

РАБОТЫ ПО СОЗДАНИЮ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ В ОИЯИ

В.П.Саранцев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Настоящий доклад посвящен основным направлениям исследований, проводимых в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) с целью создания коллективного ускорителя ионов. Приводятся основные результаты, полученные при наладке ускорителя тяжелых ионов, а также результаты исследований процесса инжекции, проведенных на модели ускорителя.

I. Коллективный ускоритель тяжелых ионов

Прежде чем перейти к конкретным результатам, полученным при наладке ускорителя, остановимся на основных параметрах и конструктивных особенностях установки для получения электронных колец и ускорению тяжелых ионов ^{/1/}. Установка для ускорения тяжелых ионов в электронном кольце состоит из двух основных элементов - высоко-точного ускорителя электронов (Силунд) и системы формирования и ускорения электронных колец (адгезатор).

Инжектором ускорителя является индукционный ускоритель электронов Силунд ^{/1/}, параметры которого в описываемом этапе наладки были следующими: максимальный ток ускоренных электронов - 700 А, энергия электронов - 2-2,4 МэВ, длительность импульса тока составляла 5+20 нс и могла быть изменена путем соответствующей настройки результирующего импульса ускоряющего напряжения Силунда, содержащего 30 независимых импульсных генераторов. Источник электронов индукционного ускорителя выполнен на базе холодного катода, работающего в режиме нейтрализации пространственного заряда ^{/2/}. Измеренный разброс электронов в импульсе тока, инжектируемого на равновесную орбиту, достигал ~ 1-3% и зависел от настройки ускоряющей

системы инжектора. Эмиттанс пучка при $E \approx 2,4$ МэВ был < 30 мрад.см. Анализатором энергетического разброса и эмиттанса служила магнитная система адгезатора.

Вакуумная камера генератора заряженных торов (адгезатора) представляет собой металлическую сварную конструкцию, выполненную из листовой нержавеющей стали толщиной $\delta = 0,5$ мм (рис.1). Боковые поверхности (1) камеры, с целью увеличения механической прочности и уменьшения расстояния между пучком и стенками в процессе сжатия кольца, имеют сферическую форму. Стенки камеры выполняют роль элементов, уменьшающих азимутальную составляющую электрического поля пучка при возможном развитии азимутальной неустойчивости, что позволяет повысить предельный устойчивый ток кольца $^{1/}$. Для подавления резонансных неустойчивостей на собственных модах камеры и волноводных резонансов на последних этапах сжатия кольца при его ускорении применена металлическая труба (2), которая одновременно является составным элементом устройства формирования импульсной струи нейтрального газа для загрузки электронного кольца ионами. На обечайке вакуумной камеры имеется ряд патрубков, предназначенных для размещения устройств ввода пучка в адгезатор (3), корректора траекторий частиц (4), устройства сброса электронного кольца (5), элементов диагностической аппаратуры и вакуумной откачки камеры. Два осевых патрубка (6,7), основное назначение которых – размещение устройства формирования импульсной струи нейтральных атомов (6) и вывод нагруженного ионами электронного кольца (7), на некоторых этапах наладки использовались для размещения элементов диагностики.

Усилия, оказываемые на поверхность камеры атмосферным давлением и импульсными магнитными полями, передаются на два текстолитовых кольца (8) посредством тонких металлических растяжек. Магнитная система адгезатора на первом этапе наладки состояла из четырех пар импульсных катушек $^{3/}$.

Катушки первой ступени питаются импульсным током длительностью 11 мс. Стенки камеры практически прозрачны для поля I ступени.

Длительности токов II, III, IV ступеней 1,2; 1,6; 1,7 мс, соответственно. Характерное время проникновения полей в камеру – 150 мкс $^{4/}$. Амплитуды токов: I ступени – 2,5 кА, II – 6,0 кА, III – 4,5 кА, IV – 5,0 кА.

Изменением положения обмоток, амплитуд токов в катушках и моментов включения ступеней относительно момента инжекции можно

получить большой набор n – траекторий пучка. Эта возможность использовалась при настройке режима сжатия с минимальными потерями частиц.

