

2/IV-84



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

1636/84

P9-83-856

**В.С.Александров, С.М.Бийский, А.К.Красных,
В.И.Миронов, В.А.Петров, В.А.Петров,
В.П.Саранцев, А.А.Фатеев, А.С.Шеулин**

**КУТИ-20: ЗАПУСК КОМПЛЕКСА
СИЛУНД-20 – АДГЕЗАТОР-20
В РЕЖИМЕ СЖАТИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ КОЛЕЦ**

1983

Головной частью коллективного ускорителя тяжелых ионов КУТИ-20 является комплекс, состоящий из линейного индукционного ускорителя /СИЛУНД-20/ и адиабатического генератора заряженных тороидов /адгезатор-20/.

В^{1/1} приведены описание ускорителя СИЛУНД-20 и результаты измерений характеристик пучка в слабофокусирующем магнитном поле адгезатора на радиусе инжекции.

Целью данной работы явились захват пучка на равновесную орбиту, сжатие кольца в адиабатически нарастающем магнитном поле и загрузка ионами тяжелых элементов.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Адгезатор-20 /рис.1/ принципиально и с точки зрения основных технических решений в значительной степени повторяет адгезатор прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов /ПКУТИ/. В частности, практические одинаковы магнитные системы^{2/}, идентичны вакуумные камеры, изготовленные из титанового сплава ОТ4-1. Вместе с тем, повышение средней цикличности КУТИ-20 до 20 Гц потребовало переработки ряда узлов адгезатора. Схема установки показана на рис.2. Существенно изменен канал транспортировки электронного пучка от выхода СИЛУНД-20 до точки инжекции /рис.2а/. Тонкие фольги^{3/}, применяемые на ПКУТИ для разделения вакуумных объемов адгезатора и линейного ускорителя /в адгезаторе требуется давление остаточного газа в $10^2 \div 10^3$ раз ниже/, при повышенной цикличности эксплуатационно ненадежны. Кроме того, эмиттанс электронного пучка при прохождении через фольгу возрастает^{3/}. В связи с этим на КУТИ-20 применена система перехвата газового потока, идущего из СИЛУНДА-20, состоящая из 4 насосов типа НОРД-250. Расположение вакуумного оборудования определило выбор фокусирующей системы из 4 осесимметричных линз. Ферромагнитные экраны экранируют канал от магнитного поля адгезатора.

Введение охлаждения потребовало конструктивной переработки элементов системы инжекции /рис.2а/, включающей в себя инфлектор и корректор^{2/}. Инфлектор предназначен для компенсации магнитного поля адгезатора на конечном участке транспортировки пучка. Он представляет собой виток прямоугольного сечения, запитываемый импульсом тока с амплитудой $\approx 3,5$ кА и длительностью вершины ≈ 100 нс. для того чтобы рассеянное поле витка не дефор-

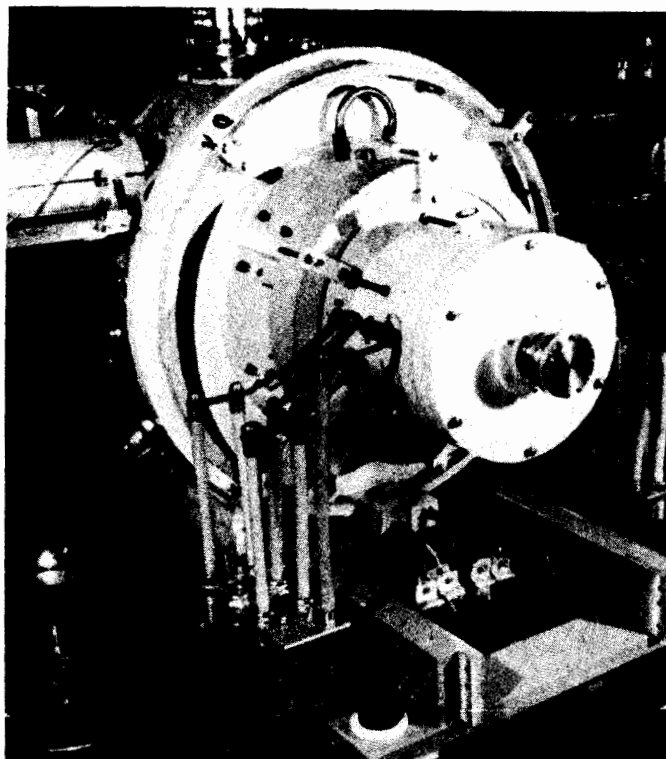


Рис.1. Адгезатор КУТИ-20.

