

С34511

С-20

4962/2-46

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



13/хн-76

P9 - 10053

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

ПЕРВЫЙ ЭТАП НАЛАДКИ
ПРОТОТИПА КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
Часть I.

1976

Р9 - 10053

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

ПЕРВЫЙ ЭТАП НАЛАДКИ
ПРОТОТИПА КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
Часть I.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОТОТИПА "КУТИ"

И инжектором прототипа КУТИ является линейный индукционный ускоритель электронов СИЛУНД^{/1/}, параметры которого в описываемом этапе наладки КУТИ были следующими: максимальный ток ускоренных электронов - 700 А, энергия электронов $2 \div 2,4$ МэВ, длительность импульса тока составляла $5 \div 20$ 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/}. Энергетический разброс электронов в импульсе тока, инжектируемого на равновесную орбиту, мог быть достигнут $\sim 1-3\%$ и зависел от настройки ускоряющей системы инжектора. Эмиттанс пучка при $E \sim 2,4$ МэВ $< 30 \pi$ мрад·см. Анализатором энергетического разброса и эмиттанса служила магнитная система КУТИ.

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 делали сферической формы. Стенки камеры выполняют роль элементов, уменьшающих азимутальную составляющую электриче-

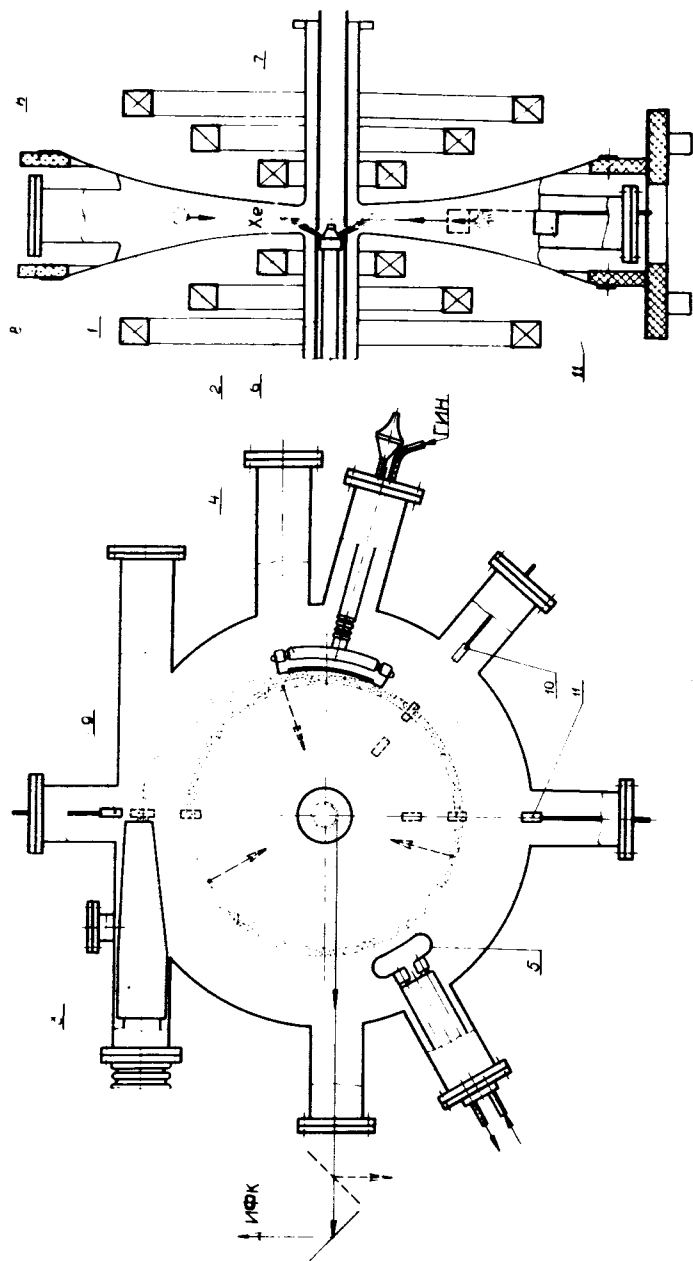


Рис. 1. Схема адгезатора КУТИ.

