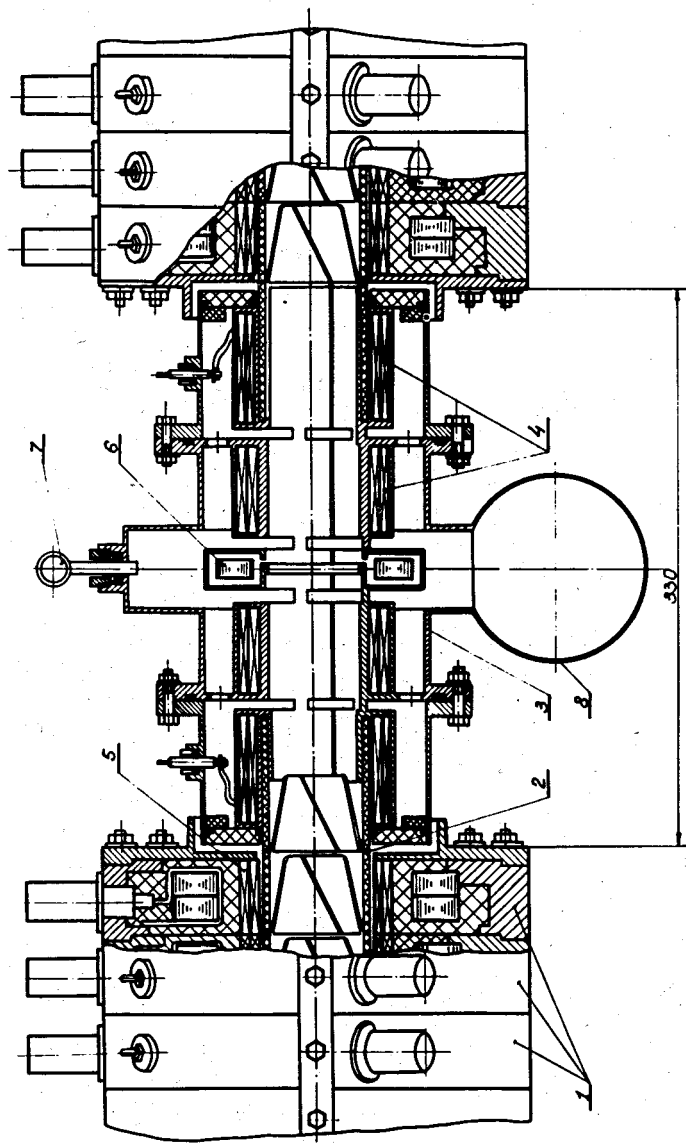


Рис. 1. Ускоритель электронов. Межсекционный переход: 1 - ускорители электронов - индукторы; 2 - ускорительные трубки; 3 - переходная камера; 4,5 - катушки магнитного поля; 6 - пояс Роговского; 7 - вентиль нагнетания; 8 - патрубков вакуумного агрегата.

На внутренней образующей индуктора размещены катушки магнитного поля, конструктивно объединенные с ним. Фокусирующие катушки индукторов соединены в секции последовательно и образуют соленоид с плотностью намотки 1,6 витка/см. Питание соленоидов и катушек в переходных камерах - посекционное.

Ускоряющий элемент - индуктор

Ускоряющее частицы вихревое электрическое поле создается переменным магнитным потоком, возбуждаемым в ферромагнитном сердечнике индуктора под действием импульса тока, протекающего в первичной витке, охватывающем сердечник /рис. 2/. Требование моноэнергетичности ускоренного пучка определяет допустимую неравномерность плоской части импульса ускоряющего поля: $(\Delta U_1 / U_1) < 3\%$. Для получения плоской вершины

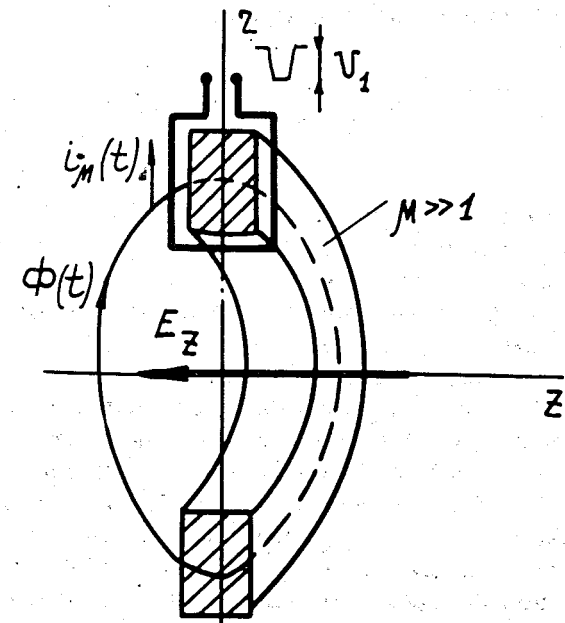


Рис. 2. Схематическое изображение индукторов.

импульса следует обеспечить линейный рост магнитного потока $\Phi(t)$ в сердечнике индуктора. По отношению к генератору индуктор представляет собой нелинейную индуктивность L_μ , шунтированную активным сопротивлением R_b , учитывающим потери энергии на перемагничивание.

Для правильного выбора параметров индуктора необходимо знать величину максимально возможного изменения индукции в динамическом режиме ΔB и зависимость импульсной магнитной проницаемости от частоты $\mu(f)$. Для сердечников из феррита марки 200 НН2 при $\omega \approx 2,5 \cdot 10^{+8} \text{ сек}^{-1}$ ΔB составляет 5000 Гс. Отсюда можно заключить, что для неискаженной трансформации импульса длительностью $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$ и амплитудой 35 кВ, необходимо брать сечение сердечника $S \geq 10 \text{ см}^2$.

На рис. 3 изображена вычисленная из измерений зависимость индуктивности первичных витков индуктора от времени $L_\mu = L_{\partial\mu}(t)$, зная которую, можно определить намагничивающий ток индуктора:

$$i_\mu(t) = U_1 \tau / L_\mu. \quad /2/$$

В нашем случае индуктор /рис. 4/ выполнен на двух ферритовых кольцах типа 200 НН2 размерами 180 x 110 x 20 мм. Первичная обмотка состоит из трех симметрично расположенных по азимуту полосовых витков сечением 80 мм² каждый. Для размагничивания ферритовых колец имеется отдельный виток, запитываемый от системы размагничивания импульсным током 100 А длительностью 250 мксек. Ферритовые кольца вместе с витками помещены в металлический каркас и залиты эпоксидным компаундом. На внешней поверхности каркаса имеется три высоковольтных согласованных разъема для питания первичных витков, и изолированный вывод витка размагничивания, являющийся одновременно точкой для измерения параметров импульса напряжения индуктора.

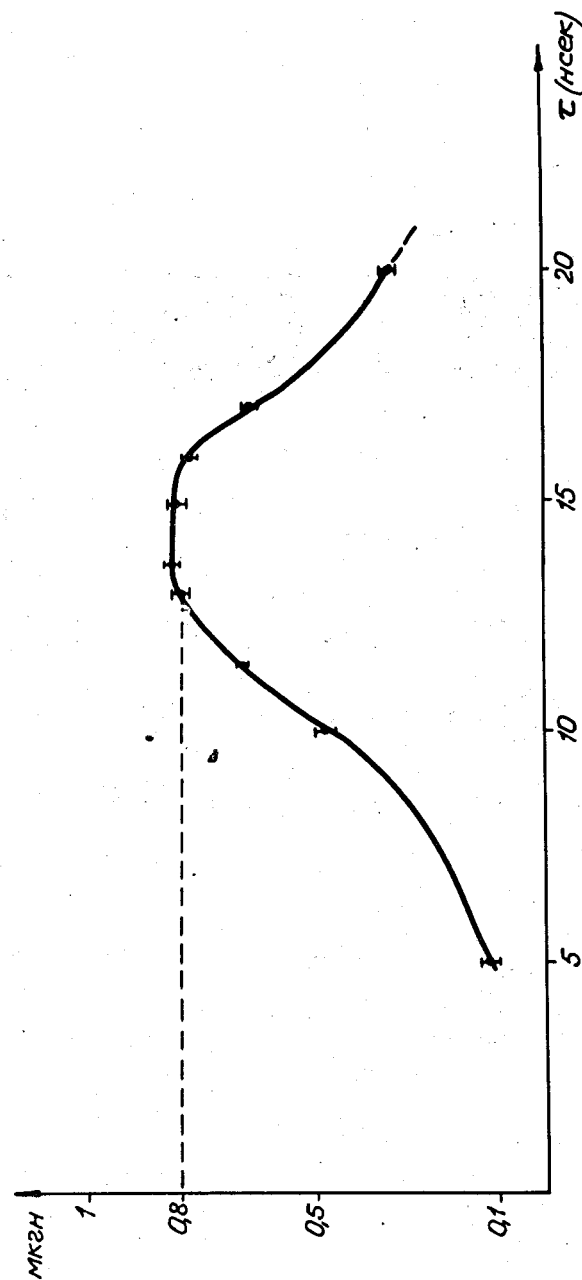


Рис. 3. Изменение индуктивности первичных витков индуктора в течение импульса.

