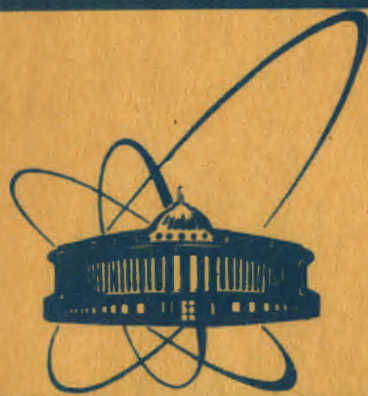


e +



сообщения
Объединенного
Института
Ядерных
Исследований
Дубна

1963/83

18/4-83

P9-83-13

В.М.Жабицкий, И.Н.Иванов, А.К.Каминский,
А.П.Сергеев

СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ
МОДЕЛИ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ

1983

ВВЕДЕНИЕ

При инжекции электронных пучков с током 100 А в адгезатор для получения колец с числом электронов $N_e \sim 10^{13}$ необходимо осуществить захват электронов инжектируемого пучка на нескольких оборотах.

Электронный пучок инжектируется в мягкофокусирующее поле, представляющее собой суперпозицию двух полей: постоянного и быстроменяющегося во времени /быстрого/, последнее обеспечивает изменение положения равновесной орбиты для нескольких оборотов. Скорость изменения равновесной орбиты равна ^{1/}

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

Для сжатия кольца необходимо выполнение следующего условия:

$$D = \frac{\partial B_z}{\partial t} - \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{B}_z}{\partial t} > 0 . \quad /2/$$

/2/ можно записать также в виде

$$D = (G - \frac{1}{2} \bar{G}) \dot{I} > 0 ,$$

I - ток, протекающий в витках инжекционной системы, G - геометрический фактор.

Начальная точка инжекции r_{in} может быть выбрана в двух областях:

$$1/ \quad G(r_{in}) > \frac{1}{2} \bar{G}(r_{in}) \quad \text{для } D > 0, \quad \dot{I} > 0$$

/включение тока/;

$$2/ \quad G(r_{in}) < \frac{1}{2} \bar{G}(r_{in}) \quad \text{для } D > 0, \quad \dot{I} < 0$$

/выключение тока/.

Настоящая работа посвящена инжекционной системе модели коллективного ускорителя с выключением тока. В нее входят: устройство для создания постоянного магнитного поля и ввода пучка в камеру, система измерения пучка на первом обороте, генератор тока и магнитная система, создающая переменное /быстрое/ поле. В работе приводятся параметры датчиков захваченного тока и результа-

ты измерений. Основные параметры системы: величина постоянного поля $H_0 = 160 \div 170$ Э, амплитуда переменного магнитного поля на радиусе инжекции $r_{in} = 400$ мм, $H_0 = 13 \div 15$ Э, время выключения или спада тока $t_{сп} = 100$ нс, суммарный импульсный ток в витках инжекции $I = 6$ кА, число оборотов захваченного пучка $n = 2+3^{1/2}$.

1. ПОСТОЯННОЕ ПОЛЕ И УСТРОЙСТВО ВВОДА

Постоянное поле создается двумя многовитковыми катушками /рис.1/, расположенными вне вакуумного объема. Катушки запитаны постоянным током $I_0 = 250$ А от стабилизированного источника тока. Величина магнитного поля в области инжекции $160 \div 175$ Э, показатель спада на $R = 400$ мм $n = 0,4$.

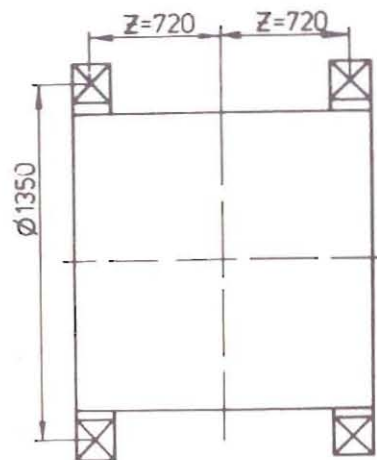


Рис.1

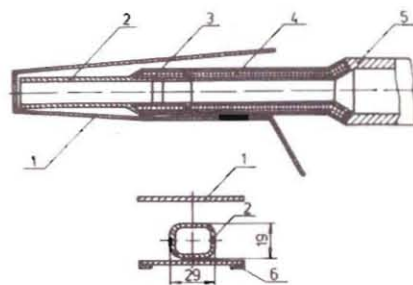


Рис.2

Устройство ввода пучка на $R = 400$ мм /рис.2/ состоит из магнитного канала /2/, экранирующего электроны от действия постоянного магнитного поля; для улучшения токопрохождения внутри канала установлены соленоид /4/ и фокусирующая линза /3/.