ского 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 и при его ускорении применялась 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 КУТИ 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 и 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 п-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 (рис. 2). Экранировка пучка от рассеянных полей магнитной системы адгезатора осуществлялась экраном (1). На последнем этапе транспортировки пучка поле адгезатора компенсировалось импульсным магнитным полем токовой петли (2). Длительность импульса тока петли - несколько сотен наносекунд. Рассеянные поля петли, в свою очередь, экранировались тонким металлическим экраном (3). Наличие активной петли инфлектора позволяет производить регулировку угла влета пучка и тем самым менять место пересечения его траектории с равновесной орбитой, радиус которой меньше радиуса инжекции. Необходимость этого обуславливается конечными допусками на установку корректора траектории пучка и возможными изменениями в некоторых пределах показателя спада магнитного поля n в процессе наладки.

Фокусировка пучка осуществлялась однородным магнитным полем фокусирующего соленоида (4). Линза (5) служила для подстройки положения кроссовера инжектируемого пучка на выходе инфлектора.

Для компенсации эффектов, связанных с погрешностями юстировки системы, служила отклоняющая линза (6), создающая поперечное, однородное по сечению пучка, магнитное поле, амплитуда и направление которого могли меняться. В месте расположения отклоняющей линзы магнитный экран отсутствовал.

Максимальный ток, который был инжектирован в камеру адгезатора, составлял около 600 А. Основные эксперименты были проведены при токах инжекции 200-300 А.

Корректор траектории пучка представляет собой полосковую линию, по которой распространяется поперечная ТЕМ-волна ^{1/1}. Один из электродов линии имеет продольный разрез (щель) для вывода сжимаю-

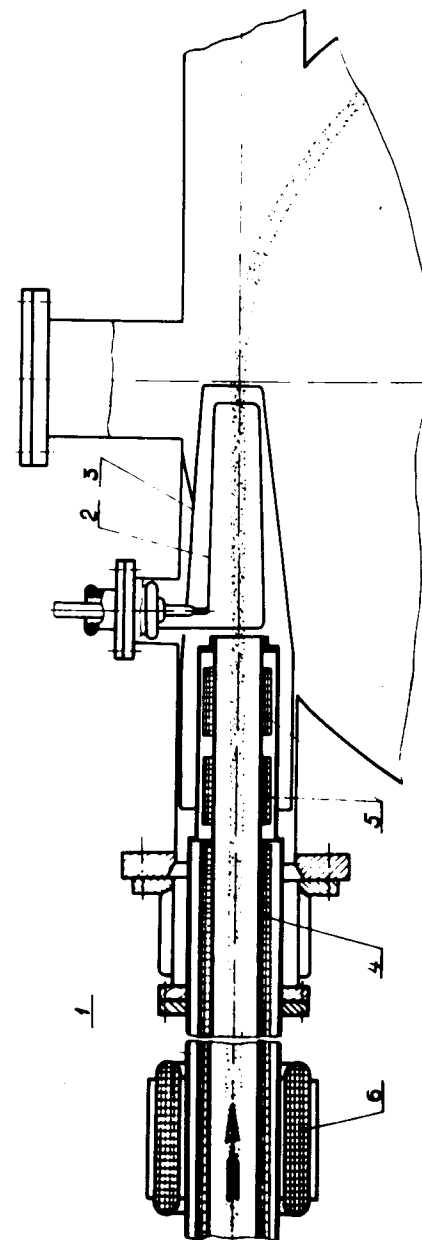


Рис. 2. Канал ввода электронного пучка в камеру адгезатора.

шегося кольца. Поперечное сечение линии изображено на рис. 3. 1,2 - электроды линии, 3 - стенки камеры адгезатора. Существуют две области с относительно однородным полем. Область I находится между электродами, образующими линию. Размеры этой области

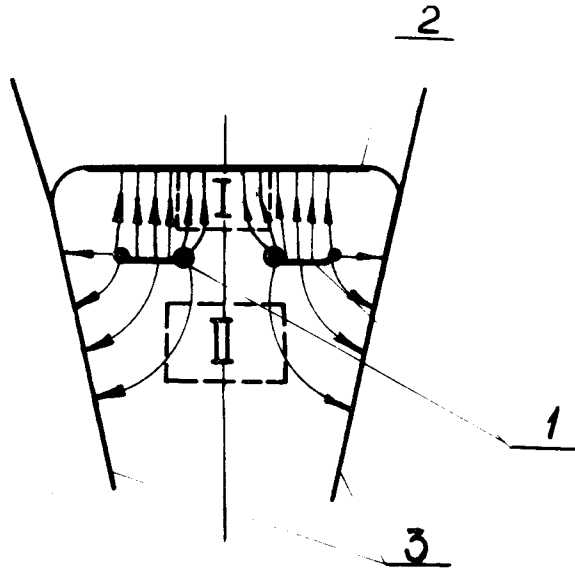


Рис. 3. Поперечное сечение полосковой линии корректора траектории пучка.