Генератор импульсов высокого напряжения

Основные требования к параметрам импульсов, формируемых генератором, следующие: амплитуда импульса $U \approx 35 \text{ кВ}$, длительность - $\tau \approx 10\text{-}15 \text{ нсек}$, крутизна нарастания тока в нагрузке $\beta \geq 10^{12} \text{ А/сек}$, сопротивление нагрузки 6 Ом , частота повторения импульсов - 10 Гц . В качестве коммутатора используется водородный тиратрон типа ТГИ 1-2500/50, который устойчиво работает в режиме коммутации импульсов тока с амплитудой до 10 кА и длительностью $5 \cdot 10^{-7} \text{ сек}$, однако крутизна нарастания тока $\beta = di/dt \approx 5 \cdot 10^{10} \text{ А/сек}$, т.е. примерно в 20 раз ниже требуемой. Для получения заданной крутизны нарастания тока использован эффект укорочения фронта импульса, имеющий место при распространении его в нелинейной линии [22]. В нашем случае нелинейная линия, обеспечивающая заданную крутизну тока, представляет собой отрезок коаксиала длиной 75 см , на центральный проводник которого надеты ферритовые кольца марки 600 НН, размерами $40 \times 25 \times 8 \text{ мм}$; внутренняя полость линии заполнена глицерином. Нагрузочная характеристика нелинейной линии показана на рис. 5.

Схема генератора с эквивалентной нагрузкой показана на рис. 6. На рис. 7 приведены типичные осциллограммы в различных точках схемы генератора. Оценим влияние колебаний тока на приобретаемую электронами энергию. Учитывая зависимость [2] по нагрузочной характеристике линии [рис. 4], найдем, что за счет нелинейных свойств линии энергетический разброс оказывается в два раза меньше колебаний тока.

Формирование длительности импульса происходит автоматически за счет нелинейных свойств индуктора, так что при заданном в нем поперечном сечении ферритовых колец выполняется условие: $U_H \cdot \tau = \text{const}$. Для коррекции плоской вершины импульса введена цепь подмагничивания нелинейных линий, регулируя величину тока в которой, можно производить надлежащий выбор рабочей точки на петле гистерезиса.

Запуск тиратронов производится от ламповых генераторов, имеющих на входе кабельные линии задержки

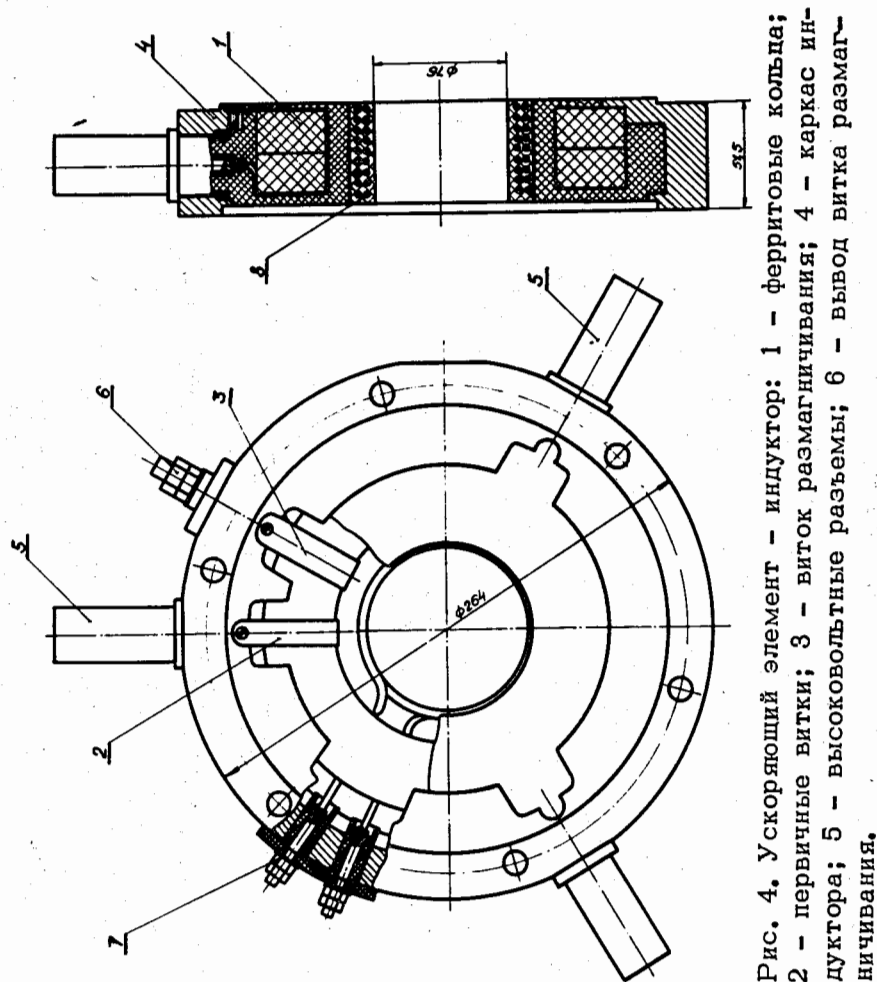


Рис. 4. Ускоряющий элемент - индуктор: 1 - ферритовые кольца; 2 - первичные витки; 3 - виток размагничивания; 4 - каркас индуктора; 5 - высоковольтные разъемы; 6 - вывод витка размагничивания.

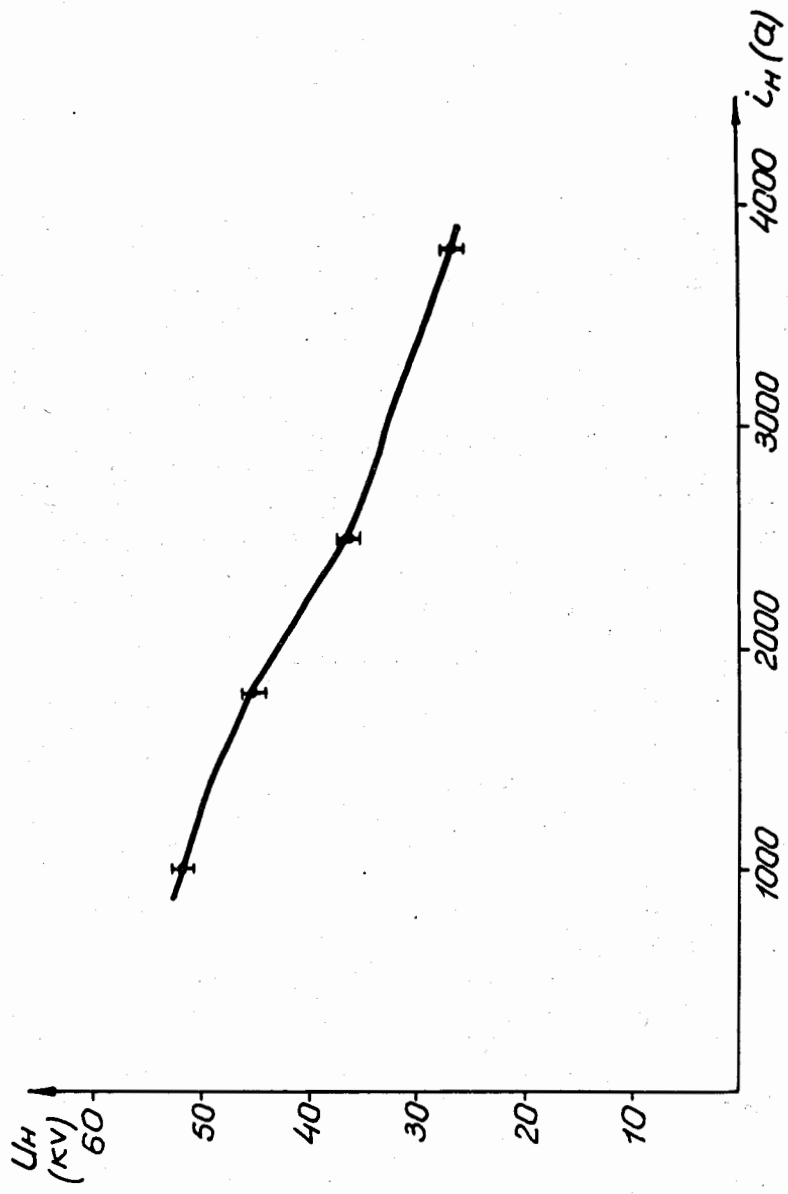


Рис. 5. Нагрузочная характеристика нелинейной линии.