мировало орбиту, виток окружен экраном из тонколистовой нержавеющей стали толщиной 0,5 мм. Экран непрозрачен для поля витка, но не влияет на магнитное поле адгезатора миллисекундной длительности. Корректор предназначен для гашения когерентных радиальных колебаний при инжекции.

Магнитная система /рис.26/ включает в себя четыре пары катушек с импульсным питанием, создающих нарастающее магнитное поле для сжатия кольца /I-IV ступеней/.

Длительность импульса /полусинусоида/ I ступени составляет 14 мс. Осциллограммы импульсов тока II-IV ступеней сжатия приведены на рис.3. В адгезаторе КУТИ-20 ионы тяжелых элементов в кольце образуются при ионизации атомарных потоков. К источнику потоков предъявляется ряд требований: универсальность по сорту атомов /вплоть до урана/, высокая цикличность работы /20±50 Гц/ и вакуумная чистота. Этим требованиям удовлетворяет лазерный источник /4,5/, схематично показанный на рис.26. Временная программа работы всех систем и контроль их параметров задавались

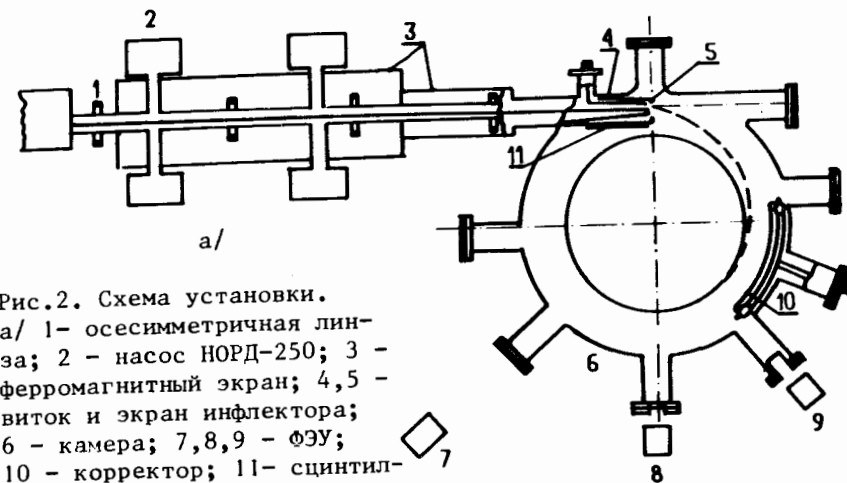


Рис.2. Схема установки.

а/ 1 - осесимметричная линза; 2 - насос НОРД-250; 3 - ферромагнитный экран; 4,5 - виток и экран инфлектора; 6 - камера; 7,8,9 - ФЭУ; 10 - корректор; 11 - сцинтиллятор; б/ 12 - фокусирующая линза; 13 - свинцовая мишень; 14 - электронное кольцо; 15 - лазерное излучение; I-IV - катушки ступеней сжатия.