определяются конфигурацией электродов и в существующем варианте корректора, с учётом ограничения размеров линии стенками камеры, составляют $40 \times 40 \text{ мм}^2$ при неоднородности поля 10% и $25 \times 40 \text{ мм}^2$ при 3% неоднородности. При разработке корректора предполагалось использовать в качестве основной область I. Эксперименты по захвату электронного пучка показали, что для осуществления коррекции пучка вполне пригодна внешняя область II, конфигурация полей в которой определяется геометрией

электродов (1) линии и стенок камеры (3). Поскольку эта область более широкая, что упрощает настройку режима захвата, все последние эксперименты проведены при работе в ней.

Полосковая линия корректора является промежуточным элементом фидера, соединяющего импульсный генератор с согласованной нагрузкой. Импульсный генератор выполнен на базе нелинейных ферритовых линий. Амплитуда напряжения ТЕМ-волны - до 70 кВ, длительность импульса - около 100 нс.

К форме импульса напряжения генератора корректора предъявляются 2 основных требования: 1) длительность спада импульса должна быть значительно меньше времени одного оборота частиц на равновесной орбите, равного 7-8 нс; 2) амплитуды послеимпульсов не должны превышать 10% амплитуды основного импульса.

Существующий вариант импульсного генератора позволяет формировать срез импульса ≤ 1 нс. Но получение $\tau_{\text{ср}} \leq 1$ нс связано с довольно тщательной настройкой режима генератора, которая повседневно не производилась, и поэтому корректор обычно работал при $\tau_{\text{ср}} \approx 1,5 - 2$ нс. Соотношение амплитуд послеимпульсов и основного импульса $\leq 0,1$.

В режиме однооборотного захвата, в котором были проведены работы первого этапа наладки прототипа КУТИ, корректор траектории пучка располагался на азимуте $\theta = \frac{\pi}{2\nu_r}$ и имел протяженность $\pm 30^\circ$. В этом режиме усредненный по частицам пучка импульс $\langle m\dot{\gamma} \rangle$ полностью гасился полями корректора и пучок, инжектированный на орбиту радиуса (40 см), большего, чем радиус равновесной орбиты (35 см), продолжал свое движение без когерентных колебаний по равновесной орбите. При этом, если выполнено условие $\frac{\lambda n_E}{n_B} \ll 1$, где n_B - показатель спада магнитного поля адгезатора, n_E - показатель спада полей корректора,

$$\lambda = \frac{eE_0R}{m_0 \gamma c^2 \beta^2} \ll 1,$$

$E_0 = E(1 + \beta)$ – эффективная напряженность поля корректора, β – отнесенная к скорости света скорость частиц, то возмущения огибающей пучка незначительны.

Начальная скорость пучка, пошедшая на второй оборот, снова отклоняется корректором и в дальнейшем будет потеряна. Моменту времени, когда ток пучка на невозмущенной орбите достигает максимального значения, соответствует быстрый спад полей ТЕМ-волны линии корректора, способствующий формированию тока на невозмущенной равновесной орбите. Оставшаяся часть пучка совершает колебания с начальной амплитудой и теряется на инфлекторе.

При соответствующей форме импульса волны корректора возможен захват двух и более оборотов, но при этом возрастает амплитуда бетатронных колебаний захваченных частиц, поскольку при таком варианте корректора не удастся одновременно полностью погасить когерентные колебания в каждом из захваченных оборотов.

Устройство сброса пучка представляет собой токовую петлю, создающую локальную неоднородность магнитного поля, которая приводит к отклонению пучка и потере захваченных частиц на измерительных устройствах или инфлекторе. Устройство позволяет производить сброс пучка в любой момент от начала существования пучка на равновесной орбите до нескольких миллисекунд в режиме работы с I ступенью магнитного поля и до ~30 мкс в режиме сжатия со II ступенью, когда электронное кольцо еще не вышло из области действия поля петли сброса.

Диагностическая аппаратура. В экспериментах по сжатию электронного кольца, завершающих первый этап наладки КУТИ, настройка исходной и скорректированной траекторий осуществлялась посредством системы ламелей (9,10,11), (рис. 1), позволяющей

иметь информацию о положении центра тяжести и размерах пучка на азимутах 0° , 135° , 185° , 360° . Имелась возможность измерять как заряд частиц, высадившихся на каждый из электродов за время импульса, так и мгновенный ток пучка. Ламели дистанционно могли быть установлены на исходную (без коррекции) или скорректированную траекторию, либо выведены из зоны пучка.