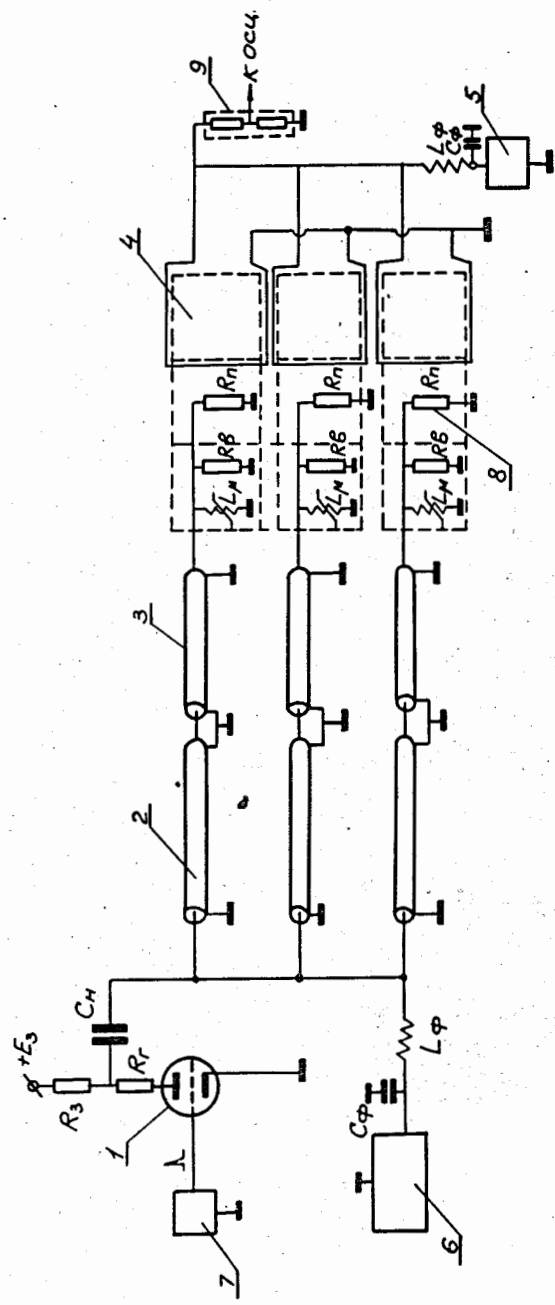


Рис. 6. Принципиальная схема генератора импульсов.

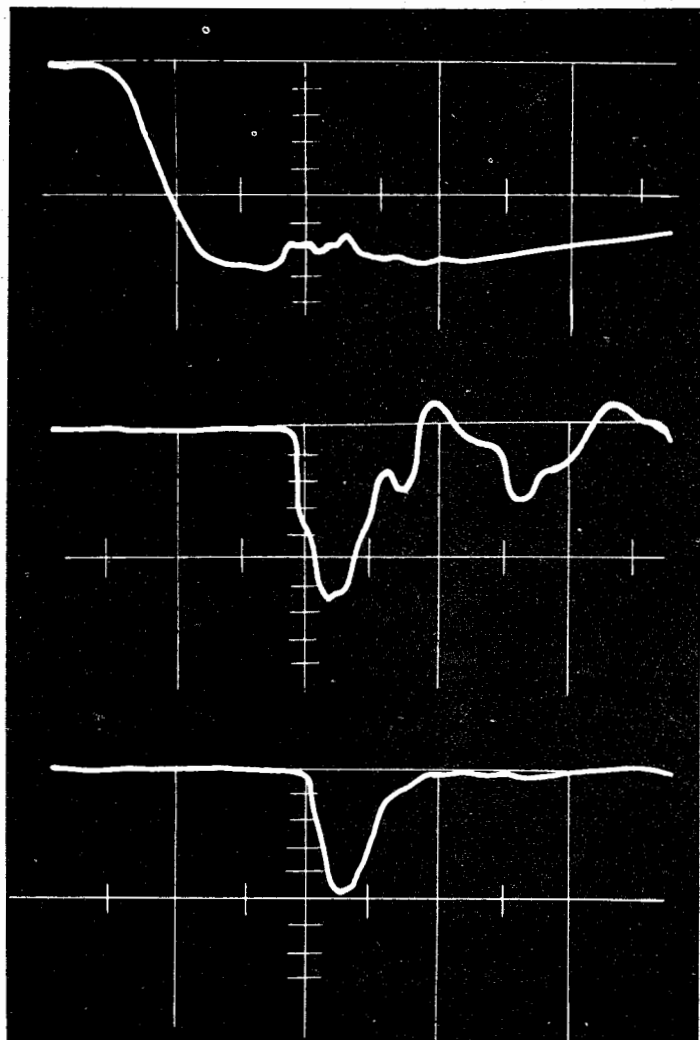


Рис. 7. Типичные осциллограммы напряжения: а) на входе нелинейной линии τ разв. = 50 нсек/см; б) на выходе нелинейной линии; в) на индукторе без нагрузки.

длительностью до 130 нсек с дискретностью регулировки 1 нсек /джиттер меньше 0,5 нсек/. Запуск ламповых генераторов производится от устройства синхронизации.

Амплитудная стабильность импульсов /без пучка/ зависит, главным образом, от стабилизации зарядного напряжения накопительной емкости и при отсутствии дополнительных систем стабилизации определяется стабильностью питающей цепи.

Источник электронов

Формирование пучка происходит в керамической трубе ϕ 50 мм, длиной 1,5 м, помещенной внутри 5 ускоряющей секции. Анод из нержавеющей стали - сетка с радиальным разрезом для устранения искажений фокусирующего магнитного поля на входе в первую переходную камеру.

Источник может работать в двух режимах. В первом /23, 24/ катод, представляющий собой вольфрамовую иглу ϕ 0,5 мм, устанавливается на входе секции, так что расстояние между анодом и катодом $L \approx 1,2$ м, а давление в области катода $p_k \approx 10^{-2}$ тор. На катод подаются импульсы напряжения длительностью $0,5 \cdot 10^{-6}$ сек и амплитудой 60-80 кВ. Импульс полного тока запаздывает относительно напряжения на время, равное времени нейтрализации

$$\tau_H = (n_0 \sigma_i v)^{-1},$$

где n_0 - концентрация нейтральных атомов рабочего газа, σ_i - сечение ионизации электронным ударом, v - скорость электронов, $v = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_k}$.

На импульсе полного тока можно выделить три стадии: 1 - автоэмиссионную, когда напряжение на промежутке равно U_k , а ток мал, $I \approx 50-70$ А; 2 - стадию "газо-сфокусированного электронного луча" /25, 27/, когда напряжение на разрядном промежутке еще достаточно велико /но меньше U_k /, а ток превышает величину, допускаемую законом $i = eU^{3/2}$; 3 - стадию пробоя, когда напряжение $U_k = 0$, а ток велик. Используется 2 стадия, длительность которой может меняться в зависимости от режима работы источника и в оптимальном

случае составляет 150-200 нсек. Если при этом электрическое поле секции $E_z = 0$, то за анодом регистрируется электронный ток ≈ 200 А, что соответствует критическому току для данной системы. При включении модуляторов ток растет, и при $E_z \approx 1$ кВ/см составляет 1,5 кА. Длительность импульса тока равна длительности импульса ускоряющего поля.

Во втором режиме устанавливается расстояние между катодом и анодом - 2 см. Вакуум в системе поддерживается не хуже 10^{-5} тор. Источник, питающий катод, отключается, а ускоряющая секция работает в режиме импульсного трансформатора, вторичной обмоткой которого является виток, образованный катодным штырем и металлическим экраном индукторов. В этом режиме импульс тока повторяет по форме импульс суммарного напряжения индукторов и при амплитуде последнего 400 кВ имеет амплитуду 1,2 кА.

Фокусировка пучка и система питания магнитного поля

Выбор параметров фокусирующего магнитного поля производился на основании расчетов движения пучка в параксиальном приближении во внешнем поле с компонентами E_z и B_z . Рассматривалась несамосогласованная задача, компоненты E_r и B_e собственного поля пучка считались в приближении круглого пучка с равномерной по сечению плотностью. Результаты расчета опубликованы в [28], где показано, что для надежной транспортировки пучка с током $I \approx 1,5$ кА и начальным радиусом $\rho \approx 1$ см, амплитуда продольного соленоидального магнитного поля должна быть $B_z \geq /0,2 \pm 0,01/ T$. С целью уменьшения тепловых нагрузок использовано питание фокусирующих соленоидов импульсным током в результате разряда на соленоид емкости через тиристорный коммутатор. Регулировка величины поля в отдельных секциях осуществляется посредством изменения задержки запуска тиристоров относительно пучка, при этом для обеспечения надлежащей стабильности поля нестабильность задержки должна быть не хуже $\pm 2,5 \cdot 10^{-6}$ сек.