Устройство ввода вносит основные азимутальные искажения в области радиусов 380-350 мм. Степень искажения ~12%, что существенно сказывается на устойчивости захваченного тока. Для компенсации искажения в области инжектора создается дополнительное магнитное поле, которое заполняет "провал" поля под магнитным экраном. Компенсирующая петля /1/ запитывается низкочастотным импульсом тока $I = 300$ А. Геометрические размеры петли, ее положение относительно магнитного экрана и амплитуда тока в результате измерений выбраны так, что искажения магнитного поля в области ввода составили не более 1%. Для улучшения однородности поля в аксиальном направлении было произведено шиммирование поля полосками пермаллоя /6/ на краях компенсирующей пластины.

2. СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ

А. Магнитная система инжекции

Геометрическое расположение витков системы показано на рис.3, она состоит из двух пар одновитковых катушек 1,1' и 2,2' и разделительных сеточных экранов 3,3', которые экранируют основную частоту поля инжекции примерно на 80%, значительно уменьшая взаимодействие последней с многовитковыми катушками компрессии. Координаты витков и экранов: $R_1 = R_1' = 335$ мм, $R_2 = R_2' = 305$ мм, $z_1 = z_1' = 75$ мм, $z_2 = z_2' = 70$ мм, $z_3 = z_3' = 100$ мм, максимальный радиус экрана $R_{ср} = 540$ мм. Пары витков 1,2 и 1',2' с экранами 3 и 3' выполнены как единая конструкция. Сеточный экран запрессован со стеклотентой и эпоксидной смолой между двумя стеклянными дисками. К одной из сторон через прокладки из стеклотекстолита приклеены витки. Склеивка осуществлялась в форме, что обеспечило достаточную точность ± 1 мм/ изготовления. Витки запитываются током через отверстия в экранах.

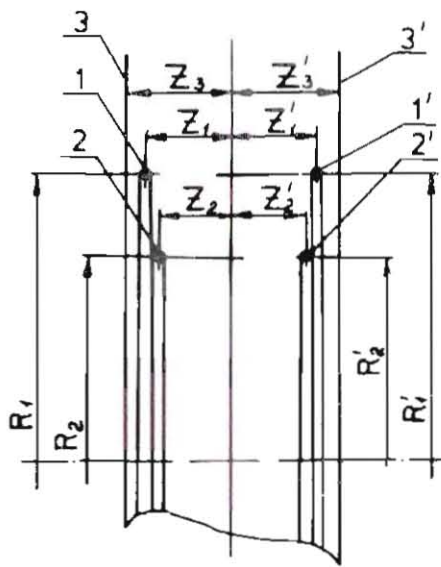


Рис.3

Б. Генератор импульсного тока

Витки инжекционной системы попарно 1,2 и 1',2' запитываются от импульсного генератора тока /ГИТ/, обеспечивающего в индуктивной нагрузке $L_H = 1,5$ мкГн, прямоугольный импульс тока с амплитудой $I = 6$ кА и фронтом порядка 100 нс. Схема ГИТ изображена на рис.4, она состоит из искусственной двойной формирующей линии /ДФЛ/ и импульсного трансформатора /ИТ/ Льюиса на длинных линиях с волновым сопротивлением передающей линии /ПЛ/ $R_{пл} = 25$ Ом и коэффициентом трансформации $n = 2$. ДФЛ выполнена на конденсаторах К15-10, волновое сопротивление $Z_{р дфл} = 12,5$ Ом, зарядное напряжение $U_3 = 50$ кВ; ДФЛ коммутируется тиратроном ТГИ1-2500/50. Передающие линии ИТ состоят из двух кабелей с $\rho_k = 50$ Ом длиной $l = 60$ м, соединенных параллельно и свитых в виде многовитковых катушек.