Потери пучка при формировании и сжатии кольца регистрировались γ -датчиками по вспышкам жесткого рентгеновского излучения. Этими 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.

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

На промежуточных этапах по изучению первого оборота, режима захвата, первоначальных экспериментов по сжатию использовались круговые ламели (1), пояс Роговского (2) (рис. 4), различные системы типа "Флажок". Системы "Флажок" служили главным образом для измерения равновесного радиуса сжимающегося кольца и его малого размера по времени разрушения пучка электродом системы. При этом регистрировались импульсы γ -излучения, тока или заряда на "Флажок".

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ПЕРВОМ ОБОРОТЕ

Схема установки для изучения параметров пучка на 1 обороте приведена на рис. 4. Основными измерительными инструментами в этих экспериментах служили круговые ламели ^{5/}(1) и трансформатор тока (пояс Роговского) (2).

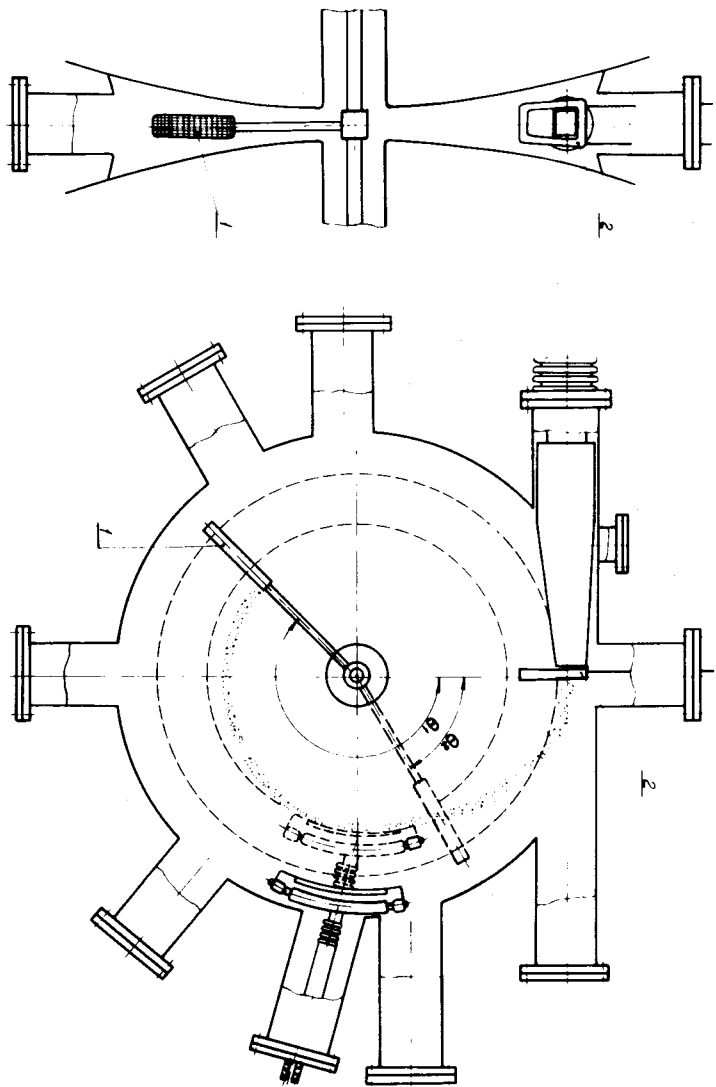


Рис. 4. Схема установки для изучения поведения электронного пучка на первых ободах рогах.

Поясом Роговского регистрировались форма и амплитуда инжектируемого тока. Чувствительность пояса - $0,14 \text{ В/А}$, постоянная времени интегрирования $\tau = 9 \text{ мкс}$, переходная характеристика - 5 нс .

Круговые ламели по команде с пульта управления могли быть установлены на любом из азимутов $\theta = 4^\circ \div 300^\circ$. Ламельная система имела 9 Z-ламелей с периодом структуры 6 мм, 32 R-ламели с периодом 4 мм и один электрод-монитор, расположенный за ламелями по ходу пучка. Электроды-ламели и монитор давали информацию о распределении плотности частиц по сечению, о положении центра тяжести пучка и полном числе частиц. Сигналы с ламелей и монитора, пропорциональные числу частиц, высаживающихся за время полной длительности импульса тока, обрабатывались ЭВМ М-6000. Обработанная информация в форме гистограмм, таблиц, графиков и т.п. поступала на дисплей или печатающее устройство. Для примера на рис. 5 приведено несколько вариантов применяемых при настройке оперативных видов обработанной информации.