Ввод пучка на инжекционную орбиту осуществлялся с помощью системы, представляющей собой совокупность экранирующих, компенсирующих и фокусирующих устройств. Экранировка пучка от рассеянных полей магнитной системы адгезатора осуществлялась экраном. На последнем этапе транспортировки пучка поле адгезатора компенсировалось импульсным магнитным полем токовой петли. Длительность импульса тока петли – несколько сотен наносекунд. Рассеянные поля петли, в свою очередь, экранировались тонким металлическим экраном.

Для компенсации эффектов, связанных с погрешностями юстировки системы, служила отклоняющая линза, создающая поперечное, однородное по сечению пучка магнитное поле, амплитуда и направление которого могли меняться.

Максимальный ток, который был инжектирован в камеру адгезатора, составлял около 600 А. Основные эксперименты были проведены при токах инжекции – 300 А.

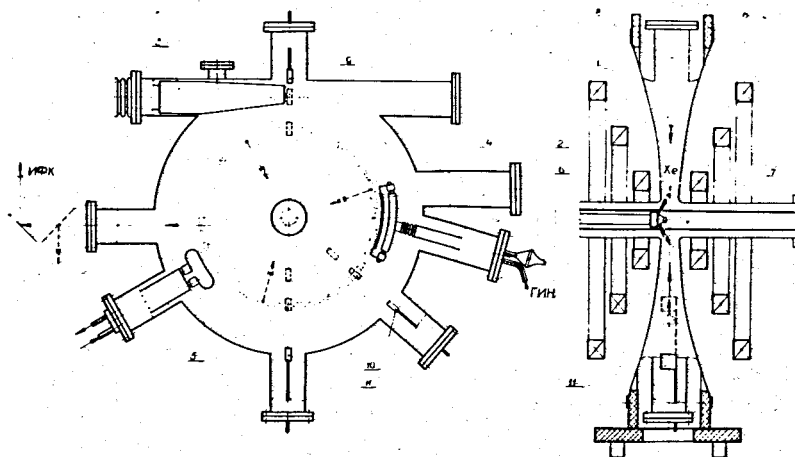


Рис. 1. Схема расположения вводных устройств и систем диагностики в камере адгезатора.

Захват электронного пучка на замкнутую орбиту ($R_0 = 35$ см) осуществляется с помощью корректирующего устройства (4), представляющего собой полосковую линию, по которой распространяется ТЕМ-волна. Корректирующее устройство, как следует из рисунка I, располагалось в узле когерентных бетатронных колебаний. Амплитуда волны выбиралась такой, чтобы усредненный по частицам радиальный импульс полностью гасился полями корректора. Благодаря быстрому срезу импульса корректирующего устройства (≤ 1 нс) удавалось получить замкнутое кольцо с малыми когерентными возмущениями. Увеличение полуразмера сечения кольца под действием полей корректора не превышало 3 мм.

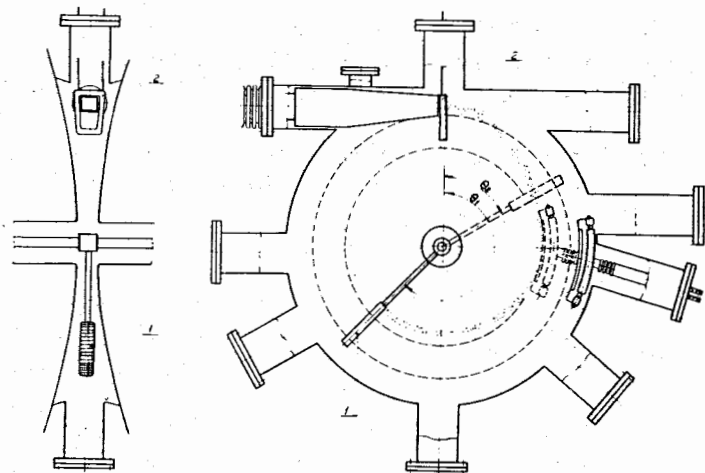


Рис. 2 Схема расположения вводных устройств и систем диагностики в камере адгезатора.

Система наблюдения за пучком. В экспериментах по сжатию электронного кольца, завершающих первый этап наладки, настройка исходной и скорректированной траектории осуществлялась посредством системы ламелей (9, 10, 11), (рис. I), позволяющей иметь информацию о положении центра тяжести и размерах пучка на азимутах $0^\circ, 135^\circ, 185^\circ, 360^\circ$. Имелась возможность измерять как заряд частиц, так и мгновенный ток пучка. Ламели дистанционно могли быть установлены

на исходную (без коррекции) или скорректированную траекторию, либо выведены из зоны пучка.

