

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

9-86-210

И.В.Кузнецов, Э.А.Перельштейн, В.Н.Разувакин,  
А.П.Сумбаев, В.А.Тимохин, А.Е.Черемухин

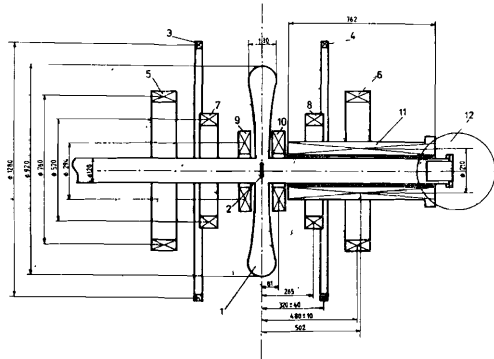
**СХЕМА ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНОГО УДЕРЖАНИЯ  
ЭЛЕКТРОННОГО КОЛЬЦА  
НА МАЛЫХ РАДИУСАХ СЖАТИЯ  
В ПРОТОТИПЕ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

Направлено в журнал  
"Вопросы атомной науки и техники"

**1986**

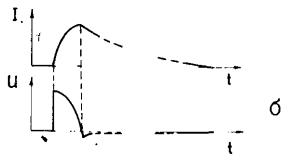
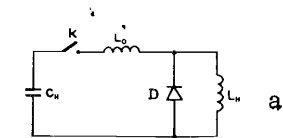
В работах [1-3] отмечается, что кольцо релятивистских электронов, формируемое в коллективном ускорителе, может служить эффективным источником ионов высокой зарядности, причём степень зарядности ионов, получаемых в электронно-ионном кольце существенно определяется временем нахождения ионов в потенциальной яме кольца [2], т.е. длительностью цикла сжатия кольца и временем существования его в сжатом состоянии. В [3] предложен способ увеличения времени удержания электронного кольца в медленно спадающем магнитном поле коллективного ускорителя, формируемого путём закорачивания токовых катушек магнитной системы в момент достижения в них максимального значения тока. В настоящей работе содержатся результаты экспериментальной проверки возможности создания схемы для длительного удержания электронно-ионного кольца на малых радиусах на прототипе коллективного ускорителя тяжёлых ионов (ПКУТИ).

Магнитный цикл формирования и сжатия электронных колец в ПКУТИ задаётся работой четырех ступеней - четырёх пар безжелезных токовых катушек, представленных на рис.1 [4]. Катушки 3,4 ("о" ступень) формируют квазистационарное поле напряжённостью  $\sim 200$  Э для захвата пучка на круговую орбиту. Катушки сжатия 5+10 обеспечивают в области, занятой кольцом 2, нарастание магнитного поля от  $\sim 200$  Э до  $\sim 20$  кЭ за времена  $t_{сж} \approx (2,5 + 2,8)$  мс. Ускоряющий соленоид формирует градиентное магнитное поле для предварительного ускорения электронно-ионных колец. Длительного удержания электронно-ионного кольца можно достичь путём закорачивания катушек последней (третьей) ступени сжатия диодным коммутатором. Принцип увеличения длительности затухания магнитного потока индуктивных катушек при замыкании их кроубар-замккателем в технике формирования больших импульсных магнитных полей известен [5]. Схема с диодом, замыкающим индуктивную нагрузку, изображённая на рис.2а, является разновидностью схемы кроубар-замккателя. Перехват тока нагрузки диодом D (при  $L_0 \ll L_H$ ) происходит автоматически при переполюсовке напряжения на индуктивности  $L_H$  в момент достижения в ней максимального значения тока - рис.2б. После этого в контуре, образованном индуктивностью и диодом, начинает циркулировать ток, изменяющийся по закону, близкому к  $I \approx I_0 e^{-t/\tau}$ . Здесь  $I_0$  - значение тока в индуктивности в момент перехвата в диод, а постоянная спада  $\tau \approx L_H/R$ , где  $R$  - актив-



**Рис. 1.** Магнитная система прототипа коллективного ускорителя тяжёлых ионов. 1 - вакуумная камера адгезатора; 2 - электронное кольцо; 3 + 10 - катушки магнитного поля; 3 + 4 - катушки "0" ступени, формирующей первый оборот, 5 + 6 - катушки I ступени сжатия, 7 + 8 - катушки II ступени сжатия, 9 + 10 - катушки III ступени сжатия; 11 - ускоряющий градиентный магнитный соленоид; 12 - узел ввода диагностических устройств.