Рис. 5а - график распределения сигналов по ламелям (1,2,3...32 - номер ламелей).

Рис. 5б - таблица распределения сигналов по ламелям и суммарное число частиц на R и Z-ламелях и мониторе в единицах 10^{10} . Пучок с числом частиц $3 \cdot 10^{13}$ имеет полуразмер $\sim 2 \text{ см}$.

Рис. 5в - таблицы положения центра тяжести пучка (R, Z), полуразмеры пучка (SR, SZ), число электронов в единицах 10^{13} (ELT), дисперсии центра тяжести (DR) и радиального размера (DSR), дисперсии числа частиц (DEL), величины среднего за цикл измерений магнитного поля (HEC) на различных азимутах в камере адгезатора для пучка с $N_e = 0,4 \cdot 10^{13}$. Все линейные размеры даны в сантиметрах.

Рис. 5г - параметры пучка R, Z, SR, SZ, ELT, HEC, DR, DSR и гистограмма центра тяжести пучка на азимуте 290° .

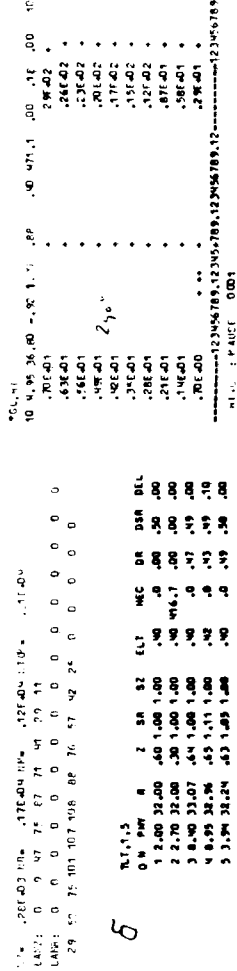
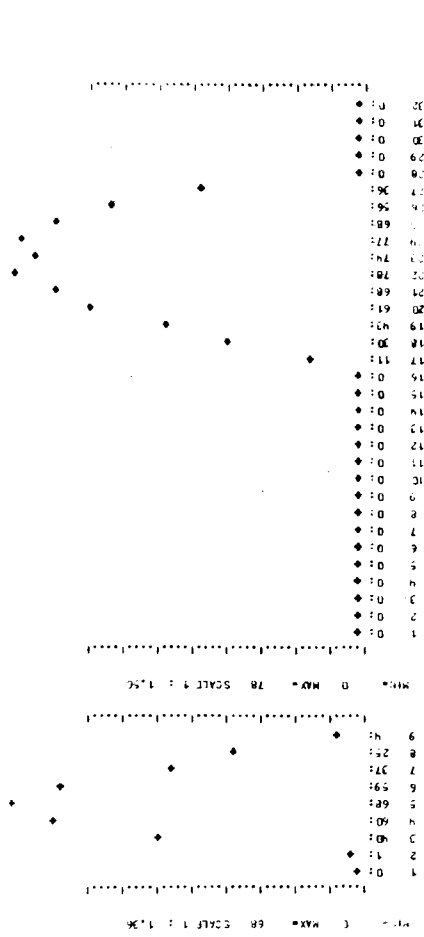


Рис.5. Образцы выдачи информации с ЭВМ М-6000 о поведении пучка на 1 обороте по данным круговых ламелей.

2

6

Вся информация с ламелей может быть записана на магнитную ленту с целью последующей обработки и получения нужной информации о пучке.

На рис. 6 приведены распределения плотности частиц в пучке, усредненные по Z для R-распределения и по R для Z-распределения, в одном из экспериментов. При правильной настройке ускоряющей системы инжектора СИЛУНД полуразмеры пучка не превышают 2 см. Пучок имеет сравнительно резко очерченные границы, и основная интенсивность заключена на уровне 0,5 распределения этой интенсивности.