Во время наладочных работ по установке первого оборота электронов в камере адгезатора, а также захвата пучка на замкнутую орбиту использовалась подвижная по азимуту система ламельных электродов, соединенная с ЭВМ, дающая возможность на каждом азимуте получить распределение плотности электронов в плоскости (r, z), (рис. 2). Пример таких распределений показан на (рис. 3).

Для наблюдения за пучком в начальной стадии захвата использовался индукционный датчик с постоянной времени ~ 5 мкс. Для наблюдения на более поздних стадиях существования кольца, а также для градуировки γ -датчиков использовалось устройство сброса пучка, представляющее собой петлю с током и дающее возможность сформировать траекторию частиц так, чтобы высадить их на инжектор за ~ 100 нс.

Потери пучка при формировании и сжатии кольца регистрировались γ -датчиками по вспышкам жесткого рентгеновского излучения. γ -датчиками измерялась относительная интенсивность пучка при сбросе кольца на инфлектор (3) или ламели (10, 11), а также интенсивность кольца, прошедшего стадию сжатия и разрушающегося на больших радиусах при разжатии вследствие уменьшения во времени магнитных полей.

Для изучения поведения кольца в процессе сжатия с внутренней части камеры вводились зонды, перемещающиеся по радиусу. Они

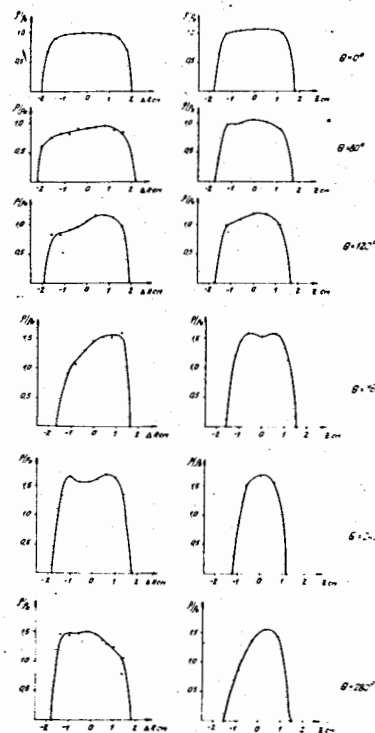


Рис. 3. Сечения пучка на первом обороте.

служили для измерения равновесного радиуса сжимающегося кольца и его малого размера по времени разрушения пучка. При этом регистрировались импульсы γ - излучения, тока или заряда на зонд.

На последних этапах сжатия кольца регистрировалось синхротронное излучение в инфракрасной и видимой областях. По синхротронному излучению измерялись мгновенный радиус сжимающегося электронного кольца, его малые размеры и проводилась оценка интенсивности.

Эксперименты по захвату электронного кольца показали, что эффективность захвата составляет 50-70%. Величина захваченного тока 200-300 А ($I = I_0 \cdot 10^{13}$ электронов). Максимальное число захваченных частиц достигало $2,5 \cdot 10^{13}$, однако это значение не удавалось поддерживать в течение длительного времени. Время жизни захваченного кольца без видимых потерь составляло ~ 5 мс.

2. Измерение равновесного радиуса электронного кольца

Равновесный радиус (соответствующий электронам с энергией, равной средней, и с нулевой амплитудой бетатронных колебаний) определялся тремя способами: (1) по тормозному γ - излучению при наплывании кольца на фляжок, (2) по электрическим сигналам с фляжка и (3) с помощью датчика инфракрасного излучения.

На рис. 4 показаны типичные осциллограммы сигналов с ФЭУ (а), импульса напряжения (б) и токового импульса (в) с фляжка, установленного на радиусе 15 см. На рис. 5 отложены времена начала и окончания импульсов с ФЭУ для различных радиусов. Конечные точки лежат близко к расчетной зависимости $r(t)$ для $\gamma_{in} = 4,5$ (сплошная кривая). Измерения по γ - излучению и изменению напряжения на емкости, подключенной к фляжку, давали одинаковые результаты в пределах ошибок измерений.