Механические устройства ускорителя

Ускоритель установлен на раме размерами 6,2x1,2 м. Общая длина одной ускорительной секции 1,0 м, диаметр индукторов - 270 мм. Между ускорительными секциями имеются промежутки длиной 0,3 м, в которых установлены переходные камеры. Ось ускорителя проходит на высоте 1,8 м.

Генераторы импульсов высокого напряжения размещены на той же раме в два ряда по 12 штук /слева от ускоряющих секций и под ними/. Откачка ускорительного тракта осуществляется пятью диффузионными вакуумными агрегатами типа ВА-05-4, подвешенными к раме справа в промежутках между секциями. Внутри рамы расположено также вспомогательное оборудование генераторов импульсов. Остальное оборудование, необходимое для нормального функционирования ускорителя, размещено в блоках и стойках, установленных рядом.

Допустимые осевые смещения ускоряющих элементов не должны превышать 0,15 мм. Реализация требуемых допусков обеспечена точностью выполнения механических работ при изготовлении индукторов и наличием необходимых приспособлений, способных обеспечить надлежащую юстировку всех элементов. Фокусирующие катушки в индукторах установлены с точностью не хуже $\pm 0,1$ мм, несоосность ускорительной трубки с магнитной системой - не более 0,1 мм. Ускоряющая секция закреплена в подвижных опорах, обеспечивающих регулировку в пределах ± 100 мм с точностью не хуже $\pm 0,05$ мм в трех направлениях. Переходные камеры могут быть установлены с точностью не хуже $\pm 0,2$ мм. Юстировка секций и камер производится по выносным геознакам, точность привязки которых к магнитной оси не хуже $\pm 0,02$ мм.

Транспортировка и захват электронов в адгезатор

Транспортировка пучка электронов в адгезатор осуществляется в соленоидальном магнитном поле. В обла-

сти рассеянных полей адгезатора для уменьшения их влияния на пучок используется экранировка железом. На конечном участке транспортной системы, вблизи радиуса инжекции частиц в адгезатор, компенсация магнитного поля производится петлей с током /инфлектор/.

В опытах /3/ по ускорению α -частиц быстро /неадиабатическое/ магнитное поле смещало равновесную орбиту /за те несколько оборотов, когда инжектируемые электроны могли проходить, благодаря бетатронным колебаниям, мимо инфлектора/ так, что кольцо занимало положение, не перекрывающееся с инфлектором. В металлической камере адгезатора УТИ из-за экранировки стенками быстропеременных полей такой метод захвата трудно реализуем. Вместо него предполагается применить коррекцию мгновенной орбиты электронов в точке пересечения ее с равновесной орбитой, при этом радиус инжекции выбирается больше радиуса равновесной орбиты. Корректор представляет собой участок длинной линии, в которой возбуждается бегущая навстречу пучку электромагнитная ТЕМ-волна /рис. 8/.

Адгезатор - система формирования электронных колец

Адгезатор /другое его название - компрессор/ выполняет в коллективном ускорителе следующие функции:

- формирование предварительно ускоренного электронного шнура в кольцо с радиусом r_0 и малыми размерами a_r и a_z ;

- сжатие электронного кольца в импульсных магнитных полях при одновременном уменьшении его размеров r_0 , a_r , a_z и увеличении энергии;

- ввод в объем сжатого кольца нейтральных молекул или атомов выбранного для проведения эксперимента химического элемента и ионизация их за счет столкновений с электронами кольца;

- ускорение двухкомпонентного /электроны и ионы/ кольца в равномерно спадающем вдоль оси магнитном поле за счет перехода вращательной энергии электронов в энергию z -го движения.

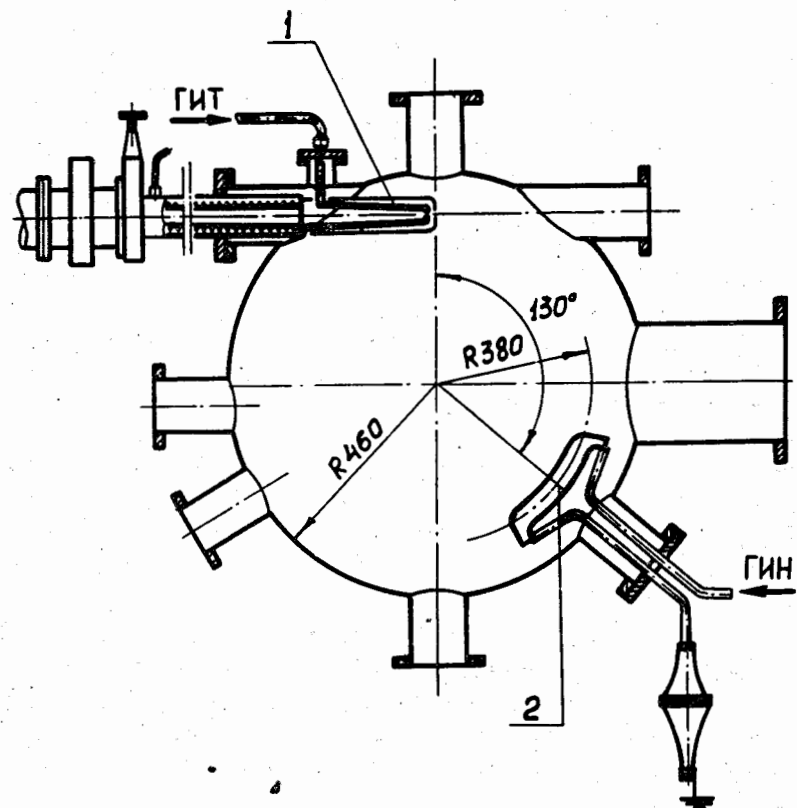


Рис. 8. Схема расположения устройств захвата электронного пучка в адгезатор. 1 - инфлектор; 2 - корректор.

Магнитное поле адгезатора и расчетные параметры кольца

На этапе сжатия кольца адгезатор работает как кольцевой электронный ускоритель с мягкой фокусировкой /типа бетатрона/ с невыполненным, однако, бетатронным условием $B_s = 1/2\bar{B}$. B_s - индукция магнитного поля на равновесной орбите, \bar{B} - индукция, усредненная по площади, ограниченной этой орбитой/. Магнитное

поле адгезатора рассчитывалось так, чтобы обеспечить условия для формирования колец с числом электронов от 10^{13} до $5 \cdot 10^{13}$ и с размерами, которые позволили бы иметь набор энергии ионами в спадающем магнитном поле порядка $U \approx 6$ МэВ/нуклон. Система источников магнитного поля /рис. 9/ состоит из катушек постоянного поля, катушек трех ступеней сжатия, формирующих импульсные магнитные поля, и выводного ускоряющего соленоида. Геометрия их и токи выбраны с учетом экранировки магнитных полей металлическими стенками камеры. Временная диаграмма включения токов в катушках приведена на рис. 10. Перераспределение токов в обмотках последней ступени сжатия при $t \approx 1,5$ мсек, предназначенное для вывода кольца из адгезатора, производится шунтированием тока в катушке №6. Для прохождения опасных по резонансным условиям участков γ -траектории кольца могут быть использованы корректировочные витки.

Источниками магнитного поля являются многовитковые катушки с многослойной изоляцией витков стеклотекстолитной и стеклолентой, залитые эпоксидной смолой горячего отверждения под вакуумом с подачей затем внешнего давления 4 атм. Основные параметры катушек приведены в табл. 2.

Рассчитанные значения $\nu_{r,z}$ -траектории / ν - безразмерные частоты бетатронных колебаний/ показаны на рис. 11 /из рисунка видно, что для $10^{13} < Ne < 5 \cdot 10^{13}$ $\nu_{r,z}$ не проходят через наиболее опасные резонансы 1 и 1/2, если начальная энергия электронов $\gamma \approx 5-7$ /.

График изменения во времени магнитного поля, ведущего электронное кольцо, и радиуса кольца приведен на рис. 12, соответствующие расчетные t -зависимости для малых размеров кольца и энергии электронов - на рис. 13 /малые размеры кольца на конечном радиусе $r_0 \approx 4,5$ см, $a_{r,z} \approx 0,15$ см, конечная энергия электронов $\gamma \approx 50-60$ /.