При изучении скорректированной траектории пучка линия корректора устанавливалась в рабочее положение, диапазон изменения азимута ламельной системы был ограничен 140-300°. На рис. 7 приведены зависимости R-полуразмеров пучка (a_r) на азимутах 140-300° для исходной (не скорректированной) и скорректированной траектории в одном и том же эксперименте. Зависимости построены по результатам обработки информации ЭВМ М-6000. Увеличение полуразмера пучка под действием полей корректора не превышает 0,4 см.

Помимо информации, получаемой с ЭВМ, имелась возможность производить визуальное наблюдение распределения заряда по ламелям на экране осциллографа с памятью.

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО КОЛЬЦА

Первые эксперименты по захвату пучка были проведены при той же схеме установки, что и эксперименты на 1 обороте (рис. 4). Ламельная система на азимуте 300° могла быть дистанционно развернута и прижата к стенке камеры, освобождая путь циркулирующему на равновесной орбите току. Трансформатор тока (2) имел окно, позволяющее одновременно измерять ток инжектируемого и захваченного пучков. Осциллограммы сигналов пояса, иллюстрирующие работу системы захвата, приведены на рис. 8. Осциллограммы соответствуют эксперименту с длительностью инжекти-

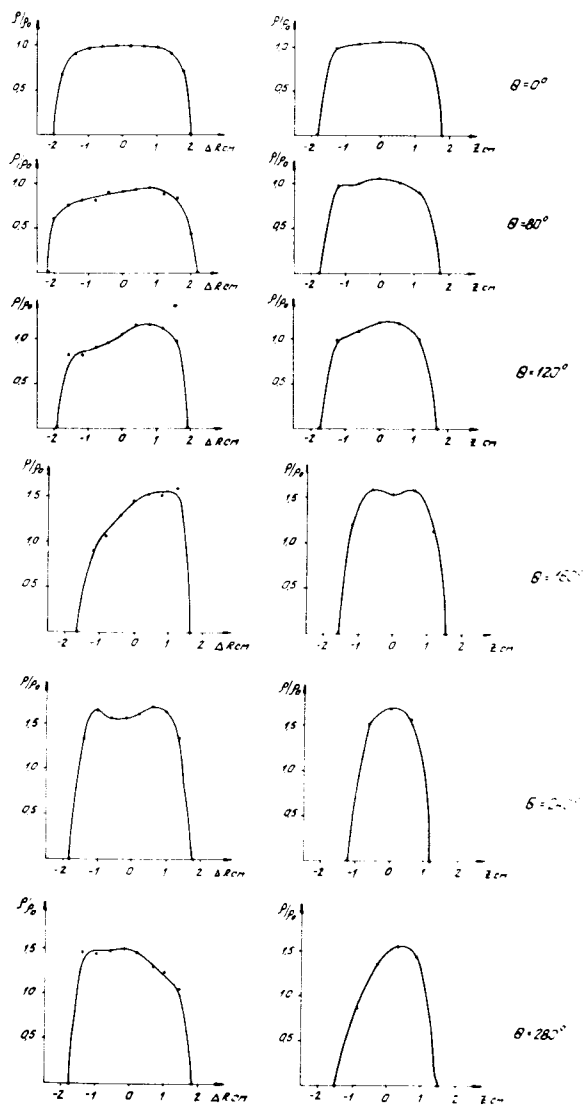


Рис. 6. Зависимость распределения плотности частиц в пучке от азимутального угла.

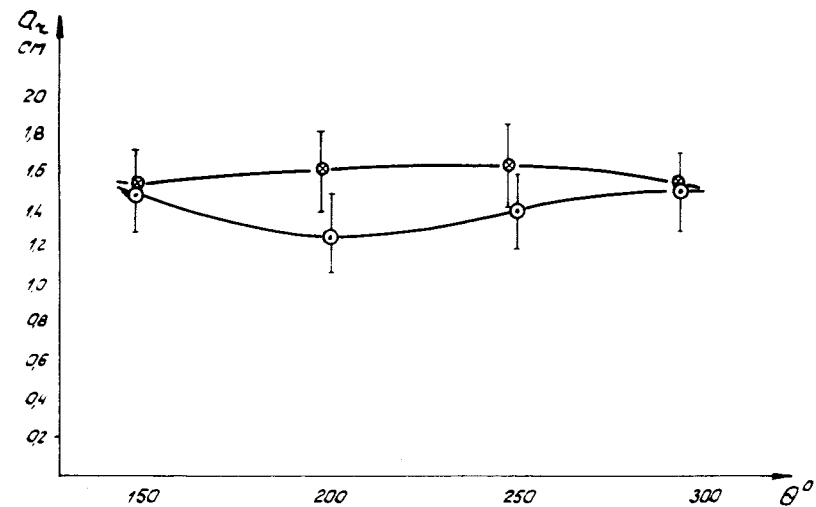


Рис. 7. Огибающие пучка на 1 обороте для нескорректированной и скорректированной траекторий.