ное сопротивление потерь контура (на схеме отсутствует). При достижении в III ступени максимального значения тока поле в области, занятой кольцом, должно, в основном, определяться параметрами и током катушек III ступени. После замыкания катушек диодным коммутатором его дальнейшее изменение во времени должно быть также близким к экспоненциальному:  $H = H_0 e^{-t/\tau}$ . Здесь  $H_0$  - значение поля в момент пе-

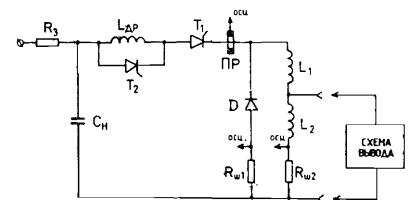
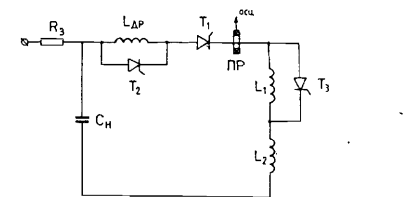


**Рис. 2.** а - схема с диодом, включённым в качестве крубар-замыкателя, б - эпюры тока и напряжения.  $C_n$  - накопительная ёмкость,  $K$  - ключ,  $L_n$  - индуктивная нагрузка,  $D$  - диод-замыкатель,  $L_0$  - паразитная индуктивность ( $L_0 \ll L_n$ ),  $I$  - ток в нагрузке,  $U$  - напряжение на индуктивности  $L_n$ .

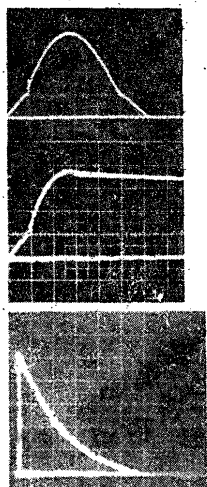
рехвата тока. Измеренные величины параметров контура составляли: общее сопротивление катушек и подводящих кабелей по постоянному току -  $(0,042 \pm 0,001) \text{ Ом}$ , суммарная индуктивность последовательно включенных катушек третьей ступени (с учетом влияния камеры адгезатора) -  $2,3 \text{ мГн}$ . Соотношение этих параметров обеспечивало выполнение условия  $\tau_{сп} \approx 55 \text{ мс} \gg t_{сж}$ , что позволяло надеяться на получение на радиусе сжатого кольца ведущего поля, близкого по величине к максимальному полю сжатия, в промежутке времени, превышающем время сжатия в несколько раз.

Реализация схемы длительного удержания произведена на основе традиционной схемы питания катушек III ступени (рис. 3а), работа которой заключается в следующем. Ток в последовательно соединённых катушках ступени  $L_1$  и  $L_2$  формируется при разряде накопительной ёмкости  $C_n$  с помощью тиристорного коммутатора  $T_1$ . Дополнительный дроссель  $L_{др}$  включён в схему для снижения скорости нарастания тока в цепи и выключается из работы шунтирующим коммутатором  $T_2$ . Тиристорный коммутатор  $T_3$  обеспечивает режим вывода электронного кольца. Он включается через  $600+700 \text{ мкс}$  после включения схемы и, шунтируя одну из катушек ступени ( $L_1$  на рис. 3а, катушку 10 на рис. 1), перераспределяет токи в катушках таким образом, что магнитная яма смещается и вылаживается в сторону шунтируемой катушки, осуществляя тем самым вывод кольца в градиентный ускоряющий соленоид [6].

На рис. 3б представлена схема питания катушек III ступени для режима длительного удержания. Перехват тока ступени осуществляется диодным коммутатором  $D$ , включённым параллельно катушкам  $L_1$  и  $L_2$ .



**Рис. 3.** а - традиционная схема питания катушек III ступени сжатия. б - схема питания III ступени в режиме длительного удержания.  $R_3$  - зарядное сопротивление;  $C_n$  - накопительная ёмкость;  $T_1, T_2, T_3$  - тиристорные коммутаторы;  $L_1, L_2$  - катушки III ступени сжатия;  $L_{др}$  - дроссель затычки тока,  $D$  - замыкающий диодный коммутатор; ПР - пояс Роговского;  $R_{ш1}$  и  $R_{ш2}$  - измерительные шунты.



а

Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока в катушках III ступени. а - режим сжатия, б - режим сжатия с удержанием. Развертка - 500 мкс/дел. в - ток катушек в режиме длительного удержания. Развертка - 20 мс/дел.

б

в

Измерение токов в схемах производится поясами Роговского ИР и шунтами  $R_{ш1}=R_{ш2}=5 \cdot 10^{-4}$  Ом.

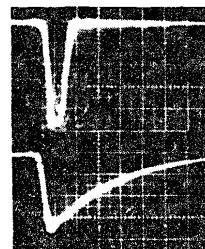
На рис. 4 приведены осциллограммы импульсов тока в катушках в режиме сжатия (4а) и в режиме сжатия с длительным удержанием (4б, в), полученные с шунта  $R_{ш2}$ . Форма тока в катушках традиционной схемы близка к синусоидальной с длительностью полупериода  $\approx 3,0$  мс. Изломы в начале и в конце полусинусоиды обусловлены работой дросселя  $L_{др}$ .