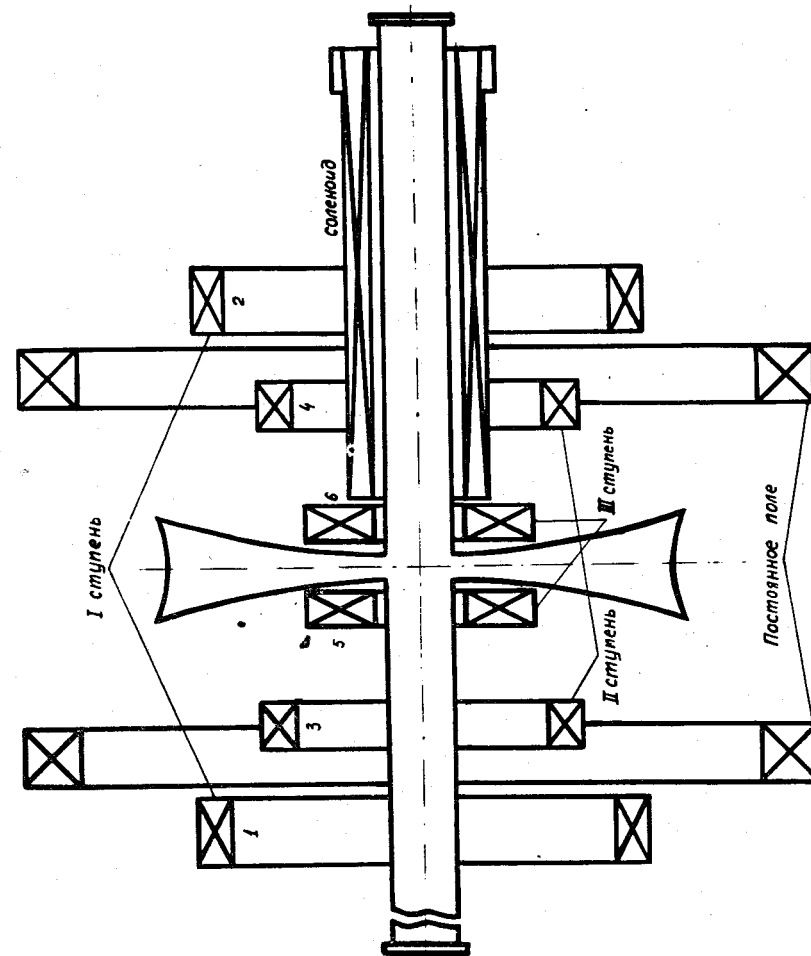


Рис. 9. Схема расположения катушек, создающих магнитное поле адгезатора.

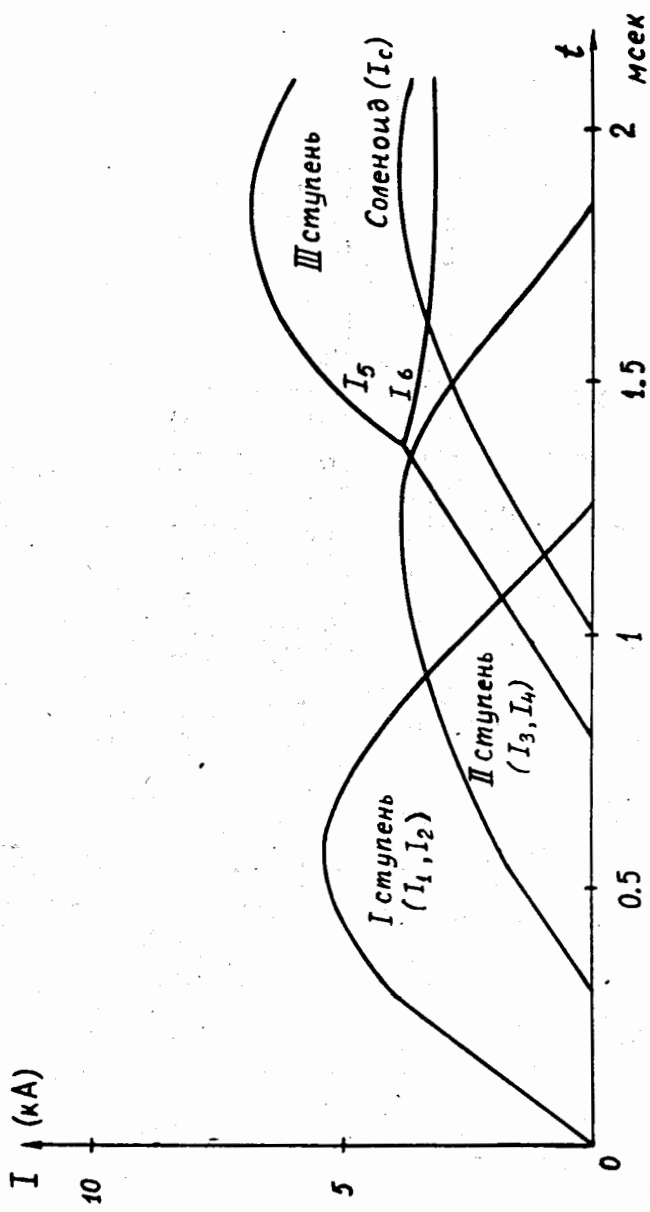


Рис. 10. Временная диаграмма токов в катушках.

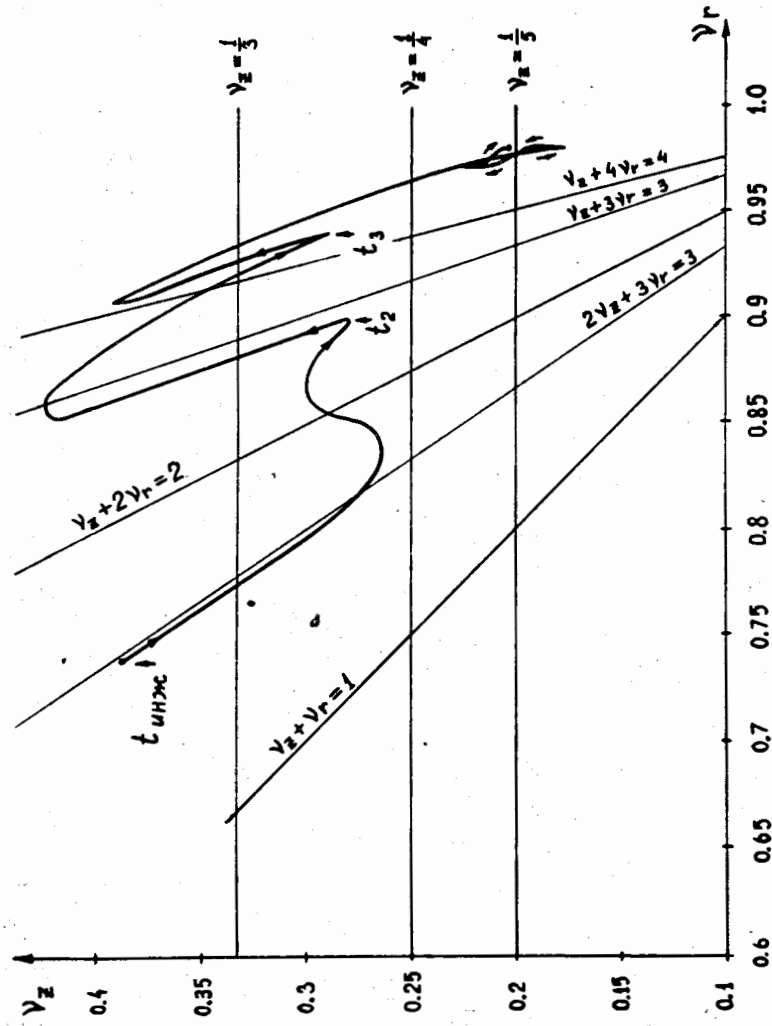


Рис. 11. Траектория равновесного электрона в координатах ν_r и ν_z (ν_r и ν_z - безразмерные частоты бегатронных колебаний). Набор прямых линий соответствует резонансным состояниям.