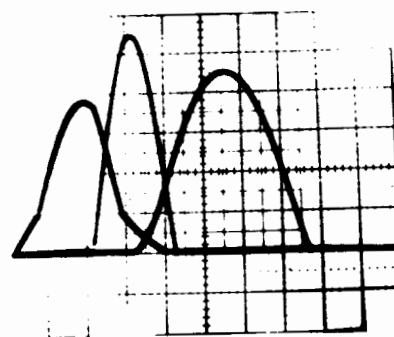
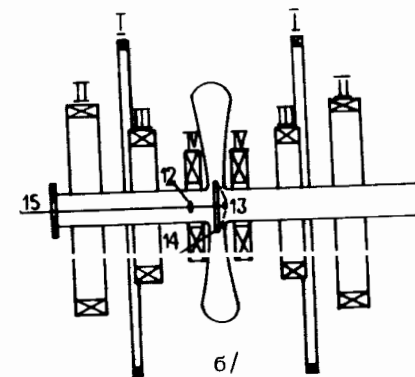


Рис.3. Осциллограммы токов II-IV ступеней сжатия 500 мкс/дел.

с помощью системы управления на базе мини-ЭВМ СМ-3 и микро-ЭВМ "Электроника-60", описанной в^{1/}. В качестве диагностической аппаратуры использовались разные типы ламельных датчиков для измерения распределения плотности тока по сечению пучка в канале транспортировки, пояса Роговского для измерения полного тока, детекторы тормозного излучения, возникающего при рассеянии на ионах и при сбросе кольца на мишень /фотоэлектронные умножители со сцинтилляторами из полистирола/.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБРАБОТКА

1. Транспортировка пучка в камеру адгезатора

Ускорение ионов электронными кольцами в градиентном магнитном поле с относительным градиентом, не превышающим $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$, при заданных параметрах сжатых колец /средний радиус 3,5 см, поперечные полуразмеры $a_r = a_z = 0,15 \text{ см}$ / возможно при количестве электронов в кольце $N_e \geq 7 \cdot 10^{12}$ /6/ или токе кольца на начальном радиусе $\sim 150 \text{ А}$. При эффективности захвата 60% /7/ ток в камере на выходе инфлектора должен составлять не менее 250 А. Измерение коэффициента токопрохождения пучка через канал транспортировки показало, что значительная часть пучка теряется в канале. Зависимость коэффициента токопрохождения от энергии электронов на выходе ускорителя представлена на рис.4. Энергия электронов изменялась путем варьирования зарядного напряжения модуляторов СИЛУНД-20 и измерялась по амплитуде суммарного импульса ускоряющего напряжения. Погрешность такой методики определения кинетической энергии электронов, как следует из /1/, не хуже 10%. Моделирование на ЭВМ процесса транспортировки показало, что апертура канала $\varnothing 60 \text{ мм}$ позволяет проводить без потерь в указанном на рис.4 интервале энергий пучок с током до 500 А. На рис.5 приведены распределения плотности тока пучка по сечению в различных точках канала транспортировки, измеренные с помощью методики, описанной в /8,9/. Анализ результатов измерений позволил заключить, что потери происходят в самом начале канала. Далее пучок проходит без потерь, и, как видно из рис.5, его диаметр не превышает 4 см, а отклонение пучка от оси тракта не превышает 8 мм.

Эксперименты по формированию электронного кольца на начальном радиусе, сжатию и загрузке ионами проводились при энергии инжектированного пучка 1,8 МэВ, что соответствует току пучка в точке инжекции 200 А. Увеличение тока инжектированного пучка

не входило в задачи работы на этапе запуска. Следует также заметить, что минимальное число электронов, требуемое для ускорения ионов электронными кольцами, в КУТИ-20 может быть

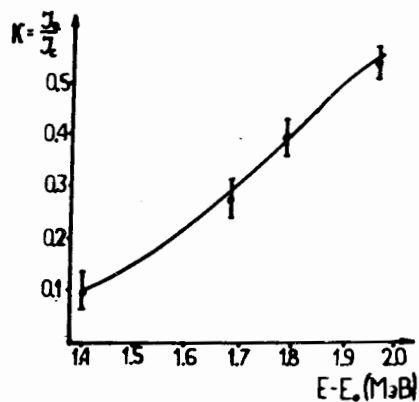


Рис.4. Зависимость коэффициента токопрохождения пучка от энергии электронов. $J_c = 450 \text{ А}$ - ток на выходе СИЛУНД-20; J_a - ток в точке инжекции.