На рис. 6 показаны осциллограммы сигналов с ИК-датчика без собирающей линзы при различных напряжениях IV ступени. На радиусах $r \geq 4,5$ см ($U_0 < 15$ кВ) сигналы имеют характерную двугорбую форму, которая связана с двукратным прохождением сечения кольца через поле зрения датчика: при сжатии и разжатии.

На том же рисунке показаны построенные по осциллограммам зависимости $r(t)$ при различных напряжениях IV ступени.

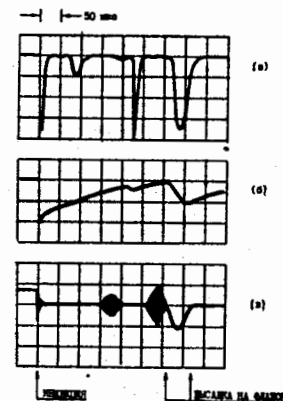


Рис. 4. Сигналы сжимающегося кольца электронов на зонде.

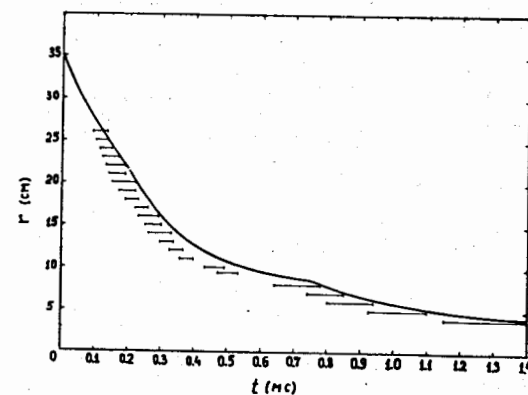


Рис. 5. Траектория сжатия электронного кольца.

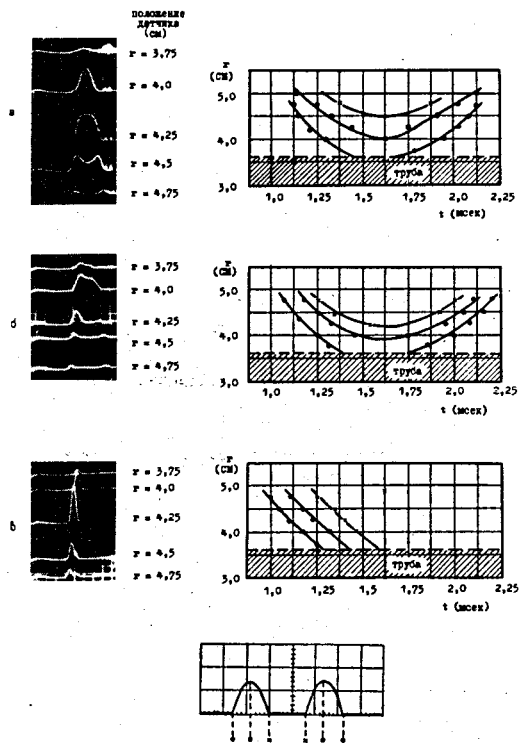


Рис. 6. Сигналы ИФК-датчика на конечных радиусах сжатия кольца.

3. Измерение размеров поперечного сечения

Радиальный размер сечения определяется по длительности сигнала γ - излучения, возникающего при наплывании электронного кольца на флажок в процессе сжатия:

$$a_r \approx \Delta t \cdot \dot{r}$$

где Δt - длительность сигнала γ - излучения, \dot{r} - скорость сжатия. Окончательная корректировка магнитного поля проводилась по

результатам измерения сечения кольца в видимом диапазоне синхротронного излучения. На рис. 7 представлена фотография сечения электронного кольца на радиусе 4 см.

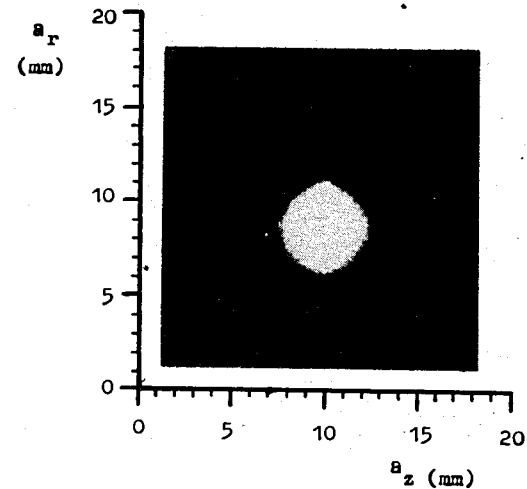


Рис. 7. Сечение электронного кольца в видимом синхротронном свете.

