

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

А 465

Р9-88-423 *e*

**В.С.Александров, Ю.И.Алексахин, В.К.Антропов,  
С.М.Бийский, Г.В.Долбилов, Л.В.Дубовик,  
Н.Ю.Казаринов, А.А.Мальцев, В.И.Миронов,  
В.А.Петров, В.Н.Разувакин, В.П.Саранцев,  
А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, А.А.Фатеев,  
В.Н.Шаляпин, А.С.Щеулин**

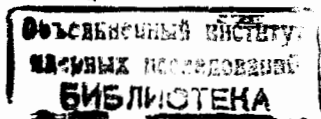
**ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ КОЛЕЦ  
В МАГНИТНОЙ СИСТЕМЕ АДГЕЗАТОРА КУТИ-20  
С УВЕЛИЧЕННЫМ ЗНАЧЕНИЕМ  
ПОКАЗАТЕЛЯ СПАДА**

**1988**

Одним из основных эффектов, ограничивающих число электронов  $N_e$  в кольце, формируемом в адгезаторе коллективного ускорителя тяжелых ионов КУТИ-20<sup>1/</sup>, является неустойчивость когерентного сдвига<sup>2/</sup>, приводящая к затягиванию кольца на стенку металлической вакуумной камеры. Оценки показывают, что на начальном радиусе  $R_0 = 35$  см при энергии инжекции  $E_0 = 3$  МэВ, показателе спада магнитного поля  $n = 0,18$ <sup>1/</sup> и близкой к реальной величине несовпадения медианных плоскостей магнитной системы и камеры  $\sim 1,5$  мм предельное число электронов составляет  $N_e \approx 6 \cdot 10^{12}$  (ток электронов  $J_e \approx 140$  А). Это согласуется с измерениями в таких условиях максимально циркулирующего тока (с временем жизни больше 100 мкс)  $J_{e \max} \approx 120$  А<sup>3/</sup>. С учетом потерь при сжатии<sup>4/</sup> число электронов в конечном состоянии не могло превышать  $4 \cdot 10^{12}$ . Ранее опубликованные данные по измерению числа электронов<sup>5/</sup> завышены (не менее чем в 1,5 раза), вследствие неточного учета углового распределения синхротронного излучения (СИ).

Согласно<sup>2/</sup> величина  $J_{e \max}$  при заданных  $R_0$  и размерах камеры пропорциональна произведению  $nE_0$ . В адгезаторе КУТИ-20 увеличение энергии инжекции лимитируется величиной магнитного поля в конце цикла сжатия (индукция  $B \leq 2,2$  Тл). В<sup>6/</sup> было предложено увеличить значения показателя спада до  $0,36 < n < 0,64$  и снизить его, после накопления ионов, до величины  $n = 0$ , необходимой для перевода кольца в область ускорения. Основанием для такого выбора  $n$ -траектории является принципиальная возможность пересечения параметрического резонанса аксиальных бетатронных колебаний электронов без значительного уменьшения плотности двухкомпонентных колец<sup>7/</sup>.

Целью данной работы являлся перевод магнитной системы в предложенный режим для увеличения предельного числа электронов в конечном состоянии. При выборе конкретной  $n$ -траектории мы остановились на значении показателя спада при сжатии  $n = 0,5$ , максимально удаленном от границ данного диапазона. Предполагалось, что при близких энергиях радиальных и аксиальных бетатронных колебаний соответствующий разностный резонанс не приведет к ухудшению параметров формируемых колец.



## МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Модернизация системы формирования магнитного поля заключалась в изменении системы питания и режима ее работы, а также введении пары корректирующих двухвитковых катушек 1К (рис. 1).

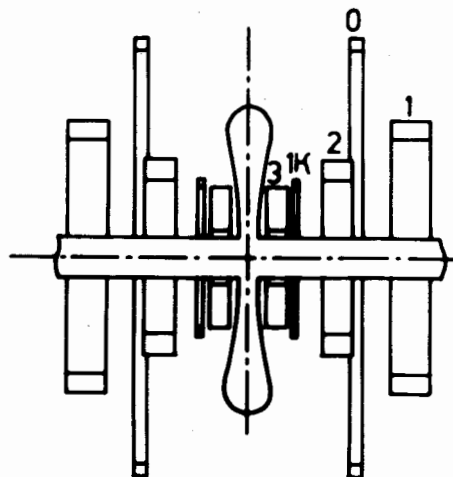
При формировании  $n$ -траектории со значениями показателя спада  $n \leq 0,2^{1/2}$  радиус сжимающегося кольца  $R_k(t)$  был меньше средних радиусов работающих в данный момент времени ступеней сжатия. Существенным отличием новой временной программы включения токов является одновременная работа ступеней со средними радиусами, как большими, так и меньшими  $R_k$ . Ступень сжатия с большим радиусом в основном обеспечивает необходимый уровень магнитного поля, а с меньшим — корректирует значение показателя спада.