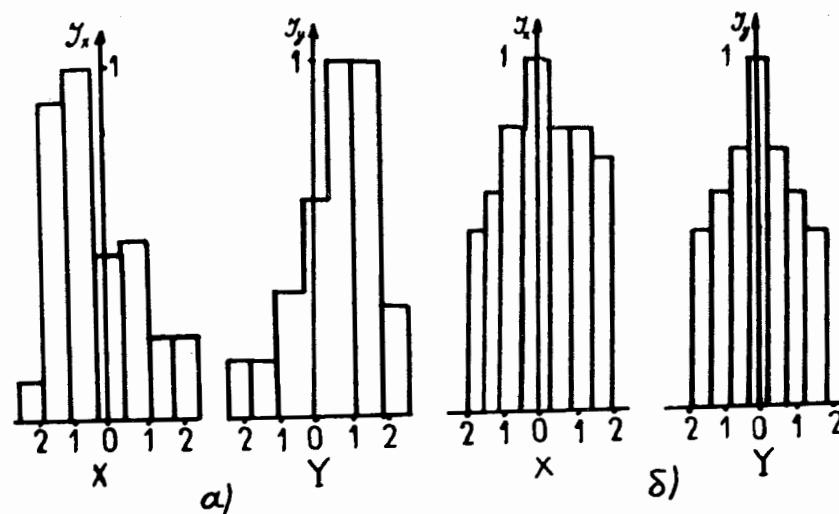


Рис.5. Распределение плотности тока пучка по сечению. а - на расстоянии 20 см за второй линзой; б - в точке инжекции.

меньше, чем в КУТИ /при прочих равных условиях/, благодаря снижению относительного градиента ускоряющего магнитного поля /до $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ /.

2. Формирование и сжатие электронного кольца

Некоторые отличия в элементах конструкции, системе питания и катушках магнитной системы адгезатора и в энергии инжекции КУТИ-20 по сравнению с ПКУТИ обусловили необходимость отыскания исходных режимов захвата пучка на начальную орбиту и сжатия электронного кольца. Предусматривались 2 режима работы: а/ захват пучка и предварительное поджатие кольца полем I ступени, б/ захват в суммарное поле I и II ступеней - с последующим сжатием.

Настройка режимов производилась по минимуму потерь электронов при сжатии и максимуму сигнала "обратной высадки" - тормозного излучения, возникающего при разрушении разжимающегося кольца, интеграл которого характеризовал количество электронов в кольце. Тормозное излучение, возникающее при потерях электронов в процессе сжатия и разжатия, контролировалось с помощью ФЭУ.

В экспериментах по захвату пучка величина показателя спада на начальной орбите $R = 35 \text{ см}$ в диапазоне $n_0 = 0,14 \div 0,23$ варьировалась путем перемещения вдоль оси катушек I ступени. Инжекция /рис.6/ осуществлялась раньше максимума тока I ступени, электронное кольцо сжималось нарастающим магнитным полем, затем

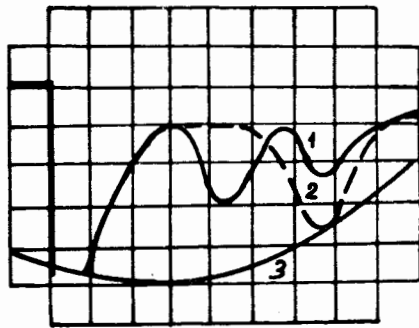


Рис.6. Сигнал ФЭУ7 при захвате
1 - $Z_1 = 32$ см, 2 - $Z_1 = 29$ см,
3 - ток I ступени; 4 - сигнал
ФЭУ8. Развертка 500 мкс/дел.