При включении схемы длительного удержания (рис. 3б) в начале цикла происходят те же самые процессы, что и в традиционной схеме до момента достижения максимального тока в нагрузке. При перехвате тока диодным коммутатором  $D$  в контуре  $L_1-L_2-D$  начинает циркулировать ток, убывающий по величине с постоянной времени  $\approx (L_1+L_2+L_{св})/R_n$ , где  $R_n$  - суммарное активное сопротивление потерь в цепи, а  $L_{св}$  - связь катушек между собой и с камерой. Форма тока по осциллограммам в катушках обеих схем на первой стадии совпадает, а во второй стадии ток в схеме длительного удержания (рис. 4б, в) затухает с характерным временем спада  $(35,5 \pm 1)$  мс. Снижение постоянной затухания тока по сравнению с величиной  $\tau_{сп} = 55$  мс, полученной из предварительных оценок без учета нелинейных эффектов, видимо, вызвано дополнительными потерями, связанными с наличием катушек других ступеней, камеры адгезатора, элементов согласования кабелей с нагрузкой, а также изменением нелинейных сопротивлений контура под нагрузкой. Это подтверждает изменение измеряемой постоянной затухания тока почти на 20% при изменении зарядного напряжения на  $C_n$  от 5 кВ до 20 кВ. Действительно, увеличение длительности тока III ступени с амплитудой 5 кА почти на порядок привело к дополнительному нагреву камеры и элементов схемы. Поэтому во избежание перегрева катушек и вакуумной камеры частота циклов работы схемы снижалась с 0,5 Гц до одного цикла в 30 с.

Первые эксперименты по длительному удержанию проводились при следующих условиях: давление остаточного газа в камере адгезатора  $\approx 10^{-4}$  Па, число частиц в кольце  $N_e = (1 \pm 2) \cdot 10^{12}$ . Размеры кольца в конце сжатия обеспечивались максимальным полем III ступени и составляли: большой радиус кольца  $r_k = 3,3$  см; малые размеры (средне-квадратичные размеры бечений:  $a_z = 2,5$  мм,  $a_z = 3,0$  мм [6,7]). Состояние кольца в режиме длительного удержания контролировалось по синхротронному излучению (СИ) и тормозному излучению (ТИ), возникающему при разрушении кольца в конце цикла удержания. Монитором  $N_e$  по СИ служил фотодиод ФД - 24 К с максимумом спектральной чувствительности в области 0,85 мкм. Для уменьшения погрешностей, вызванных изменением углового распределения СИ, излучение фокусировалось на чувствительную поверхность фотодиода линзой, собирающей свет от кольца на расстоянии 75 см в апертуре 10 см. Детектором ТИ служил ФЭУ-30 с пластиковым сцинтиллятором.

Измерение длительности сигнала с монитора СИ и времени появления сигнала с детектора ТИ показало, что электронное кольцо в камере адгезатора в поле третьей ступени, медленно спадающем во времени, существует после окончания цикла сжатия ещё, по крайней мере, 30-40 мс. Длительность сигнала с детектора СИ (рис. 5) возросла до 9 мс по основанию. Сигнал с детектора тормозного излучения, соответствующий разрушению кольца, возникал через  $\sim 50$  мс после начала сжатия и исчезал через  $\sim 20 + 30$  мс.

Для расширения возможности исследования электронного кольца в режиме длительного удержания был осуществлен вывод кольца из медианной плоскости камеры путём смещения магнитной ямы катушек третьей ступени. С этой целью к катушкам подключалась "схема вывода" (рис. 3б), позволяющая производить перераспределение токов в катушках III ступени: уменьшать ток в катушке  $L_1$  и увеличивать в  $L_2$  в диапазоне  $\Delta I$  от 0 до 0,8 номинального значения тока в катушках в момент включения



а

Рис. 5. Осциллограммы сигналов с детектора синхротронного излучения: а - режим сжатия, б - режим сжатия с удержанием.

б

Развертка - 1 мс/дел.

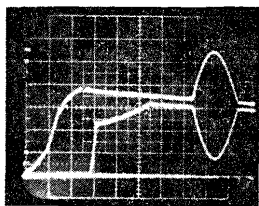


Рис.6. Осциллограммы сигналов с шунтов  $R_{ш1}$  и  $R_{ш2}$  в режиме удержания с выводом, верхний луч – сигнал с шунта  $R_{ш2}$ , нижний луч – сигнал с шунта  $R_{ш1}$ . Развертка – 500 мкс/дел.