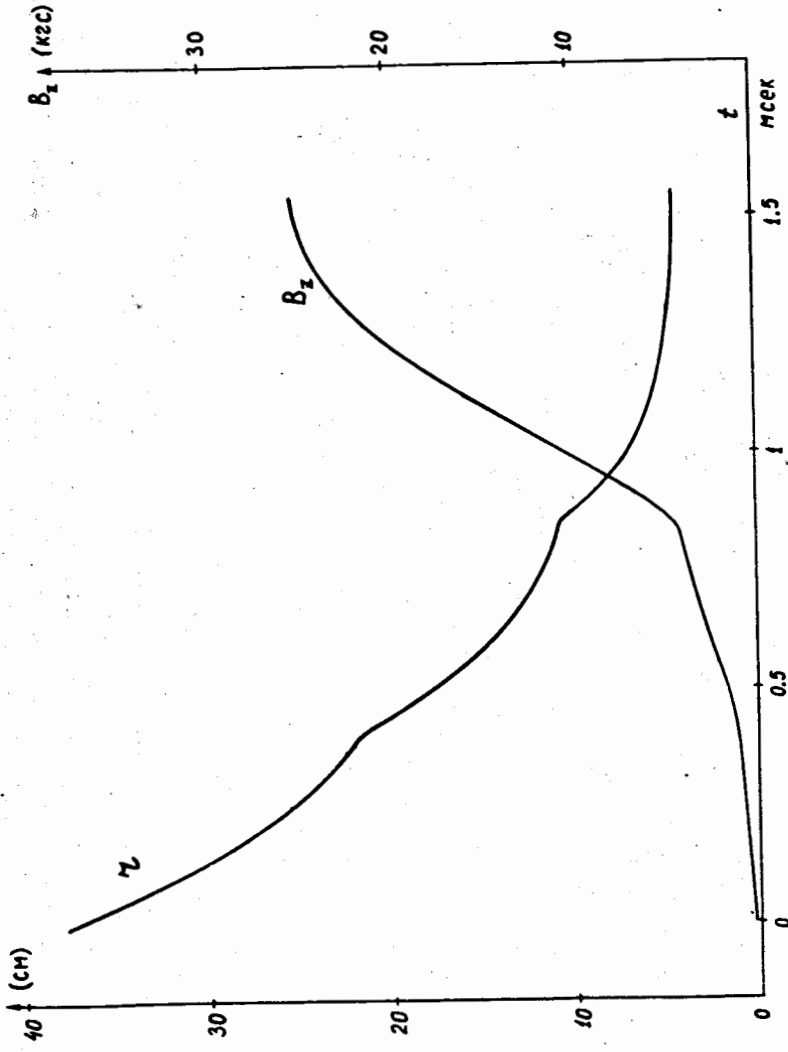


Рис. 12. Зависимость радиуса кольца r и поля на равновесной орбите от времени t .

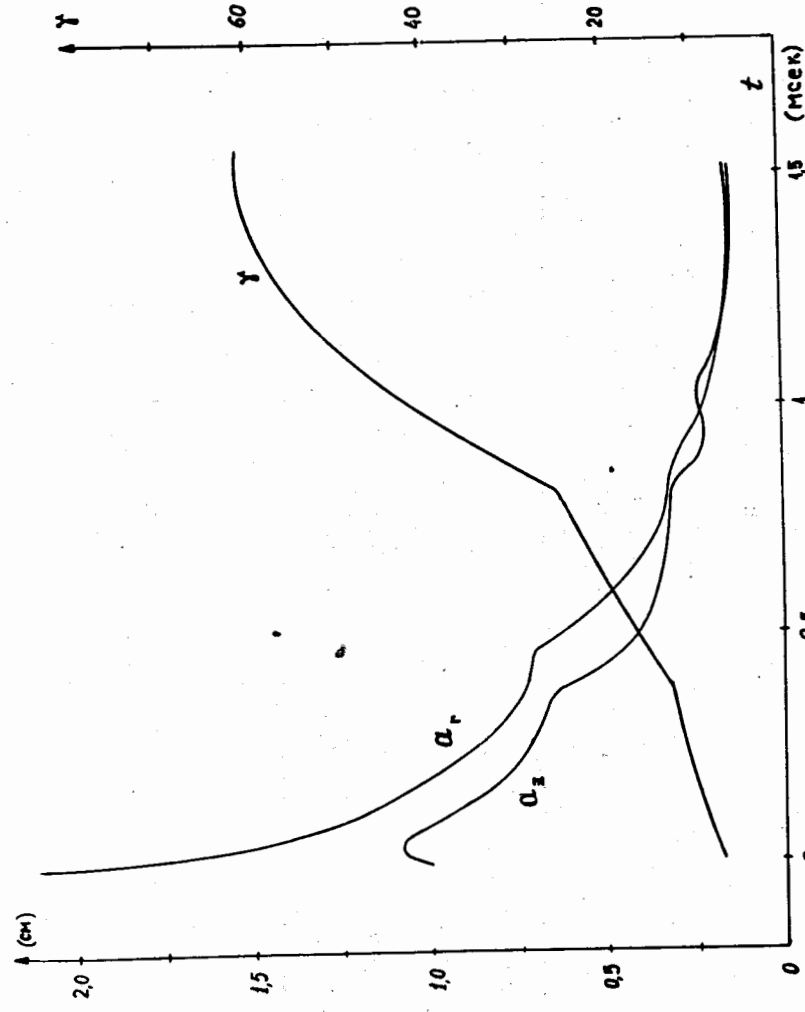


Рис. 13. Зависимость от времени t радиального (a_r) и аксиального (a_z) размеров сечения электронного кольца и лоренц-фактора для равновесного электрона в кольце.

Таблица 2

Наименование обмотки	Средний радиус (см)	Расстояние от медианной плоскости камеры (см)	Кол-во витков	Размеры сечения (см ²)
Постоянное поле	67	31	2 x 80	10,5 x 10,5
I ступень	38	48	2 x 28	8 x 4
II ступень	26	24-29	2 x 48	8 x 6
III ступень	14,3	8-10	2 x 71	6 x 12

Система питания импульсных катушек адгезатора

Для получения импульсных магнитных полей в адгезаторе используются контуры, состоящие из конденсаторной батареи, коммутатора и индуктивной нагрузки, величина которой колеблется для разных контуров от 1,5 до 3 мГн. Каждая ступень сжатия состоит из пары катушек, включенных последовательно, на которую разряжается конденсаторная батарея.

Емкость конденсаторной батареи выбрана из условия обеспечения определенной длительности импульса тока в катушках адгезатора и составляет 10^{-4} Ф. Конденсаторная батарея составлена из девяти параллельно включенных секций, каждая секция содержит четырнадцать последовательно включенных конденсаторов типа ИМ5-140. Энергия, запасаемая в каждой конденсаторной батарее, составляет 40 кДж. Схема соединения конденсаторов в батарее выбрана из условия надежной работы конденсаторов ИМ5-140 при длительности импульса тока 2 мсек и частоте срабатываний системы, равной 5 Гц. При этом температура корпусов конденсаторов возрастает на $10-15^{\circ}\text{C}$.

Для коммутации тока нагрузки разработаны два коммутатора: игнитронно-диодный и тиристорный. В игнитронно-диодном коммутаторе используются три последовательно включенных игнитронных разрядника типа ИВС-200/15. Для исключения возможности пробоев в обратном направлении последовательно с игнитронами включены 24 силовых кремниевых диода типа В-500. Коммутатор рассчитан на напряжение 30 кВ и ток в импульсе 10 кА при длительности импульса 2 мсек.

Обратная перезарядка конденсаторной батареи после срабатывания системы производится через дроссель и неуправляемый коммутатор, состоящий из 24 вентилях типа В-500, включенных последовательно.

При токах 4-5 кА время восстановления игнитронных разрядников составляет 5 мсек. Поэтому для исключения повторных срабатываний необходимо существенное увеличение индуктивности дросселя обратной перезарядки /что ухудшает добротность системы/. Игнитронные раз-

рядники имеют внутреннее сопротивление 10^{-2} Ом при токах 5 кА и нестабильность запуска $\pm 0,75 \text{ мксек}$. Тиристорный коммутатор рассчитан на напряжение 30 кВ и ток 5 кА и состоит из 40 последовательно включенных тиристоров типа Т-320. Время восстановления тиристоров Т-320 после прохождения через них тока 5-6 кА не более 500 мксек, внутреннее сопротивление - 10^{-2} Ом и нестабильность запуска составляет 0,1 мксек. Тиристорный вариант коммутатора использовался в работе по формированию магнитного поля и проработал без выхода элементов из строя несколько сот тысяч импульсов.

Камера адгезатора

Металлическая камера адгезатора представляет собой сварную конструкцию, выполненную из листовой нержавеющей стали толщиной $\delta = 0,5 \text{ мм}$ /рис. 14/. Поверхности боковых стенок камеры сферические. В обечайке имеется ряд патрубков, предназначенных для ввода электронного кольца из СИЛУНДа, размещения измерительных устройств, корректора траектории электронов и вакуумной откачки камеры.

В центре боковых стенок располагаются два патрубка /7 и 8/, предназначенные, соответственно, для ввода в электронное кольца струи нейтральных атомов и вывода из камеры ускоренного электронно-ионного кольцевого сгустка.

