

ЖСПЕРИМЕНТЫ ПО ЗАПУСКУ ПРОТОТИПА КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ ОИЯИ

В.П.Саранцев, В.С.Александров, Л.С.Барабаш, Л.Н.Беляев,
Г.В.Долбилов, В.И.Миронов, В.Г.Новиков, Э.А.Перельштейн,
Г.К.Радонов, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, В.П.Фартушный,
А.А.Фатеев, А.С.Щеулин

Объединенный институт ядерных исследований, г.Дубна

Коллективный ускоритель тяжелых ионов ОИЯИ использует традиционную схему ускорения ионов в электронном кольце, предложенную в работах В.И.Векслера и сотрудников. Прототип ускорителя состоит из двух основных элементов – инжектора электронного пучка и компрессора – системы формирования и ускорения электронных колец. Инжектором является линейный ускоритель СИЛУНД^{/1/}. Параметры электронного пучка, инжектируемого в камеру компрессора следующие: энергия электронов 2–2,4 МэВ; длительность импульса тока 20 нс; разброс электронов в импульсе тока 1–3%; диаметр пучка в точке инжекции 40 мм; эмиттанс пучка меньше 30 мрад·см, максимальный ток инжекции 600 А. Основные эксперименты проводились при токах инжекции 300 А.

Компрессор или адиабатический генератор заряженных тороидов (Адгезатор) состоит из вакуумной камеры, магнитной системы, систем инжекции и коррекции траектории пучка. Вакуумная камера Адгезатора представляет собой выполненную из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм сварную конструкцию со сферическими боковыми стенками, сближающимися к оси системы. Стенки камеры способны выполнять роль элементов, уменьшающих азимутальную составляющую электрического поля пучка при возможном развитии азимутальной неустойчивости. Это позволяет повысить предельный устойчивый ток кольца^{/2/}.

Ввод пучка на инжекционную орбиту ($R_i = 40$ см) осуществляется с помощью транспортирующей системы – совокупности фокусирующих устройств и элементов экранировки полей Адгезатора. На последнем участке транспортировки поле Адгезатора компенсируется

импульсным магнитным полем инфлектора — петли с током длительностью несколько сотен наносекунд. Рассеянные поля петли экранируются тонким металлическим экраном. Захват пучка на замкнутую орбиту ($R_0 = 35$ см) осуществляется с помощью корректирующего устройства, расположенного в узле когерентных бетатронных колебаний пучка. Корректор представляет собой полосковую линию, по которой распространяется ТЕМ волна. Амплитуда волны выбирается так, чтобы поля линии полностью гасили радиальный импульс частиц пучка. Быстрый срез импульса корректирующего устройства (≤ 1 нс) позволяет получать кольцо с малыми когерентными возмущениями, увеличивающими полуразмер сечения кольца на замкнутой орбите не более чем на 3 мм.

В прототипе ускорителя использован магнитный способ сжатия и ускорения сформированных колец. Магнитная система Аггезатора (рис. I) состоит из четырех пар катушек ступеней сжатия и выводного соленоида, питаемых импульсными токами. Существуют два основных режима работы магнитной системы: режим сжатия и режим вывода. В режиме сжатия Аггезатор работает как кольцевой ускоритель с мягкой фокусировкой с невыполненным бетатронным условием. Инжекция производится в области максимального значения импульса тока I ступени, имеющего длительность 11 мс. Длительность токов II, III и IV ступеней 1,2; 1,6; 1,7 мс соответственно. Включение соленоида в режиме сжатия не производится. Последовательность включения ступеней иллюстрируется рис. 2а, где представлена временная диаграмма токов в катушках. На рис. 2б представлено изменение во времени суммарного магнитного поля, ведущего электронное кольцо. Изменением положения обмоток, амплитуд токов в катушках и моментов включения ступеней можно получить большой набор n — траекторий пучка.

В режиме вывода шунтированием одной из катушек IV ступени и включением соленоида магнитная яма, удерживающая кольцо, смещается от медианной плоскости и выполаживается в направлении вывода. Электронное кольцо движется вместе с ямой и в момент полного снятия ямы начинает ускоряться в поле соленоида, линейно спадающем по оси z .