ДФЛ обеспечивает на входном импедансе ИТ $\rho_1 = 12,5$ Ом импульс напряжения $U_1 = 50$ кВ, на выходном импедансе ИТ $\rho_2 = 50$ Ом за счет

трансформации имеем импульс $U_2=100$ кВ. Токи в витках определяются сопротивлениями R_1, R_1' и R_2, R_2' .

В общей цепи стоит также нелинейное сопротивление, которое гасит отражения от индуктивной нагрузки. Импульс тока, измеренный индукционным датчиком, показан на рис.4 внизу.

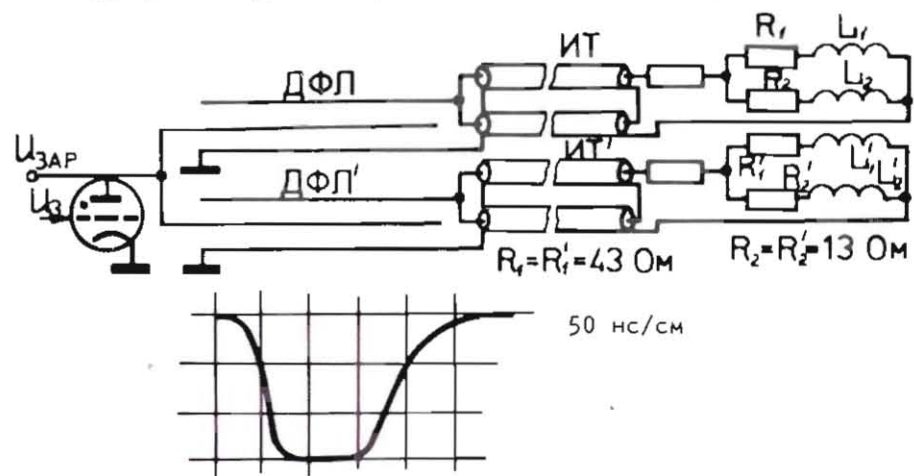


Рис.4

В. Распределение и амплитуда импульсного поля

Импульсное поле системы инжекции измерялось индуктивной катушкой. Интегрирование сигнала осуществлялось RC-интегратором, расположенным вблизи осциллографа С1-65 / $t_{и} = RC = 1$ мкс /⁴. Полученное распределение импульсного поля по радиусу в медианной плоскости сравнивалось с расчетным /¹. Коррекция распределения производилась подбором сопротивлений R_1, R_2, R_1', R_2' . Измеренное распределение показано на рис.5. Была произведена калибровка измерительной катушки стандартным полем и получена связь сигнала с датчика в мВ с величиной поля в эрстедах /³:

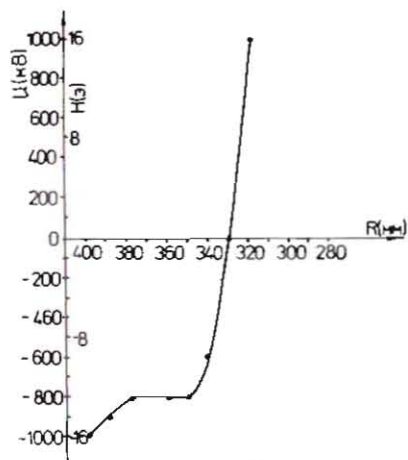


Рис.5

$$H/\text{Э} = /1,77 \pm 0,3/ \cdot 10^{-2} U/\text{мВ} / /3/$$

В результате измерений сформировано поле, распределение которого по радиусу $H(R)$ совпадает с расчетным, получена амплитуда поля на $r_{ин} = 400$ мм $H_0 = 12 \pm 16$ Э с временем спада $t_{сп} \sim 100$ нс.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Качество формируемых электронных колец зависит от параметров инжектируемого пучка.