4. Потери электронов при сжатии

В первых экспериментах по формированию электронных колец в адгезаторе сжатие сопровождалось большими потерями электронов. В отдельных случаях потери в первые ~ 30 мкс после инжекции превышали 80% от захваченного числа частиц. Этот результат был связан с раскачкой пучка на азимутальной неоднородности магнитного поля в области инфлектора, возникающей при включении II ступени, и высадкой электронов в основном на корректор. После замены медного экрана инфлектора на экран из нержавеющей стали потери практически не наблюдались.

На рис. 8. приведены зависимости амплитуды γ - сигнала от времени включения устройства сброса пучка $t_{\text{сб}}$: точки - в присутствии

медного экрана, сплошная кривая - установлен экран из Х18Н9Т. Амплитуда γ - сигналов, отнормированная с учетом их длительностей, пропорциональна количеству электронов в кольце в момент включения устройства сброса (до $t \approx 30$ мкс).

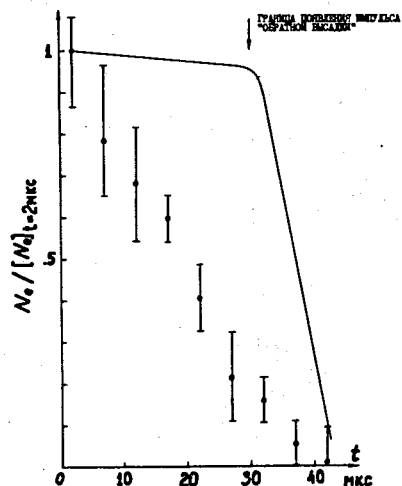


Рис. 8. Потери пучка на первой стадии сжатия при наличии искажений магнитного поля.

Кроме потерь в первые 30 мкс наблюдались потери и в более поздние времена. На рис. 9а показана типичная осциллограмма сигнала с ФЭУ, на которой кроме импульса высадки на флажок ($t = 390 + 460$ мкс) присутствуют дополнительные импульсы, свидетельствующие о потере электронов. Времена потерь: $60 + 100$ мкс, $160 + 200$ мкс, $230 + 250$ мкс после инъекции.

Расчетная n - траектория для данного режима показана на рис. 9б. Реальная n - траектория, как это следует из магнитных измерений^{/3/}, проходит на 10-30% выше расчетной. Электронное кольцо при сжатии должно было пересекать параметрический резонанс $2\omega_e = I$ ($n = 0,25$) и разностный резонанс $2\omega_e - \omega_r = 0$ ($n = 0,2$), с которыми и связаны первые 2 импульса потерь. Третий пик связан с потерями электронов в районе $r = 20$ см, которые вызваны увеличением χ - размера коль-

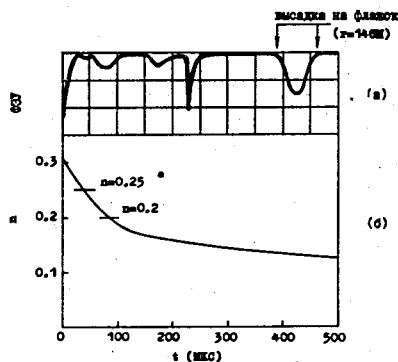


Рис. 9. Влияние резонансов.

ца за счет сил изображения, имеющих в этом месте максимальный градиент^{/4/}.

Измерение заряда кольца, высаживающегося на флажок до и после прохождения резонансов, показало, что несмотря на сравнительно большие амплитуды γ - сигналов, величина потерь не превышала погрешности измерений ($\sim 20\%$). Однако, чтобы избежать увеличения аксиального размера сечения в параметрическом резонансе, n - траектория была скорректирована. Коррекция была проведена сближением катушек I ступени и выбором времен включения и напряжений II-IV ступеней

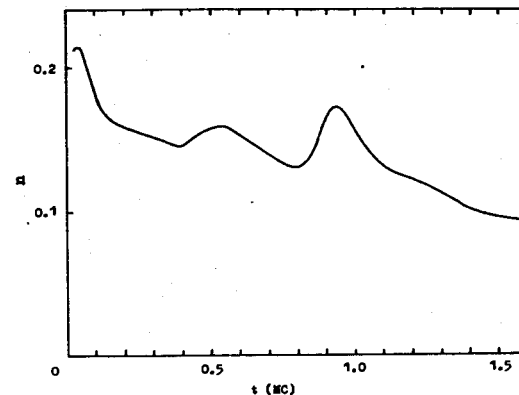


Рис. 10. Расчетная n - траектория кольца.