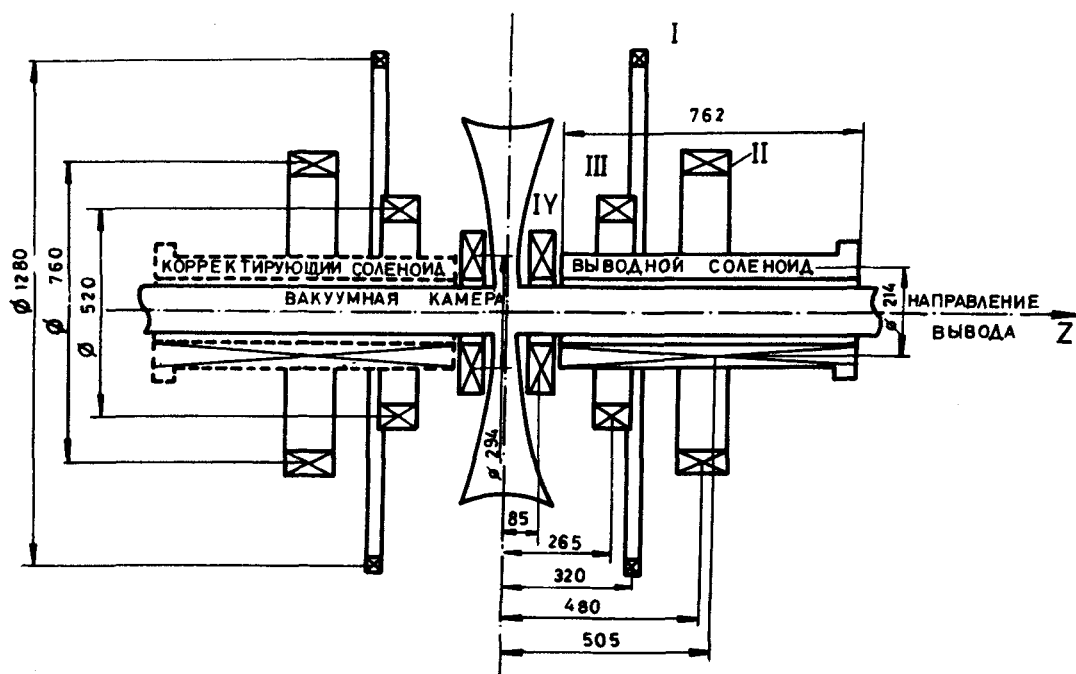


Рис. 1. Магнитная система Адгезатора.

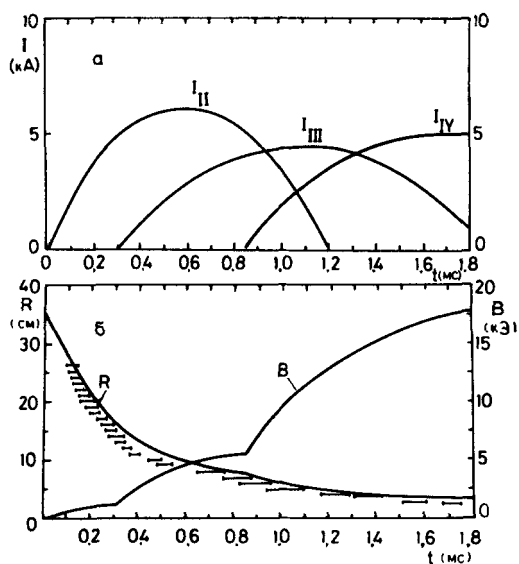


Рис. 2. а - Временная диаграмма токов в катушках ступенной сжатия.
б - Изменение ведущего поля и радиуса кольца во времени.

В экспериментах контролировались радиус кольца, поперечные размеры сечения, положение кольца и число частиц в кольце. При

формировании первого оборота пучка использовалась подвижная по азимуту система ламельных электродов, работающая на линии с ЭВМ типа М-6000. Для захвата пучка на замкнутую орбиту использовались ламельные датчики на азимутах 0° (360°), 135° и 185° , позволяющие измерять как полный заряд частиц, так и мгновенный ток пучка. Для изучения поведения кольца в процессе сжатия использовались перемещаемые по радиусу флажки. Анализировались как электрические сигналы с флажков, так и сигналы с фотоэлектронного умножителя от тормозного γ -излучения при высадке кольца на флажок. Диагностика кольца на малых радиусах ($R < 5$ см) производилась при помощи системы инфракрасных детекторов синхротронного излучения^{/3/}. Система состоит из зеркально-оптического тракта, пятидесяти n -InSb фоторезисторов с поперечными размерами 0,2 x 0,4 мм и электронной аппаратуры амплитудно-временной селекции, работающей на линии с ЭВМ типа М-6000. Информация, поступающая от детекторов, после обработки в ЭВМ представляется на цифрепечать или дисплей.