Усилия, оказываемые на поверхность камеры атмосферным давлением и пондеромоторным взаимодействием индуцированных в металле камеры вихревых токов с внешними магнитными полями, передаются на два стеклотекстолитовых кольца 9, укрепленных на подставке 11 и жестко связанных между собой.

На столе подставки /10 и 11/, выполненном из текстолита, помимо камеры размещается жесткий стапель из стеклотекстолита, в котором крепятся обмотки, формирующие постоянное и импульсные магнитные поля. Конструкция камеры, подставки и стапеля предусматри-

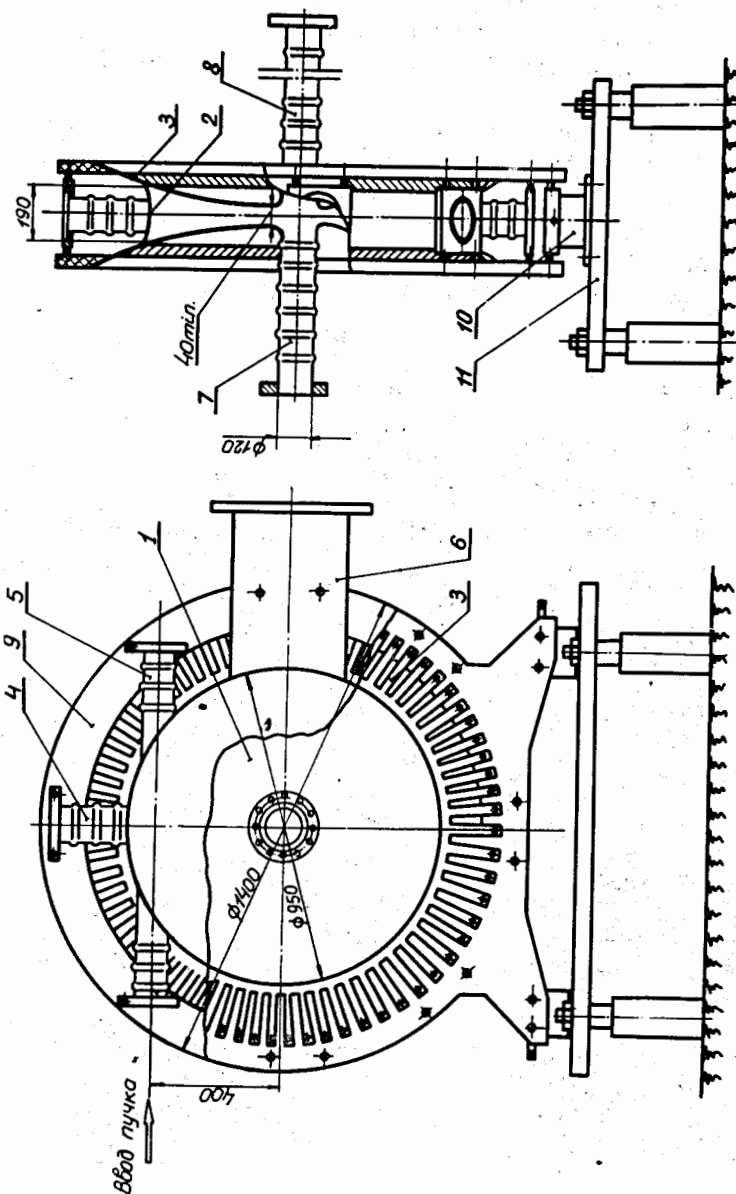


Рис. 14. Камера адгезатора.

вадет устройство для юстировки и жесткой фиксации медной плоскости камеры и обмоток относительно базовых осей ускорителя тяжелых ионов.

Вариант керамической камеры адгезатора разрабатывается.

Вакуумная система адгезатора рассчитана на получение вакуума $\approx 10^{-8}$ Тор. По оценке, натекание газа в объем камеры составляет $2 \cdot 10^{-5}$ л. Тор/сек. Для откачки газа используется геттерно-ионный насос ГИН-5 в комбинации с вакуумным агрегатом АВГИ-5-3, скорость откачки которого составляет 5000 л/сек.

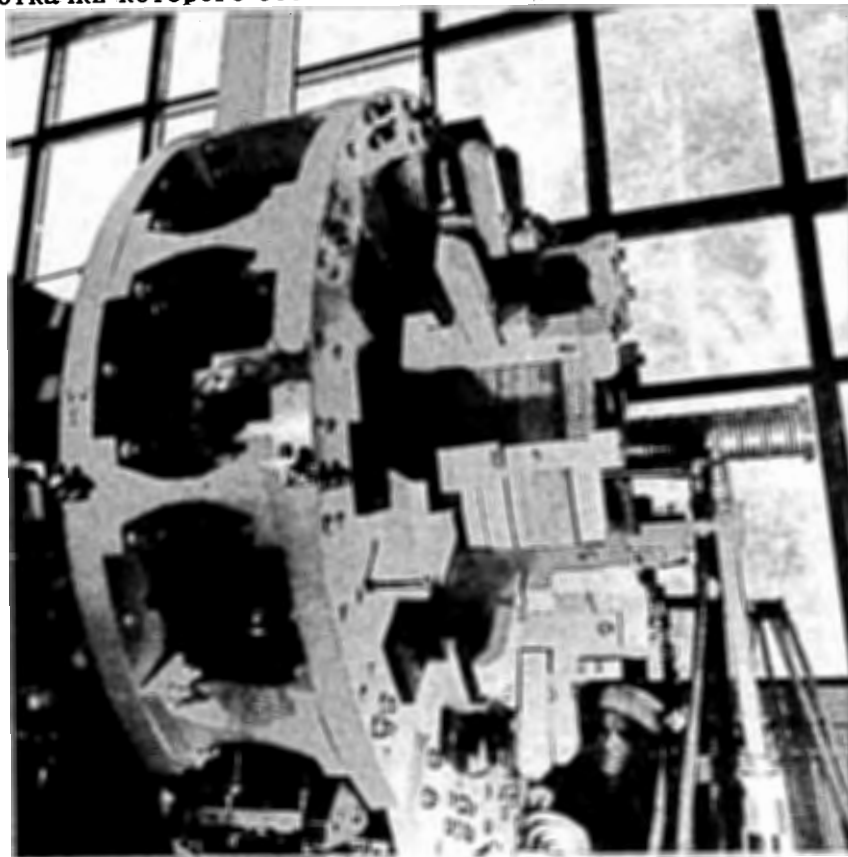


Рис. 15. Адгезатор.

Загрузка кольца ионами

Существует несколько способов загрузки электронного кольца ионами. Все они основаны на том, что электроны кольца ионизируют нейтральные атомы, превращая их в положительно заряженные ионы, которые удерживаются в кольце его кулоновским полем. В описываемом адгезаторе предполагается осуществить процесс накопления ионов из импульсного потока атомов выбранного газа, пересекающего кольцо на конечной стадии сжатия. Такой вариант загрузки позволяет регулировать и количество загружаемых ионов и время загрузки /другими словами, зарядность ионов/. Расчет накопления ионов в электронном кольце коллективного ускорителя выполнен в [29, 30].

Ускорение ионов в спадающем по оси z магнитном поле

Электронное кольцо, загруженное ионами, выводится из камеры адгезатора в направлении своей оси (z) в спадающее по z аксиально-симметричное магнитное поле.

Ускорение кольца осуществляется за счет накопленной в нем энергии вращения электронов. В рассматриваемой установке кольцо ускоряется на длине ≈ 1 м, допустимое увеличение его радиуса составляет 0,5 см.

Отсюда следует ограничение на градиент магнитного поля

$$\frac{1}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial z} < 2 \cdot 10^{-3}. \quad /3/$$

Допустимое число ионов в кольце, характеризуемое параметром ξ -отношением суммарных масс ионов и электронов соответственно, оценивается как

$$\frac{1}{1 + \xi} = \frac{10^{-3} g I}{a_z + a_r} \frac{Z}{A} K. \quad /4/$$

Здесь I - ток инжекции в А, g - коэффициент захвата при инжекции, $K \leq 1/5$ - отношение ускорения к предельно допустимому. Энергия, приобретаемая нуклоном на 1 см,

$$\Delta E = \frac{1}{1 + \xi} \text{ /МэВ/см/.} \quad /5/$$

При стопроцентном захвате, токе инъекции 600 А,

$$\frac{Z}{A} = \frac{1}{10}, K = \frac{1}{5} \quad a_z \approx a_r \approx 2 \cdot 10^{-1} \text{ см набор энергии}$$

$$\Delta E \approx 10^{-1} \text{ МэВ/см,} \quad /6/$$

а отношение масс $\xi \approx 10$, что соответствует для $A \approx 100$ отношению

$$\frac{N_i}{N_e} \approx 2 \cdot 10^{-3}.$$

Управление ускорителем, диагностика пучков и измерения

Предусматривается автоматизированное управление коллективным ускорителем тяжелых ионов с применением средств вычислительной техники. Использование комплекса электронной аппаратуры, работающей совместно с малой ЭВМ, позволит оптимизировать режим работы ускорителя, иметь наглядное представление о процессе ускорения во всех звеньях системы, наблюдать и регулировать быстрые процессы и параметры, "ускользающие" от операторского контроля. Для этой цели аппаратура включает в себя датчики, измеряющие параметры систем ускорителя, а также исполнительные элементы, обеспечивающие необходимое регулирование этих параметров по командам аппаратуры управления.