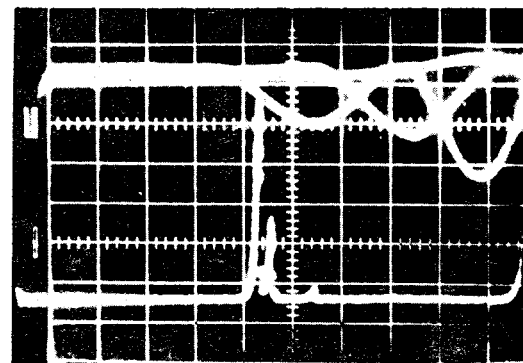


Рис. 11. Осциллограмма пучка электронов после сжатия в адгезаторе.

На рис. 10, 11 приведены расчетная n - траектория и осциллограммы сигнала с ФЭУ и токов во II, III и IV ступенях в рабочем режиме. Критерием хорошего магнитного поля в каждом случае служили минимальные размеры сечения кольца в конечном состоянии сжатия.

5. Опыты по выводу электронного кольца

Ускорение электронного кольца проходит в спадающем поле соленоида. Общая длина ускорения – 80 см. Вывод кольца происходит за счет шунтировки одной из катушек IV ступени магнитного поля. Выбор времени включения соленоида и времени шунтировки обеспечивает средний градиент по длине ускорения ~ 70 Э/см. Установка соленоида потребовала дополнительной коррекции полей в адгезаторе, из-за влияния токов изображения в разомкнутом соленоиде на R – составляющую поля II ступени. Корректировка достигалась за счет симметризации, для чего симметрично с основным соленоидом был установлен фальшсоленоид.

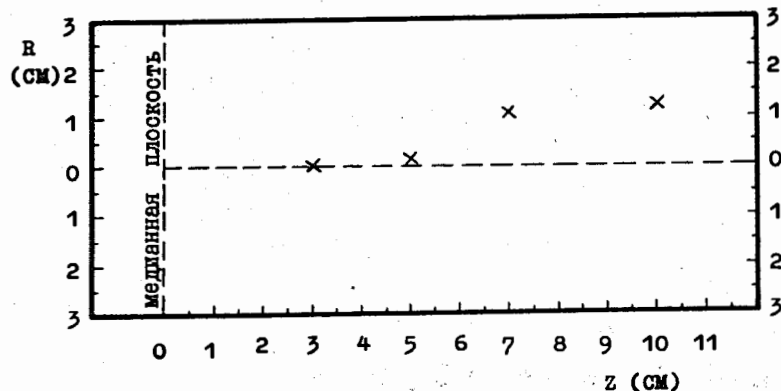


Рис. 12. Дрейф кольца по радиусу при ускорении.

Первые же опыты по выводу и ускорению кольца показали, что в момент снятия ямы кольцо дрейфует в направлении R . Положение центра кольца по отношению к оси соленоида на разных z показано на рис.12. Положение центра было измерено с помощью светочувствительной пленки (рис.13). Дополнительные эксперименты показали, что дрейф кольца обусловлен наличием $\sim 0,1\%$ первой гармоники в поле IV ступени. При снятии ямы кольцо проходит целый резонанс $\nu_z = 1$, а наличие гармоники и обуславливает дрейф. Мерн по уменьшению амплитуды первой гармоники привели к тому, что величина дрейфа составляет в настоящее время $\sim 1,5$ мм. Радиус электрон-

ного кольца в процессе ускорения изменялся от 3,7 см и 4,5 см, что дает основание полагать, что величина градиента близка к расчетной. Скорость электронного кольца в конце ускорения составляет $(0,45 \pm 0,05)$ с.