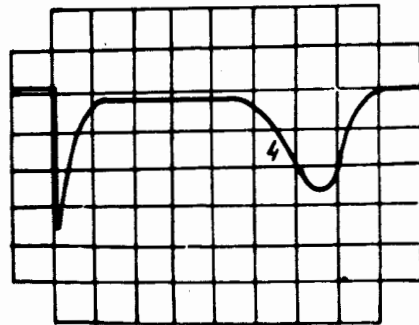
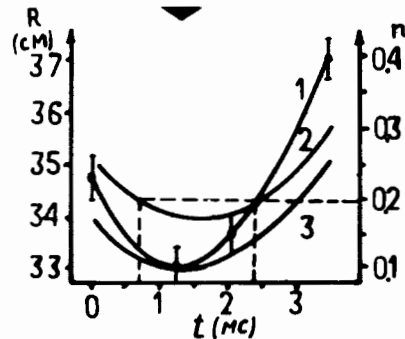


Рис.7. 1 - R-траектория; 2-3 -
п-траектории при $Z_1 = 32$ см и
 $Z_1 = 29$ см соответственно.



расширилось на спадающей части импульса тока и сбрасывалось на инфлектор. При снижении показателя спада ниже 0,17 количество захваченных частиц резко уменьшается. В частности, при $n_0 = 0,14$ оно составляет менее 50% от соответствующего значения $n_0 = 0,17$. С увеличением показателя спада до $n \leq 0,23$ такой критичности не наблюдается.

На рис.6 приведены осциллограммы сигнала детектора γ -излучения /см.рис.2/ при двух положениях катушек I ступени: $Z_1 = 32$ см / $n_0 = 0,23$ / и 29 см / $n_0 = 0,17$ /. Соответствующие им R- и п-траектории кольца показаны на рис.7 /привязка R-траектории проводилась по известной точке сброса кольца $R_{\text{макс.}} = 37,3$ см - нижнему краю экрана инфлектора/. Дополнительно регистрировался сигнал с ФЭУ, ориентированного на сцинтиллятор, закрепленный на инфлекторе /см.рис.2/, который соответствует "наплыванию" на него кольца. Из рис.6 следует, что при втором прохождении резонанса связи $n = 0,2$ в I ступени есть потери электронов / $Z_1 = 32$ см/. Результаты рис.7 использовались при настройке режимов сжатия.

Известно^{/10/}, что основные потери электронов при сжатии происходят на радиусах, близких к радиусу начальной орбиты, где п-траектория из-за переходных процессов, возникающих в стенках

камеры при включении II ступени, проходит вблизи резонансного значения $n = 0,25$, и при наличии азимутальной неоднородности магнитного поля возможно частичное прохождение параметрического резонанса. Смысл режима а/ заключается в отводе кольца медленным полем I ступени из области наибольшей деформации магнитного поля /предварительное поджатие/. Расчеты показали, что при инъекции в суммарное поле I и II ступеней можно реализовать п-траекторию без выброса, связанного с переходными процессами /режим б/. При исследовании обоих режимов варьируемыми параметрами были Z -положение катушек I ступени и момент времени включения тока II ступени t_{II} .

Режим а/ иллюстрируется рис.8. При $Z_1 = 32$ см видны 2 пика потерь, связанные с резонансами $n = 0,25$ и $n = 0,2$. При $Z_1 = 29$ см пик потерь, связанный с $n = 0,25$, исчезает, и возрастает количество электронов в кольце в конце сжатия, которое оценивалось по "обратной высадке" в IV ступени. Оптимальными в этом режиме являются $Z_1 = 29$ см и $t_{II} = 1$ мс после инъекции.

Критерием оценки режима б/ служили амплитуда и форма сигнала "обратной высадки" во II ступени. Выбор такого критерия обусловлен тем, что регистрация потерь в начале сжатия при t_{II} , близких к моменту инъекции $t_{и}$, затруднена из-за большого фона незахваченных электронов /длительность инжектируемого пучка в 20 нс при времени одного оборота 7,5 нс/. Исследование режима б/ показало, что оптимальными для него являются $Z_1 \approx 29$ см и $t_{II} = t_{и} - 40$ мкс. Увеличение Z_1 и уменьшение t_{II} приводит к возрастанию потерь при повторном прохождении резонансов $n = 0,2$ и $0,25$ и уменьшению сигнала "обратной высадки". При уменьшении Z_1 и увеличении $t_{и}$ снижаются амплитуды сигналов потерь и "обратной высадки". Из рис.9 видно, что при $t_{II} = t_{и} - 40$ мкс раскачка ко-