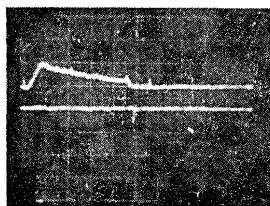


Рис.7. Осциллограммы сигналов с детекторов синхротронного излучения (верхний луч) и тормозного излучения (нижний луч) в режиме длительного удержания с выводом. Развертка – 1 мс/дел.

"схемы вывода". На рис.6 представлены осциллограммы токов, измеренных шунтами  $R_{ш1}$  и  $R_{ш2}$  в режиме длительного удержания с включением "схемы вывода" через 3,7 мс после начала работы III ступени. Сигнал с шунта  $R_{ш2}$  представляет собой ток катушки  $L_2$  (верхняя осциллограмма) и до момента включения схемы вывода повторяет форму тока катушек при обычном удержании. Затем "схема вывода" добавляет в  $L_2$  "полусинусоиду" с длительностью  $\sim 1$  мс. Сигнал с  $R_{ш1}$  (нижняя осциллограмма) представляет собой сумму токов катушки  $L_1$  и правой части схемы Зб. Он возникает в момент перехвата диодом тока нагрузки. Излом в начале осциллограммы соответствует "добавке" тока обратного направления – вкладу дросселя  $L_{др}$  при закрытии коммутатора  $T_2$ . При включении схемы вывода ток в  $L_1$  падает. Из-за примерного равенства индуктивностей и активных сопротивлений катушек  $L_1$  и  $L_2$  величины изменений токов  $\Delta I_{L1}$  и  $\Delta I_{L2}$  от "схемы вывода" близки по величине, а по длительности совпадают с длительностью тока ускоряющего градиентного соленоида (II на рис.1). Выбором величины тока соленоида при синхронном включении его вместе со схемой вывода удалось вывести электронно-ионное кольцо из медианной плоскости. На рис.7 представлены осциллограммы сигналов с детекторов синхротронного излучения и тормозного излучения, полученных в режиме длительного удержания с выводом, включенным через  $\approx 4$  мс, и сбросом на мишень. Из осциллограмм видно, что после включения схемы вывода сигнал синхротронного излучения резко падает и возникает всплеск тормозного  $\gamma$ -излучения от разрушения кольца на мишени.

Таким образом, созданная схема позволила приступить к изучению электронного кольца в режиме длительного удержания с временем существования на малых радиусах, существенно превышающем время сжатия.

## Л и т е р а т у р а .

1. В.П.Саранцев, Э.А.Перельштейн "Коллективное ускорение ионов электронными кольцами". Атомиздат, Москва, 1979.
2. E.A.Perelstein, G.D.Shirkov. ОИЯИ, Е9-85-4, Дубна, 1985.
3. Новиков В.Г., Перельштейн Э.А. Авт.свид. СССР № 766384 от 06.03.79. Бюл.ОИ, 1983, №4, с.351.
4. Л.С.Барабаш и др. ОИЯИ, Р9-8759, Дубна, 1975.
5. Г.Кнопфель. "Сверхсильные импульсные магнитные поля". "Мир", Москва, 1972.
6. В.П.Саранцев и др. ОИЯИ, Р9-10917, Дубна, 1977.
7. В.С.Александров и др. ОИЯИ, Р9-83-862, Дубна, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 апреля 1986 года.

## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

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

|               |  |            |
|---------------|--|------------|
| D17-81-758    | Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.  | 5 р. 40 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. |
| 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. |
| D13-84-63     | Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия. 1983.   | 4 р. 50 к. |
| D2-84-366     | Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.   | 4 р. 30    |
| D1,2-84-599   | Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.  | 5 р. 50 к  |
| D17-84-850    | Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/  | 7 р. 75 к  |
| D10,11-84-818 | Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983 | 3 р. 50    |
|               | Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/  | 13 р. 50 к |
| D4-85-851     | Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.   | 3 р. 75    |

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

Кузнецов И.В. и др.

9-86-210

Схема для длительного удержания электронного кольца на малых радиусах сжатия в прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов

Представлены результаты экспериментальной проверки возможности длительного удержания электронного кольца в коллективном ускорителе, описана схема формирования магнитного поля. При замыкании катушек магнитной системы диодным коммутатором ток в катушках затухает с постоянной спада ~35 мс, а длительность существования электронного кольца на малых радиусах увеличивается до ~10 мс.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод авторов

Kuznetsov I.V. et al.

9-86-210

The Set-Up for the Electron Ring Long Confinement on the Small Radius in Heavy Ion Collective Accelerator Prototype

The results of the experimental verification of the electron ring long confinement on the small radius in a collective accelerator are presented. The set-up of the magnetic field formation are described. The magnetic coils of the electron ring compressor are closed by diode crow-bar commutator. The decrement of the magnetic field is ~35 ms. The lifetime of the electron ring on the small radius of ~10 ms.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986