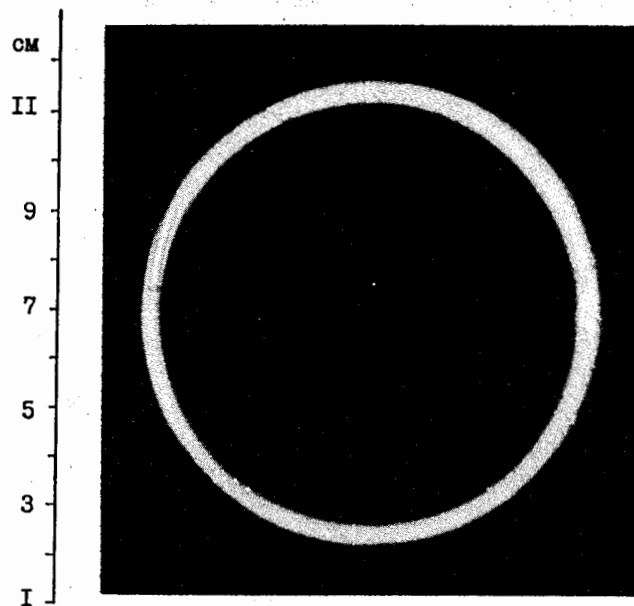


Рис. 13. Фотография ускоренного кольца электронов.

II. Исследование различных инжекционных систем

Увеличение числа захваченных частиц требует изучения процессов, происходящих во время инъекции, и поисков более оптимальных режимов работы инжекционных систем. В этом направлении на модели был проведен ряд экспериментов с инжекционными системами.

На адгезаторе модели инъекция производится в мягкофокусирующее магнитное поле, которое является суммой постоянного и переменного полей. Последнее мы называем быстрым полем, оно обеспечивает отвод электронов на первых оборотах от инфлектора. Мгновенная скорость ухода равновесной орбиты от инфлектора равна ^{15/}

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{r}{(1-n)B_z} \left(\frac{\partial B_z}{\partial t} - \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{B}_z}{\partial t} \right), \quad (1)$$

где B_z - величина аксиальной составляющей индукции суммарного магнитного поля, обеспечивающего движение электронов с азимутальным импульсом p по орбите радиуса r ($pr = -e\tau B_z$), n - показатель спада суммарного магнитного поля, \bar{B}_z - среднее магнитное поле на орбите. Из (1) ясно, что для сжатия кольца необходимо

$$\frac{\partial B_z}{\partial t} - \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{B}_z}{\partial t} > 0, \quad (2)$$

что приводит к ряду условий на быстрое поле.

В адгезаторе модели быстрое поле создается системой витков, запитываемых от одного генератора. В этом случае можно записать (2) в виде:

$$(G - G/2) \cdot \dot{j} > 0, \quad (3)$$

где $\dot{j} = dj/dt$, j - ток, протекающий в витках, G и \bar{G} - величины B_z и \bar{B}_z при токе в 1 А. Начальная точка инжекции r_{in} может быть выбрана в двух областях:

1. $G(r_{in}) > \bar{G}(r_{in})/2$, тогда для выполнения условия (3) необходимо, чтобы $\dot{j} > 0$;

2. $G(r_{in}) < \bar{G}(r_{in})/2$, тогда для выполнения условия (3) необходимо, чтобы $\dot{j} < 0$,

Каждое из перечисленных условий на \dot{j} может быть осуществлено в двух режимах: а) с включением тока; б) с выключением тока.

Исследования преследовали основную цель - понять суть ограничений по числу захваченных частиц, возникающих при инжекции в адгезаторе. По нашему мнению, большую роль в ограничениях играет так называемый "аномальный" захват. Особое внимание при исследованиях обращалось на возможность избежать "аномальный" захват при многооборотной инжекции.

Подробные результаты этих исследований будут изложены в специальном докладе. Общий результат - проведенные исследования различных систем инжекции показали, что они могут обеспечить достаточно эффективный захват как одного, так и нескольких оборотов инжектируемого тока. Геометрическое распределение постоянного и быстрого полей, скорость изменения тока в витках системы инжекции, соотношение поля на орбите и среднего поля определяют дина-

мику, эффективность захвата и могут быть рассчитаны с большой степенью точности в рамках одночастичной теории. Дальнейшее повышение эффективности работы инжекционной системы требует учета влияния коллективных эффектов на процесс захвата и удержания электронного пучка.