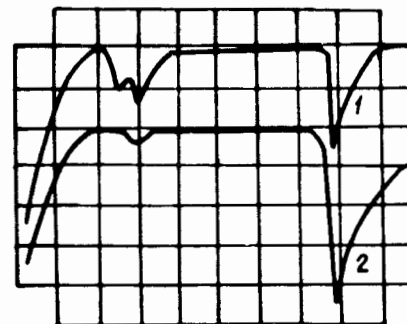


Рис.8. Сжатие в I-IV ступенях. Режим а. 1,2 - сигналы ФЭУ7 /см.рис.2/ при $Z_1 = 32$ см и $Z_1 = 29$ см соответственно.

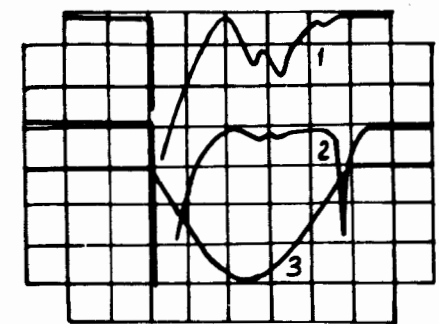


Рис.9. Сжатие в I и II ступенях. Режим б. 1,2 - сигналы ФЭУ7 /см.рис.2/ при $Z_1 = 32$ см и $Z_1 = 29$ см соответственно; 3 - ток II ступени.

Таблица

№ ступени	Средний радиус катушек R / см /	Расстояние от медианной плоскости Z / см /	Количество витков в катушке	Напряжение или ток	Момент включения относительно t_i / мс /	Примечание
I	64	29	6	2,7 кА 0,97·2,7 кА	-6 -11	Режим а/ Режим б/
II	38	48	32	20 кВ 20 кВ	1 -0,04	Режим а/ Режим б/
III	28	29	28	20 кВ	-	Включается в максимуме тока II ступени
IV	14,8	7,8	70	15 кВ	-	Включается через 75 мкс после максимума тока III ступени



Рис.10. Загрузка кольца ионами свинца. 2, 3, 4 - сигналы ФЭУ 9 /см. рис.2/ тормозного излучения электронов на ионах при $t_1 = 400$ мкс, $t_2 = 200$ мкс; $t_3 = 0$ мкс от максимума тока /1/ IV ступени соответственно.

лебаний пучка существенно меньше, чем при $t_{II} = t_i$, т.к. промежуточные пики потери частиц в случае $t_{II} = t_i$ значительно больше, а "обратная высадка" меньше. Выбранные в качестве исходных режимы магнитной системы приведены в таблице.

3. НАКОПЛЕНИЕ ИОНОВ СВИНЦА

Геометрия установки лазерного источника атомов позволяла инжектировать их в электронное кольцо во всем диапазоне радиусов $R = 3 \div 35$ см. Выбор конкретного радиуса осуществлялся путем изменения момента срабатывания лазера. Плотность мощности лазерного излучения на свинцовой мишени составляла $6 \cdot 10^8$ Вт/см². Индикация накопления ионов свинца производилась по тормозному излучению электронов на ионах, которое выводилось через тонкую /20 мкм/ титановую фольгу и регистрировалось ФЭУ 9 /см.рис.2/. Давление остаточного газа в камере адгезатора составляло $2 \cdot 10^{-7}$ мм.рт.ст. На рис.10 представлены осциллограммы сигнала ФЭУ при различном времени срабатывания источника. Расчетные значения радиуса электронного кольца при пересечении с потоком атомов свинца соответствовали $R(t_1) = 9,5$ см, $R(t_2) = 8,5$ см, $R(t_3) = 4,9$ см / t_i - интервал времени между моментом пересечения и максимумом тока IV ступени/. Приведенные осциллограммы свидетельствуют о том, что происходит захват ионов свинца и их удержание в потенциальной яме кольца при сжатии.