руемого тока на уровне 0,5 амплитуды 5–7 нс. Верхняя осциллограмма снята при отключенном корректоре траектории пучка. Сигнал с пояса пропорционален току первого оборота и части тока, пошедшего на 2 и 3 оборота. Две другие осциллограммы характеризуют пучок при включенном корректуре. Уменьшение амплитуды захваченного тока с уменьшением времени обусловлено искажением поля на орбите ферритовым сердечником и медным экраном пояса. Пучок захваченных электронов в этом эксперименте был неоднородным по азимуту. Период модуляции пучка соответствовал времени одного оборота ~ 8 нс. Эффективность захвата по току в циркулирующем пучке оценивается в 50–70%.

Схема описываемого эксперимента не позволяла определить время жизни кольца в реальных условиях и приступить к опытам по сжатию электронного сгустка, требующих снятия пояса Роговского и системы круговых ламелей. Однако она предоставляла возмож-

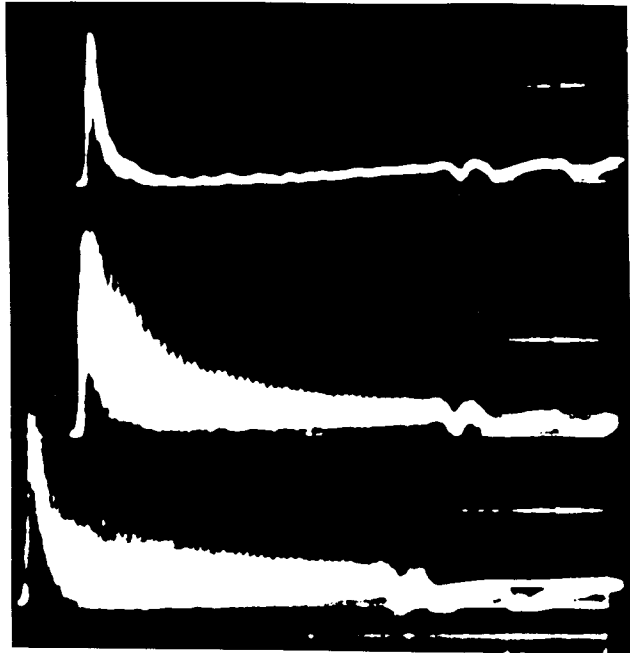


Рис. 8. Сигнал пояса Роговского. Верхний луч - корректор отключен; два нижних луча - корректор включен. Развертка - 100 нс/дел.

ность для калибровки датчиков γ -излучения на базе ФЭУ, сигнал с которых пропорционален току потерь частиц при сбросе кольца.

Последующие эксперименты по изучению режимов захвата проводились в установке, собранной по схеме, соответствующей рис. 1 и отличающейся только тем, что центральная труба (2) отсутствовала.

Интенсивность захваченного пучка контролировалась фотоэлектронными умножителями по вспышкам γ -излучения при сбросе пучка на инфлектор или ламели (10,11).

$$\text{Число захваченных частиц } N = N_0 \frac{\int A(t) dt}{\int A_0(t) dt}; A(t) -$$

сигнал γ -датчика, N_0 и A_0 - число частиц и сигнал γ -датчика при калибровке.

Дополнительно применялся метод определения числа захваченных частиц, основанный на измерении при "подрезании" захваченного пучка ламельной системой (10 или 11) с одновременным измерением относительного уменьшения интенсивности γ -излучения при различных уровнях "подрезания".

Доля частиц, не участвующих в захвате, но высаживаемых на ламельную систему, могла быть определена путем измерений заряда при различных задержках импульса корректора относительно импульса тока. Поскольку частицы, не возмущенные корректором (проходящие корректор после спада его полей), практически не высаживались на ламели (10), установленные в положение "подрезания", процесс измерения заметно упростился.

Измерения числа захваченных частиц указанными методами давали близкие результаты. На этапе наладки, предшествующем экспериментам по сжатию кольца, число захваченных частиц было доведено до $(0,7 \div 1,1) \cdot 10^{13}$.