Амплитуда и длительность инжектируемого пучка измеряется на выходе из устройства ввода цилиндром Фарадея /ЦФ/, они имеют значения, в зависимости от настройки ускорителя, $I_{и} = 75 \pm 100$ А, $T_{и} = 200 \pm 250$ нс. Из полученного пучка специальной системой "вырезания" /⁵/ формируется пучок длительностью $t_{и} = 30 \pm 50$ нс, соответствующей 3-5 оборотам пучка на радиусе инжекции $r_{ин} = 400$ мм. Максимальная величина захваченного тока определяется из соотношения

$$I_{зах.} = \frac{I_{и} t_{и}}{T_{об.}} = \frac{Q_{ин}}{T_{об.}},$$

I - амплитуда инжектируемого пучка; $t_{и}$ - длительность инжектируемого пучка; $T_{об.}$ - время одного оборота; $Q_{ин}$ - полный инжектируемый заряд.

А. Динамика пучка в постоянном поле

Как указывалось выше, пучок инжектируется в мягкофокусирующее поле с $d = 0,4$ на $r_{ин} = 400$ мм. Пучок на 1-м обороте должен проходить по орбите с минимальными отклонениями от R и z , поскольку отклонения влияют на режим инжекции.

Для непрерывного и бесконтактного контроля отклонений ΔR и Δz пучка от орбиты $r_{ин} = 400$ мм и медианной плоскости была изготовлена и внедрена система из магнитоиндукционных датчиков. Положение датчиков на азимуте и их назначение приведены в таблице.

Таблица

	0°	110°	220°
Контрольные параметры	$I, \Delta R, \Delta z$	ΔR	$\Delta R, \Delta z$

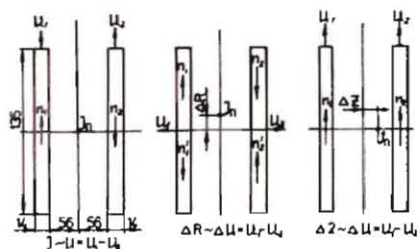


Рис. 6

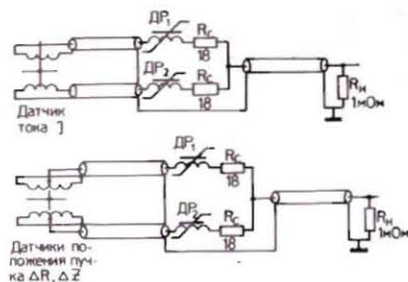


Рис. 7

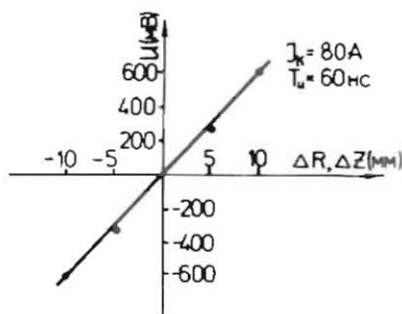


Рис. 8

Конструктивно каждый датчик состоит из двух элементов, расположенных симметрично относительно медианной плоскости /рис. 6/. Каждая часть представляет собой индуктивную катушку, намотанную с шагом 3 мм на каркас из стеклотекстолита сечением 4x14 мм². Для устранения помех датчик заключен в электростатический экран. Электрические схемы включения датчиков и калибровочная зависимость показаны на рис. 7, 8. Чтобы исключить влияние датчиков друг на друга при совместной работе, суммирование сигналов происходит через высокочастотные дроссели Др₁, Др₂. Суммирование происходит в специальном блоке, установленном около камеры адгезатора; и далее от блока до пульта сигнал идет по одиночному кабелю и регистрируется осциллографом С1-65. Сигнал с датчика тока интегрируется пассивным RC-интегратором, τ_и = 1 мкс, чувствительность датчика а = 0,55 А/мВ. Сигналы с датчиков положения регистрируются на высокоомном входе осциллографа, что обеспечивает большую чувствительность. Точность измерения отклонений ΔR, Δz = ±2 мм.

Внедрение бесконтактного контроля положения пучка было обусловлено возможностью перехода на высокий вакуум 5 · 10⁻⁸ Тор. Магнитоиндукционные датчики стоят вне высоковакуумного объема, и их влияние на вакуум исключено.