В момент инжекции основное поле создается катушками нулевой, а коррекция показателя спада с помощью предимпульса в катушках первой и 1К-ступеней. Затем в последних формируется основной импульс тока  $J_{1,1K}$ . После достижения определенного уровня  $J_{1,1K}$  (1,2 кА) катушки 1 шунтируются с помощью специального коммутатора<sup>1/</sup>. Возникающее различие в токах  $J_1$  и  $J_{1K}$  позволяет поддерживать  $n$  на заданном уровне  $\sim 0,5$  вплоть до включения последующих ступеней. Форма импульса тока второй ступени  $J_2$  близка к половине периода синусоиды. Длительность предимпульса тока третьей ступени превышает половину длительности тока второй. Как показали расчеты и эксперименты с пучком, для формирования  $n$ -траектории в момент включения предимпульса необходимо выпол-

нение условия  $\frac{dJ_{3n}}{dt} \approx 0$ , с по-

следующим нарастанием по закону  $J_{3n} \sim t^2$ . Переход к малым значениям  $n$  осуществлялся на конечном этапе сжатия ( $R_k < 10$  см), когда магнитное поле создавалось практически только с помощью основного импульса тока в третьей ступени.

Рис. 1. Модернизированная магнитная система адгезатора КУТИ-20.



Основные параметры ступеней сжатия приведены в таблице. Схемы формирования достаточно сложных по форме импульсов тока в первой и третьей ступенях практически аналогичны.

Таблица

Номер ступени	0	1	1К	2	3
Средний радиус, см	63,5	38	25,2	28	14,8
Расстояние от медианной плоскости, см	29,5	48	15,5	29	8,3
Количество витков	8	32	2	28	70
Амплитуда тока, А	2170	1900	2700	3600	5600
Амплитуда предимпульса, А	—	380	380	—	400
Длительность предимпульса, мс	—	4,5	4,5	—	1,1
Длительность импульса основного тока, мс	11	2,2	2,2	2,1	3,2
Время* включения предимпульса, мс	—	-4,35	-4,35	—	1,47
Время* включения импульса основного тока, мс	-5,5	0,15	0,15	1,45	2,05

\* Время включения дано от момента инжекции.

Для примера рассмотрим работу схемы импульсного питания третьей ступени (рис. 2). Предимпульс создается разрядом емкости  $C_n$  через тиристорный коммутатор  $T_n$  и дроссель насыщения  $D_n$  (в схеме питания первой и 1К-й обмоток вместо него использована линейная индуктивность) на  $L_3$ . Совместное действие индуктивной связи катушек второй и третьей ступеней и дросселя  $D_n$  обеспечивает требуемый закон нарастания  $J_{3n}$ . Основной импульс формируется при разряде емкости  $C_{3n}$  через коммутатор  $T_3$  на индуктивность  $L_3$ .

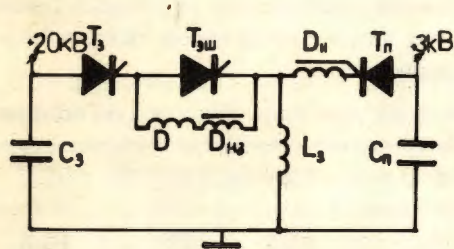


Рис. 2. Схема питания 3-й ступени сжатия.

Введение шунтируемых, с помощью ключа  $T_{3ш}$ , дросселей  $D$  и  $D_{3н}$  необходимо для плавного перехода от предимпульса к импульсу основного тока.

Рис. 3. Осциллограммы импульсов токов в 1-й, 1К-й, 2-й и 3-й катушках магнитной системы адгезатора. Масштаб по вертикали 1 кА/дел., развертка 1 мс/дел.