Эксперименты по захвату кольца на замкнутую орбиту показали, что эффективность захвата составляет 50-70%. Величина захваченного тока составляет 200-300 А ($I = 1,5 \cdot 10^{13}$ частиц). Время жизни сформированного кольца без существенных потерь сравнимо со временем работы I ступени, т.е. ~ 5 мс.

В первых экспериментах потери частиц из кольца были связаны с раскачкой пучка на азимутальной неоднородности магнитного поля в области инфлектора. В отдельных случаях потери в первые 30 мкс после инъекции превышали 80% от числа захваченных частиц. После замены медного экрана инфлектора на экран из нержавеющей стали эти потери не наблюдались.

При глубоком сжатии кольца появлялись потери электронов на временах 60-100 мкс, 160-200 мкс и 230-250 мкс после инъекции. Сравнение расчетной и реальной n -траекторий магнитных полей показывает, что кольцо при сжатии должно пересекать параметрический резонанс $2\psi_z = I$ ($n = 0,25$) и разностный резонанс $2\psi_z - \psi_z = 0$ ($n = 0,2$), с которыми связаны первые два импульса потерь. Третий импульс потерь связан с увеличением размера кольца на радиусе $R = 20$ см за счет сил изображения, имеющих в этом месте максимальный градиент^{/4/}. Измерения показали, что величина потерь не превышала 20% общего числа частиц. Однако, чтобы избежать увеличения аксиального размера сечения в параметрическом резонансе,

была проведена коррекция n - траектории сближением катушек I ступени и выбором времени включения и величины полей II-IV ступеней. Критерием оптимальности при этом служили отсутствие потерь электронов и минимальные размеры сечения кольца в конечном состоянии сжатия.

В результате устранения азимутальных неоднородностей магнитного поля и коррекции параметров магнитной системы удалось сформировать электронные кольца с минимальным радиусом 3 см и поперечными полуразмерами $a_z \approx a_r \approx 1,5-2$ мм. На рис. 2б точками представлена измеренная R - траектория кольца. Сплошная кривая - R - траектория, рассчитанная на ЭВМ. На рис.3 представлена фотография сечения кольца в видимом диапазоне синхротронного излучения на радиусе 4 см.

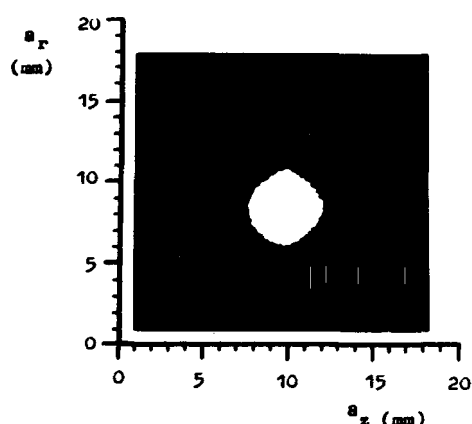


Рис.3. Сечение кольца в синхротронном свете ($R = 4$ см).

Установка выводного соленоида потребовала дополнительной коррекции полей из-за "эффектов затенения" области сжатия вихревыми токами, возникающими в обмотках выводного соленоида при включении II ступени. Для компенсации искажений симметрично относительно медианной плоскости, как показано на рис.1, был установлен корректирующий соленоид. Режим компенсации при этом выбирался изменением положения соленоида и величины сопротивления, шунтирующего обмотку корректирующего соленоида.

Позднее для устранения "эффектов тени" обмотки выводного соленоида были выполнены многожильным проводом с изолированными жилами, что позволило избавиться от паразитных искажений и обходиться без корректирующего соленоида. R - траектория, положение и поперечные размеры кольца после перехода к "бестеневому" соле-

ноиду существенно не изменились. После оптимизации режима вывода электронное кольцо было выведено в патрубок камеры Адгезатора. Измеренный полуразмер кольца в направлении на участке вывода $2\text{ см} \leq z \leq 6\text{ см}$ составил 4–5 мм.