Б. Динамика стационарного тока

Формирование стационарного тока происходит в течение 3÷4 оборотов инжектируемого тока. Инжектируемый ток в среднем имел ам-

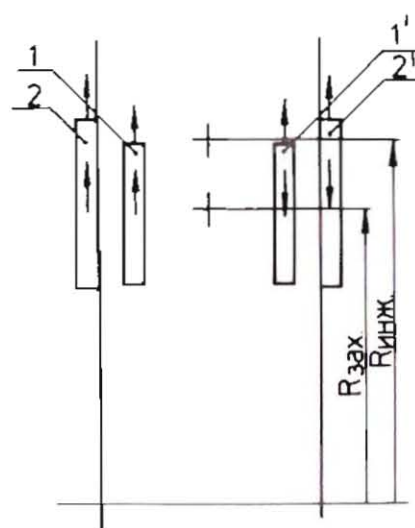


Рис. 9

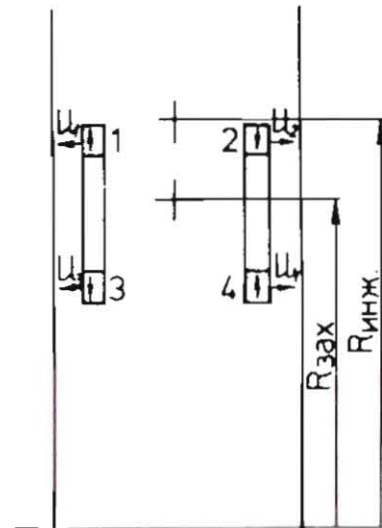


Рис. 10

плитуду 60÷80 А и длительность 30÷40 нс /время одного оборота T_{об.} = 10 нс/, расчетная величина захваченного стационарного тока

$$I_{зах.} = I_{ин} \frac{t_{и}}{T_{об.}} = 150 \div 250 \text{ А.}$$

Для измерения величины захваченного тока использовались два вида индукционных датчиков /рис. 9/: высокочастотный 1 - 1' и низкочастотный 2 - 2', отличающиеся плотностью намотки. Датчики состоят из двух половин стеклотекстолитовых каркасов длиной 190 мм, на которые равномерно намотан провод ϕ 0,3 мм. Они стоят вдоль радиуса симметрично относительно медианной плоскости, положение датчиков: высокочастотного датчика-z_д = ±44 мм, низкочастотный датчик вынесен за разделительные проволочные экраны и его z_д = ±100 мм /рис. 8/. Оба датчика по радиусу стоят в области формирования стационарного тока, и чувствительность их не зависит от положения измеряемого электронного пучка. Сигналы с датчиков также интегрируются RC-интеграторами. Основные параметры датчиков:

высокочастотный датчик

$$a = 3 \text{ А/мВ}, \tau_{и} = 100 \text{ мкс}, t_{собр.} = 30 \text{ нс};$$

низкочастотный датчик

$$a = 4 \text{ А/мВ}, \tau_{и} = 150 \text{ мкс}, t_{собр.} = 2 \text{ мкс.}$$

Для определения радиуса захваченного тока $R_{зах}$ был сконструирован датчик из четырех многовитковых катушек /рис.10/, включенных в измерительную схему встречно:

$$\Delta R \sim \Delta U = (U_1 + U_2) - (U_3 + U_4). \quad /4/$$

Сигнал с датчика линейно зависит от положения тока /рис.11/ и пересекает ось радиусов на $R = 350$ мм. Радиус захваченного тока определяется из выражения

$$R(\text{мм}) = 350 \pm 108 \frac{\Delta U(\text{мВ})}{I(\text{А})}. \quad /5/$$

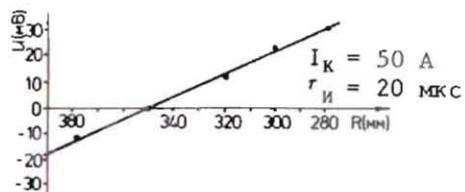


Рис. 11

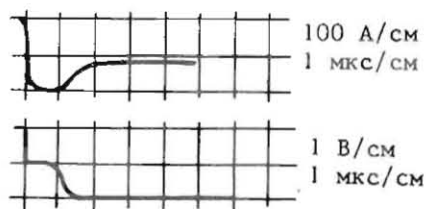


Рис. 12

Амплитуда захваченного тока и его временная зависимость показаны на рис.12, из которого видно, что значение $I_{зах1} = 150-200$ А существует $\sim 0,5 \div 1$ мкс, что значительно превосходит время одного оборота. В дальнейшем происходит потеря части пучка, и остается ток $I_{зах2} = 50 \div 100$ А.