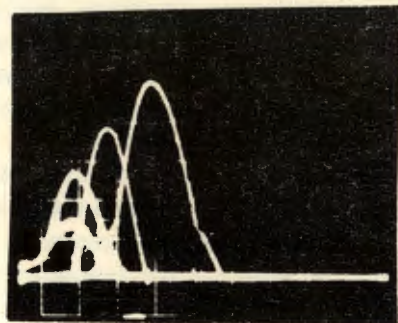
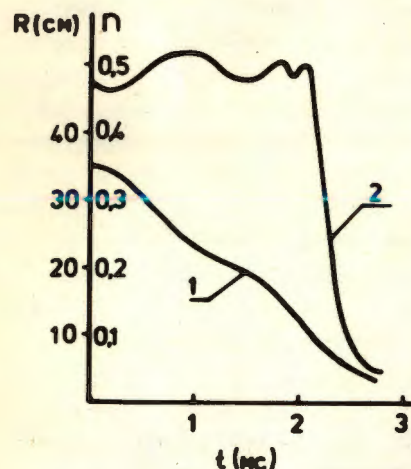


Рис. 4. Расчетные  $R$ ,  $n$ -траектории (1 -  $R$ ; 2 -  $n$ ).

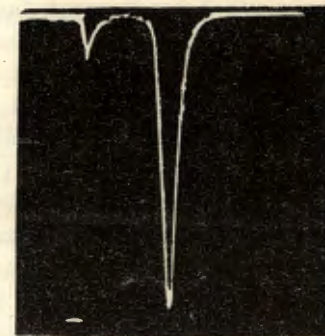
Данные, приведенные в таблице, получены после уточнения расчетных параметров в экспериментах по сжатию колец. На рис. 3, 4 показаны соответствующие этим параметрам осциллограммы токов и расчетные  $R$ ,  $n$ -траектории.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Переход на увеличенные значения показателя спада позволил существенно (до 200 А) повысить значение циркулирующего на начальной орбите тока. Получение максимальных интенсивностей потребовало также улучшения качества инжектируемого пучка, что было достигнуто при реконструкции источника электронов СИЛУНД-20<sup>1/2</sup> и инжекционного тракта.

Рис. 5. Осциллограмма сигнала детектора тормозного излучения. Развертка 1 мс/дел.



Как и ожидалось, выбор показателя спада при сжатии на уровне  $n \approx 0,5$  не привел к заметным ухудшениям параметров колец. Во всяком случае, потери частиц, ассоциируемые с разностным резонансом, не наблюдались. Это видно из приведенной на рис. 5 осциллограммы сигнала детектора тормозного излучения (ТИ). Последний импульс на ней соответствует разрушению кольца при уменьшении индукции внешнего магнитного поля. Его амплитуда является относительной характеристикой числа электронов в сжатом кольце. Предшествующий ему импульс появляется при снижении значения показателя спада от  $n \approx 0,5$  до  $n \approx 0,05$  и является следствием пересечения резонансов  $2Q_z + Q_R = 2$  ( $n \approx 0,36$ ) и  $2Q_z = 1$  ( $n \approx 0,25$ ). Здесь  $Q_{R,Z}$  — частоты радиальных и аксиальных бетатронных колебаний в единицах частоты обращения электронов.

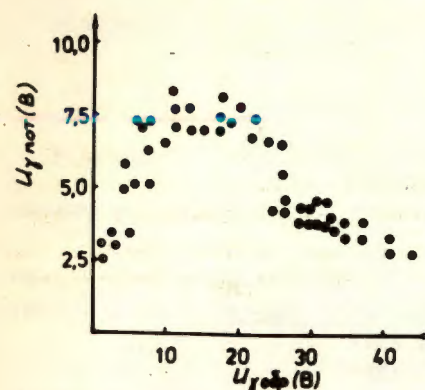


Рис. 6. Корреляционная зависимость между амплитудами сигналов детектора тормозного излучения при прохождении резонансов ( $U_{\gamma \text{ пот}}$ ) и при разрушении кольца в конце импульса тока 3-й ступени ( $U_{\gamma \text{ обр}}$ ).

Отличительной особенностью нового режима сжатия является уменьшение потерь частиц при пересечении резонансов при интенсивностях, близких к максимально достигнутой. На рис. 6 приведена корреляционная зависимость между амплитудами сигналов детектора ТИ в момент потерь и при разрушении кольца. Видно, что, начиная с некоторой интенсивности, потери уменьшаются. Это говорит о сильном влиянии на прохождение резонансов коллективных процессов, обусловленных фокусирующим действием накопленных ионов.