Электронная аппаратура управления выполняется в основном в стандарте КАМАК, входящие в ее состав малые ЭВМ типа ТРА/1 и М-6000 оборудованы необходимыми внешними устройствами /телетайп, читающее устройство, перфоратор, дисплей и т.д./, а также соответствующими модулями интерфейса и драйверами, линией связи для двухстороннего обмена информацией как с блоками аппаратуры управления, так и с ЭВМ измерительно-вычислительного комплекса ОНМУ.

Электронная аппаратура управления коллективным ускорителем тяжелых ионов включает в себя следующие функциональные узлы: устройство синхронизации, обеспечивающее срабатывание всех систем ускорителя и

контрольно-измерительной аппаратуры в заданной временной последовательности с заданной точностью /предусматривается перестройка длительности и последовательности временных интервалов/; аппаратуру, измеряющую и регулирующую временной и амплитудный разброс импульсов модуляторов линейного ускорителя; устройства контроля и дистанционного управления вакуумными системами линейного ускорителя и адгезатора; аппаратуру, обеспечивающую контроль и управление системами питания ускорителя; аппаратуру диагностики состояния систем ускорителя и пучков; малую электронно-вычислительную машину, работающую на линии со всем комплексом электронной аппаратуры; устройства представления данных /дисплей/ на пульте управления ускорителем для операторского контроля; выносной пульт управления для наладочных работ на ускорителе.

Система диагностики и измерений построена на базе электронной вычислительной машины М-6000. Электронная аппаратура выполнена в стандарте КАМАК или в совмещенном стандарте КАМАК-ВИШНЯ.

Измерение тока пучка в ускорителе СИЛУНД проводится на выходе каждой секции при помощи поясов Роговского, помещаемых внутрь стыковочных камер. Имеется система для передачи показаний поясов Роговского в ЭВМ М-6000.

Измерение параметров пучка в адгезаторе на первом обороте осуществляется с помощью двух /Аи В/ систем мишеней, полностью поглощающих электроны. Каждая мишень содержит два ряда электродов-ламель, сигналы с которых дают распределение пучка по двум координатам, и один электрод-монитор, сигнал с которого пропорционален полному току пучка. Система А измеряет профиль по y, z -координатам и полный ток пучка при выключенном магнитном поле в адгезаторе в функции расстояния l от инжектора в пределах /0-300/ мм. Система В измеряет профиль пучка по r, z -координатам и полный ток пучка при включенном магнитном поле в адгезаторе в функции угла ϕ в пределах /0-300/°.

Информация с ламелей и монитора в виде напряжения, пропорционального заряду остановившихся в них электронов, поступает на блок многоканального аналогового мультиплексера, содержащего 75 каналов хранения информации с временем хранения 3 мсек. При разработке аналогового мультиплексера основным требованием являлось условие расширения диапазона входных сигналов с тем, чтобы иметь возможность исследовать пучки в широком диапазоне интенсивностей и оценивать влияние кулоновского взаимодействия электронов пучка на его поведение в адгезаторе.

Для измерения параметров пучка в процессе сжатия предполагается использовать цилиндры Фарадея, датчики синхротронного излучения и магнитного поля кольца, регистрирующего СВЧ-излучение и т.д.

Для проведения магнитных измерений в адгезаторе создана магнитометрическая система, связанная с ЭВМ М-6000 и позволяющая управлять током в обмотках и временем включения коммутаторов. Точность измерений импульсных магнитных полей лучше 0,1%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические расчеты, проведенные в ОИЯИ и в ряде других институтов /3-5, 9-19/, подтверждают возможность создания описанного здесь ускорителя. Эксперименты по формированию электронных колец и по ускорению α -частиц коллективным методом показали реальность проекта коллективного ускорителя, запуск которого откроет новые возможности перед экспериментаторами в интереснейших областях ядерной физики и физики элементарных частиц.

Литература

1. V.Veksler et al. *Collective Linear Acceleration of Ions. Proc. of Sixth Internat. Conf. on High Energy Accelerations. Cambridge, U.S.A., p. 289, 1967.*
2. V.P.Sarantsev. *In Proceedings of the VII International Conference on High Energy Accelerators, Erevan, U.S.S.R., 1969.*

3. В.П.Саранцев и др. *ЖЭТФ, 60, 1980, 1971.*
4. *Труды симпозиума по коллективным методам ускорения, ОИЯИ, Д9-6707, Дубна, 1972.*
5. *International Conference on Multiply-Charged Heavy Ion Sources and Accelerating Systems. Gatlinburg, U.S.A., 1971, Nuclear Science, v. NS-19, 2, 1972.*
6. Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян и др. *Препринт ОИЯИ 7-7204, Дубна, 1973.*
7. А.Баланда и др. *Препринт ОИЯИ 7-7073, Дубна, 1973.*
8. Г.Н.Флеров, В.С.Барашенков. *Препринт ОИЯИ Р14-7060, Дубна, 1973.*
9. В.С.Попов. *ЖЭТФ, 65, 35 /1973/; Письма в ЖЭТФ, 16, 355, 1972. S.S.Gershtein, V.S.Popov. Nuovo Cimento Letters, 6, 593, 1973.*
10. И.Н.Иванов, Э.А.Перельштейн, В.П.Саранцев. *Препринт ОИЯИ, Р9-5535, Дубна, 1970.*
11. Ю.И.Алексахин, И.Л.Коренев, Л.А.Юдин. *Препринт ОИЯИ, Р9-7065 и Р9-7066, Дубна, 1973.*
12. Ю.И.Алексахин, В.П.Саранцев. *Сообщение ОИЯИ Р9-7357, Дубна, 1973.*
13. D.Keef et al. *Phys.Rev., 22, 558, 1969.*
14. G.R.Lambertson et al. *Preprint LBL-1315 (January), 1973.*
15. G.R.Lambertson, W.Gilbert. *Monthly Status Report, July 1973.*
16. J.M.Peterson. *Nuclear Science, v. NS-19, 2, 1972.*
17. C.H.Dustmann et al. *Particle Accelerator Conference. Accelerator Engineering and Technology. San Francisco, U.S.A., March, 1973. Nuclear Science, v. NS-20, 3, 1973, p. 283.*
18. M.Reiser. *Nuclear Science, v. NS-19, 2, 1972.*
19. C.Andelfenger et al. *Nuclear Science, v. NS-19, 2, 1972.*
20. A.Bowersy. *Elektrische Hochspannungen, 1939, Berlin.*
21. Ю.П.Вахрушин, В.П.Саранцев. "Ускоряющее поле линейного индукционного ускорителя". *Препринт ОИЯИ 9-3287-2, Дубна, 1967.*
22. И.Г.Китаев. *Ударные электромагнитные волны. "Сов. радио" 1957, Москва.*
23. Г.В.Долбилов, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев. *ЖТФ, вып. 7, 1942 /1972/.*
24. Г.В.Долбилов, А.Д.Коваленко, В.П.Саранцев. *Труды симпозиума по коллективным методам ускорения, стр. 18, ОИЯИ, Д9-6707, Дубна, 1972.*
25. Э.М.Рейхрудель, Т.А.Тимов. *Вестник МГУ, 2, 61 /1950/.*
26. А.А.Зайцев, Э.М.Рейхрудель. *Вестник МГУ, 12, 39 /1950/.*
27. Э.М.Рейхрудель, А.А.Санин, Т.А.Тимов. *ЖТФ, XXI, 746 /1951/.*
28. А.Д.Коваленко, Д.Париш, П.И.Рыльцев, В.П.Саранцев. *Препринт ОИЯИ, Р9-6027, Дубна, 1971.*

29. В.Георџе и др. Сообщение ОИЯИ, Р9-6555, Дубна, 1972.
30. М.Л.Иовнович, Н.Б.Рубин, В.П.Саранцев. АЭ, т. 27 301 /1969/.

*Рукопись поступила в издательский отдел
28 января 1974 года.*