Радиальный размер захваченного пучка определялся по длительности импульсов γ -излучения при разрушении кольца вследствие адиабатического разжатия в спадающем поле I ступени и высадке пучка на электрод (ламели, "флажок"), установленный на радиусе, меньшем радиуса равновесной орбиты, при сжатии кольца полем II ступени. Имелась возможность применить для измерения размеров метод "подрезания" ламельной системой. Радиальный полуразмер захваченного пучка, как правило, не превышал $(2 \div 2,5)$ см.

Зависимость интенсивности сформированного кольца от времени измерялась по вспышкам γ -излучения при сбросе пучка в различные моменты времени. В медленно меняющемся поле I ступени время жизни кольца находилось в соответствии с временем его адиабатического разжатия.

С целью определения предельного времени жизни кольца амплитуда тока I ступени была увеличена вдвое, а инжекция пучка производилась в нарастающей части

импульса тока ступени на уровне 1/2 его амплитуды, так что в момент инъекции магнитное поле на равновесной орбите удовлетворяло соотношению $PC = 300 HR$. Кольцо существовало без заметной потери интенсивности ~5 мс.

Этот эксперимент, помимо определения времени жизни сгустка, интересен еще тем, что указывает на возможность предварительного сжатия кольца в поле I ступени, увеличения энергии частиц и осуществления перехвата полем II -ступени на радиусах, почти в 1,5 раза меньших радиуса равновесной орбиты при инъекции.

Для изучения влияния переходных процессов в различных устройствах адгезатора (инжекционные устройства, элементы диагностики, вакуумная камера и т.п.), возникающих при включении поля II ступени, на время жизни кольца на равновесной орбите были проведены измерения амплитуды рентгеновского излучения в зависимости от времени сброса пучка. На рис. 9 приведена одна из таких зависимостей. Уменьшение амплитуды γ -сигналов в районе 30 мкс обусловлено выходом сжимающегося кольца из зоны действия устройства сброса, о чем свидетельствует появление вспышки γ -излучения в гораздо более поздний момент - момент изменения полярности тока I ступени, соответствующий разрушению уже разжимающегося кольца на больших радиусах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты по формированию электронных колец подтверждают пригодность выбранного варианта инжектора СИЛУНД с плазменным источником электронов и системы захвата электронного пучка для коллективного ускорителя. Полуразмер инжектированного электронного пучка на первом обороте не превышает 2 см.

Однооборотная система захвата позволяет формировать электронные кольца с током 200 A ($N_e \approx 10^{13}$).

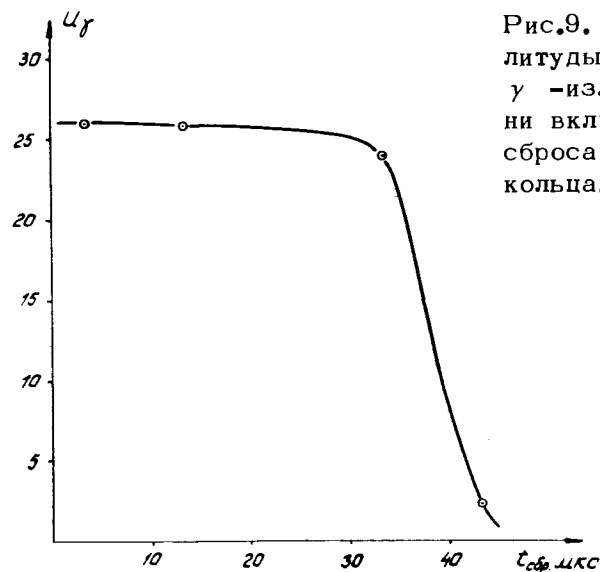


Рис.9. Зависимость амплитуды сигнала датчика γ -излучения от времени включения устройства сброса электронного кольца.

При этом малый полуразмер сформированных колец не превышает 2,5 см.

Можно надеяться, что при выбранном коэффициенте сжатия колец $k \approx 9$ удастся получить сжатые кольца с малым полуразмером ≤ 3 мм.

Результаты экспериментов по сжатию колец будут приведены во II части работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.С.Барабаш и др. ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
2. Г.В.Долбилов и др. Тезисы II Симпозиума по сильноточной электронике, Томск, 1975.
3. Л.С.Барабаш и др. ОИЯИ, Р9-8759, Дубна, 1975.
4. Ю.И.Алексахин и др. ОИЯИ, Р9-7786, Дубна, 1974.
5. Т.В.Беспалова и др. Труды VIII Международного симпозиума по ядерной электронике. ОИЯИ, Д13-9287, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 августа 1976 г.