При прохождении кольцом области снятия магнитной ямы на $5\text{ см} \leq z \leq 7\text{ см}$ обнаружилось радиальное смещение кольца как целого. Максимальное смещение составило 15 мм. Дополнительные эксперименты показали, что наличие 0,1% первой гармоники поля IV ступени, возникающей из-за набегания витков в намотке катушек при переходе от слоя к слою способно вызвать дрейф кольца при прохождении целого резонанса $\dot{\nu}_z = 1$ в области снятия ямы, где $\eta \rightarrow 0$. Меры по компенсации первой гармоники поля IV ступени (изменение взаимного азимутального расположения катушек ступени, внесение элементов коррекции поля) привели к тому, что величина смещения в отдельных режимах не превышала 1,5 мм. Однако при изменении режимов магнитной системы смещение появлялось вновь.

Как показывает анализ уравнений колебаний вблизи резонанса [5], максимальное смещение дрейфа кольца при наличии первой гармоники определяется выражением

$$x_{\max} = R \frac{H_{1z}}{H_z} \left(\frac{2\pi\omega_0}{\dot{\nu}_z} \right)^{1/2}$$

(R – радиус кольца; H_z – величина поля на орбите; H_{1z} – величина первой гармоники поля; ω_0 – частота вращения электрона; $\dot{\nu}$ – скорость прохождения резонанса), откуда следует возможность уменьшения смещения кольца при увеличении скорости прохождения резонанса. Для проверки этого предположения в область снятия магнитной ямы вводилась система дополнительных витков с радиусом меньшим, чем радиус электронного кольца, способная создавать дополнительную магнитную яму с увеличенной скоростью снятия. Как показали эксперименты, применение такой системы существенно снижает влияние резонанса и уменьшает смещение до 1–2 мм.

После устранения смещения электронное кольцо было выведено до конца участка ускорения. Радиус электронного кольца в процессе ускорения изменялся от 3,7 до 4,5 см. Это дает основание полагать, что величина градиента поля соленоида близка к расчетной (~ 70 Э/см). Скорость электронного кольца в конце участка ускорения составляет $(0,45 \pm 0,05)$ с.

Эксперименты по сжатию, выводу и ускорению электронного кольца производились при давлении остаточного газа в камере Адгезатора $3,5 \cdot 10^{-7}$ – $3,5 \cdot 10^{-6}$ тор, что по расчетам соответствует существ-

венной перекомпенсации электронного кольца ($N_i > N_e$). Расчетное значение вакуума для режима компенсации составляет $2 \cdot 10^{-7}$ тор. Для проверки этого предположения необходимо уменьшить плотность остаточного газа в камере Адгезатора, т.е. улучшить вакуум, что в настоящее время является технической проблемой и задачей номер один на прототипе коллективного ускорителя.

В процессе проведения экспериментов по ускорению электронных колец были предприняты попытки зарегистрировать ускоренные ионы азота по трекам, оставленным в пластиковых детекторах. Количество быстрых ионов (~ 30 МэВ) в кольце составляло величину, не превышающую 10^4 частиц, что говорит о случайном характере ускорения ионов.

Эти эксперименты показывают, что в отличие от работы, выполненной в Беркли, при наличии близких проводящих стенок разрушения электронного кольца от перекомпенсации не происходит. Вблизи компенсации вследствие падения кулоновских сил удержания ионы уходят из сечения кольца, образуя ионное облако. Устойчивость же самого электронного кольца полностью сохраняется.

В настоящее время на ускорителе ведутся эксперименты, позволяющие определить эффективность самофокусировки электронно-ионного кольца.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Н.И.Безнощенко и др. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, "Наука", 1975.
2. Л.С.Барабаш и др. ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
3. Т.В.Беспалова и др. I Всесоюзное совещание по автоматизации научных исследований в ядерной физике. Тезисы докладов. Киев, Институт ядерных исследований АН УССР, 1976.
4. В.С.Александров и др. ОИЯИ, Р9-9215, Дубна, 1975.
5. K.R.Symon. Symposium on ERA, LBL, Berkeley, California, UCRL - 18103, 1968, p.304.

Д И С К У С С И Я

П.Р.Зенкевич: Имеется ли какая-нибудь информация о продольном размере колец в конце ускорительной секции?

В.П.Саранцев: Мы смотрели длительность сброса кольца в отсутствие самофокусировки при разных скоростях вывода. При скорости вывода порядка 100 нс сброс получается менее 10 нс, что с учетом постоянных времени измерительной системы представляется нормальным, т.е. продольный размер мал.