Эффективность захвата от полного инжектируемого тока составляет: $\eta = 30 \div 50\%$ для времени измерения больше 1 мкс.

Измерения радиуса захвата по вышеизложенной методике дали величину $R_{зах} = 300 \div 330$ мм.

Потери тока после инжекции были исследованы с помощью цилиндра Фарадея, электрод которого перемещался по z в области радиуса захвата. На рис.9 приведены сигналы захваченного тока с индукционного датчика и с цилиндра Фарадея, электрод которого находится на $z = 40$ мм от медианной плоскости. Из характера приведенных сигналов видно, что потери захваченного тока совпадают с увеличением сигнала с цилиндра, то есть потери связаны с увеличением аксиального размера и, возможно, обусловлены уменьшением суммарного показателя спада магнитного поля. Размеры пучка на орбите инжекции и захвата определялись цилиндром Фарадея и совпадают с ранее опубликованными результатами /1/.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что подобная система инжекции работает как многооборотная и позволяет сформировать кольца с числом электронов $2 \div 5 \cdot 10^{12}$.

В заключение авторы выражают благодарность Н.А.Сергеевой за помощь в оформлении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Габанец И. и др. ОИЯИ, Р9-9729, Дубна, 1976.
2. Жабицкий В.М., Иванов И.Н. ОИЯИ, Р9-12660, Дубна, 1979.
3. Панин В.В., Степанов Б.М. Практическая магнитометрия. "Машиностроение", М., 1978.
4. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. "Мир", М., 1972.
5. Жабицкий В.М. и др. ОИЯИ, Р9-8354, Дубна, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 января 1983 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

ДЗ-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
Д1,2-12036	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12450	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
Д4-80-271	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д2-81-543	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д10,11-81-622	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д17-81-758	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д1,2-82-27	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Р18-82-117	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д2-82-568	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Д9-82-664	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д3,4-82-704	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Жабицкий В.М. и др.

P9-83-13

Система инжекции модели коллективного ускорителя

Исследуется многооборотная инжекция электронного пучка в адгезатор с целью получения электронных колец с числом электронов $10^{12} \div 10^{13}$. Инжекция осуществляется линейным индукционным ускорителем с энергией электронов $E = 1,5$ МэВ, величиной тока $I = 100 \div 150$ А, длительностью $T_H = 200$ нс. Отвод электронов от вводного устройства осуществляется импульсным магнитным полем. Для его создания разработан генератор тока, обеспечивающий в индуктивной нагрузке $L_H = 1,5 \cdot 10^{-6}$ Гн, прямоугольный импульс тока величиной $I_H = 6$ кА, время нарастания $t_H = 70$ нс, время спада $t_{сп} = 100$ нс. Для измерения амплитуды и положения по радиусу инжектируемого и захваченного пучка разработаны магнитоиндукционные датчики. Система пригодна для формирования электронных колец с числом электронов $2 \div 5 \cdot 10^{12}$.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Zhabitsky V.M. et al.

P9-83-13

Injection System of the Collective Accelerator Model

Multi-injection of electron beam into adhezator, while being obtained electron beams with the $10^{12} \div 10^{13}$ electron number are studied. Injection is performed by the linear inductive accelerator with the $E = 1.5$ MeV electron energy, $I = 100-150$ F current, $T = 200$ ns duration. The electron extraction out of the input device is accomplished by pulse magnetic field. For obtaining the pulse magnetic field a current generator has been designed. It is supplied by the inductive loading $L = 1,5 \cdot 10^{-6}$ H, longitudinal current pulse - $I = 6$ kA, increase time - 70 ns, decrease time - 100 ns. To measure amplitude and radius of injected and captured beam magnetic inductive pick-ups have been worked out. The system could be applied to the electron beam formation with the particle number $(2 \div 5) \cdot 10^{12}$ electrons.

The Investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.