В настоящее время количество электронов в конце сжатия, измеренное по выходу СИ<sup>8.9</sup>, составляет  $N_0 = (4,0 \pm 2,0) \cdot 10^{12}$  при полуразмерах малого сечения  $a_{R,Z} = (3 \pm 1)$  мм. Таким образом, достигнут определенный прогресс в повышении интенсивности сжатого

кольца (в 1,5 - 2 раза) без заметного ухудшения размеров после пересечения резонансов. Вместе с тем для успешного проведения работ по ускорению двухкомпонентных колец необходимо увеличение плотности электронов еще в 1,5 - 2 раза. Отметим также, что дальнейший прогресс сдерживается имеющимися нестабильностями параметров сформированных колец (указаны статистические разбросы в  $N_e$  и  $a_{R, z}$ ), а также неудовлетворительным давлением остаточного газа  $P \approx 2,5 \cdot 10^{-7}$  Торр. При таком давлении и достигнутой плотности электронов доминирующим становится процесс накопления малозарядных ионов (вплоть до полной нейтрализации), у которых связь с кольцом является слабой.

Проведенные работы показали достаточную гибкость как магнитной системы, так и системы питания, позволившую быстро перейти на новый режим работы. Основным их недостатком на сегодняшний день является медленное сжатие в начале цикла, приводящее к значительным потерям частиц.

Это видно из сравнения максимальных достигнутых значений числа электронов на начальной орбите  $9 \cdot 10^{12}$  и в сжатом состоянии  $6 \cdot 10^{12}$ . Потери в резонансах не являлись определяющими при получении максимальных интенсивностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.С. и др. ОИЯИ, 9-83-613, Дубна, 1983
2. Алексахин Ю.И., Перельштейн Э.А. ОИЯИ, P9-12335, Дубна, 1979.
3. Азорский Н.И. и др. ОИЯИ, 9-88-224, Дубна, 1988.
4. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. М.: Атомиздат, 1979.
5. Александров В.С. и др. В сб.: Труды XIII Международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий. Новосибирск: Наука, 1987, т.1, с.241.
6. Алексахин Ю.И. ОИЯИ, Б1-9-87-573, Дубна, 1987.
7. Алексахин Ю.И., ОИЯИ, P9-86-608, Дубна, 1986.
8. Казаринов Н.Ю. и др. В сб.: Коллективные методы ускорения. ОИЯИ, Д9-82-664, Дубна, 1982, с.16.
9. Мальцев А.А. ОИЯИ, 9-86-289, Дубна, 1986.
10. Тютюнников С.И. и др. В сб.: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Д9-87-105, Дубна, 1987, т.1, с.406.

Рукопись поступила в издательский отдел  
15 июня 1988 года.

#### НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

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

Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. (2 тома)	7 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р. 00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р. 80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике Алушта, 1986.	4 р. 50 к.
—	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. (2 тома)	13 р. 50 к.
Д1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. (2 тома)	7 р. 35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. (2 тома)	13 р. 45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986.	7 р. 10 к.
Д2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа - 86". Дубна, 1986.	4 р. 45 к.
Д4-87-692	Труды Международного совещания по теории малочастичных и кварк-адронных систем. Дубна, 1987.	4 р. 30 к.
Д2-87-798	Труды VIII Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1987.	3 р. 55 к.
Д14-87-799	Труды II Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом. Дубна, 1987	4 р. 20 к.
Д17-88-95	Труды IV Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1987.	5 р. 20 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.

P9-88-423

Формирование электронно-ионных колец в магнитной системе адгезатора КУТИ-20 с увеличенным значением показателя спада

Представлены результаты перевода магнитной системы адгезатора КУТИ-20 в режим сжатия электронно-ионного кольца в магнитном поле с показателем спада  $n \approx 0,5$ . Новый режим работы позволил увеличить число электронов в сжатом кольце. Приведены данные экспериментов по формированию кольца на начальном радиусе, прохождению резонансов бетатронных колебаний, а также параметры сжатых колец.

Работа выполнена в Общественном научно-методическом отделении ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С.Виноградовой

Aleksandrov V.S. et al.

P9-88-423

Electron-Ion Ring Forming in the KUTI-20 Adhezator Magnetic System with Increased Field Index Value

The results of modernization of KUTI-20 adhezator magnetic system for the electron-ion ring compression in magnetic field with field index value approximately equal 0.5 are presented. This variant of the magnetic system operation regime allowed one to increase the electron number in the compressed ring. The experimental data on ring forming at initial radius, on crossing the betatron oscillation resonances and compressed electron ring parameters are given.

The investigation has been performed at the Scientific-Methodical Division of High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988