Ш. Исследования сверхпроводящей ускоряющей секции коллективного ускорителя

Общая схема секций представлена на рис. 14.

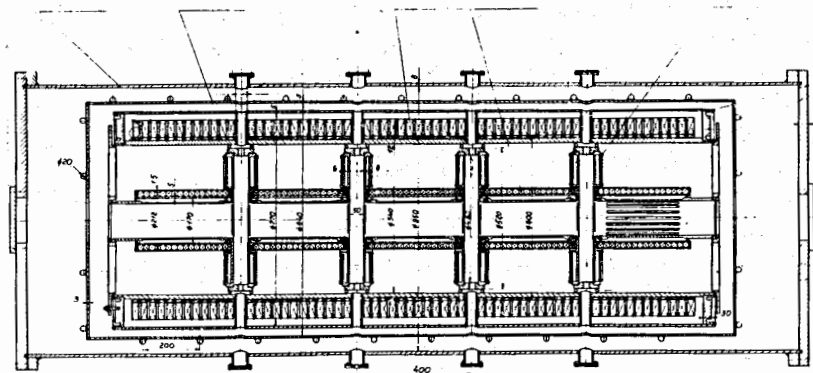


Рис. 14. Общая схема кольцетрона.

К настоящему времени в кольцетроне проведены исследования одного резонатора с индиевым стьком и сверхпроводящей пленкой толщиной ~ 2 мкм состава 65% Nb - 35% Ti. Помимо добротности Q , определялся "фактор увеличения добротности" F , равный отношению добротности сверхпроводящего резонатора Q_c к добротности аналогичного медного резонатора Q_m при комнатной температуре ($T = 300^\circ\text{K}$): $F = Q_c / Q_m$.

Измерения проводились при малом уровне ВЧ мощности. При отсутствии внешнего магнитного поля $F = 160$ ($Q_c = 2 \cdot 10^6$) при $T = 4,5^\circ\text{K}$. В поле $\sim 2T$ добротность падала в 5 раз.

В экспериментах на модельных резонаторах цилиндрического типа ($f = 1400$ МГц) без внешнего магнитного поля получена добротность $Q_c \sim 5 \cdot 10^7$ ($F = 5000$ при $T = 2^\circ\text{K}$ и $F = 1500$ при $T = 4,2^\circ\text{K}$).

В соленоид СПС-600 многократно вводился ток 2,5 кА со скоростью 2 А/с.

При установившемся токе 2 кА проводились магнитные измерения на радиусе $r = 3$ см в двенадцати точках по z . Отношение расчетной напряженности магнитного поля к экспериментальной во всех точках составляло 1,074. Такое же отношение было получено для ряда точек и при токе 2515 А. Причина расхождения экспериментальных и расчетных данных не была выяснена.

Плотность тока в обмотке при транспортном токе 2,75 кА достигает $j = 1,28 \cdot 10^4$ А/см², запасенная энергия - $1,35 \cdot 10^6$ Дж.

Проведена эвакуация запасенной в соленоиде энергии на активное сопротивление. При этом внутри соленоида был расположен лишь один резонатор, имеющий температуру 4,5°К. Наблюдается нагрев резонатора и небольшое испарение жидкого гелия. При эвакуации с начальным током 2,5 кА на $R = 0,2$ Ом температура резонатора достигала $T = 24^{\circ}\text{K}$ и испарялось $\sim 2,8$ нм³ гелия.

Один из градиентных модулей полностью собран и испытан в кольцепетроне. Получено среднее магнитное поле $\sim 2,0$ Т при последовательном питании катушек модуля и необходимая вариация поля при независимом питании 16 катушек токами в пределах ± 50 А.

Дальнейшие работы на кольцепетроне направлены на улучшение криогенных систем и испытание резонаторов при температуре $\sim 2^{\circ}\text{K}$.

Литература

1. Л.С.Барабаш и др. Препринт ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, (1974).
2. Г.В.Долбилов, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев. ЖТФ, 42, 1492 (1972).
3. В.С.Александров и др. Препринт ОИЯИ, Р9-8753, Дубна, (1975).
4. В.С.Александров и др. Препринт ОИЯИ, Р9-9215, Дубна, (1975).
5. И.Габанец и др. "Труды IУ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц". 1975, М., Наука, т.2, стр. 275.