Следует отметить тот факт, что при давлении остаточного газа $P = 2 \cdot 10^{-7}$ мм.рт.ст. согласно расчетам /11/, должна наблюдаться полная нейтрализация объемного заряда кольца легкими ионами /в основном азота/. Поэтому накопление ионов свинца в этом режиме требует теоретического объяснения.

ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы:

- запущен комплекс СИЛУНД-20 - адгезатор-20 в режиме сжатия электронных колец;
- проверена работоспособность основных узлов адгезатора-20;
- проведена предварительная оптимизация захвата и сжатия, выбраны исходные режимы и геометрия магнитной системы;
- реализована загрузка электронного кольца ионами свинца с помощью лазерного источника атомов.

Авторы выражают глубокую благодарность И.В.Кузнецову, В.Е.Миронову, С.М.Сильнову, Е.А.Сотниченко, А.П.Сумбаеву, Б.А.Шестакову за предоставленную аппаратуру и помощь в экспериментах по загрузке электронных колец ионами свинца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9-83-307, Дубна, 1983.
2. Барабаш Л.С. и др. ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
3. Александров В.С. и др. ОИЯИ, 9-82,709, Дубна, 1982.
4. Быковский Ю.А. и др. ОИЯИ, Р19-83-502, Дубна, 1983.
5. Быковский Ю.А. и др. ОИЯИ, Р9-83-501, Дубна, 1983.
6. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-80-368, Дубна, 1980.
7. Саранцев В.П. и др. ОИЯИ, Р9-10053, Дубна, 1976.
8. Азорский Н.И. и др. ОИЯИ, 13-81-163, Дубна, 1981.
9. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9-82-70, Дубна, 1982.
10. Саранцев В.П. и др. ОИЯИ, Р9-10054, Дубна, 1976.
11. Перельштейн Э.А., Ширков Г.Д. ОИЯИ, 9-80-124, Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 декабря 1983 года

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

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

	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
D4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
D1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризованным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D2,4-83-179	Труды XV Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Дубна, 1982.	4 р. 80 к.
	Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1982 /2 тома/	11 р. 40 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 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

Александров В.С. и др.
КУТИ-20: запуск комплекса СИЛУНД-20 - адгезатор-20
в режиме сжатия электронных колец.

P9-83-856

Приведены результаты запуска и выбора работы головной части ускорителя КУТИ-20 /комплекса СИЛУНД-20 - адгезатор-20/ в режиме сжатия электронных колец. Показано, что изменение кинетической энергии электронов от 1,4 до 2 МэВ более чем в 3 раза улучшает прохождение пучка по каналу транспортировки. Получен ток в точке инъекции 280 А. Проведена предварительная оптимизация захвата и сжатия, а также минимизация потерь электронов при частичном прохождении параметрического резонанса. Выбраны исходные режимы работы магнитной системы. Реализована загрузка кольца ионами свинца с помощью лазерного источника атомов. Показано, что загрузку можно производить во всем диапазоне 3÷35 см радиусов сжимающегося кольца.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Alexandrov V.S. et al.
KUTI-20 Accelerator: Launching of the SILUND-20 - Adgezzytor-20
Complex in the Electron Ring Compression Regime

P9-83-856

The results of launching and working regime choice of the head part of KUTI-20 accelerator /SILUND-20 - Adgezzytor-20 complex/ in the regime of electron ring compression are given. It is shown that change of the electron kinetic energy improves the beam passage along the transporting channel by more than 3 times. Current about 280 A at the injection point is obtained. The preliminary optimization of the capture and compression when partial crossing the parametric resonance is carried out. The initial regimes of the magnetic system operation are chosen. The loading of the ring by lead ions obtained is realized with the help of a laser source. It is shown that the loading can be produced in all 3÷35 cm radius range of the compressing ring.

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