

В.С.Александров, И.И.Голубев, Г.В.Долбилов, Л.В.Дубовик, В.Д.Инкин,
В.И.Казача, Н.И.Лебедев, А.В.Мажулин, В.И.Миронов, В.П.Николаев,
В.А.Петров, В.Н.Разувакин, В.П.Рашевский, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев,
А.И.Сидоров, В.А.Тимохин, С.И.Тютюнников, А.А.Фатеев, В.Н.Шалапин,
А.С.Шеулин, Б.Г.Шинов

Объединенный институт ядерных исследований

Дубна, 141980

Коллективный ускоритель тяжелых ионов /КУТИ-20/ состоит из линейного индукционного ускорителя - СИЛУНД-20, установки для формирования электронно-ионных колец и их предварительного ускорения - Адгезатора и линейного ускорителя электронных колец - ЛУЭК-20 /рис.1/. Автоматизированные системы управления ускорителем и диагностики пучка имеют централизованную иерархическую структуру с автономными подсистемами и используют ЭВМ СМ-4, микро-ЭВМ "Электроника-60" и КМ 001.

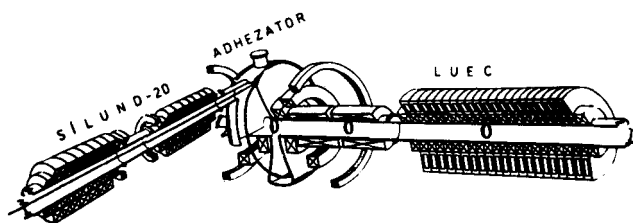


Рис.1. Схема КУТИ-20.

Ускоритель СИЛУНД-20 /рис.2/ обеспечивает ускорение пучка электронов с током 800 А до энергии 2,5 MeV. Источник электронов плазменного типа использует разряд в протяженном газовом канале с градиентом давления от катода к аноду 1,2. Источник электронов конструктивно совмещен с первой секцией ускорителя. В индукционной системе СИЛУНД-20 используются ферритовые сердечники марки 200НН2 диаметром 250 мм. Особенностью схемных решений высоковольтных генераторов ускоряющего напряжения является усиление импульсной мощности. Усиление осуществляется путем сжатия электромагнитной энергии во времени /уменьшение длительности импульса при сохранении его энергии/ 2,3. Каждый из пяти модуляторов ускорителя формирует на нагрузке $0,5 \Omega$ импульсы: напряжения $U_L = 17 \text{ kV}$, тока $J_L = 35 \text{ кА}$ - длительностью $t = 20 \text{ ns}$ с частотой посылок $f = 50 \text{ Hz}$.

Для стабилизации задержек импульсов генераторов с точностью $\sim 1 \text{ ns}$ разработана автоматизированная система стабилизации зарядного напряжения. Нестабильность напряжений на емкостных накопителях энергии не превышает $0,1\%$ 4.

Удержание радиальных размеров пучка в ускорительном тракте осуществляется магнитной системой соленоидального типа с индукцией $B \approx 0,1 \text{ T}$

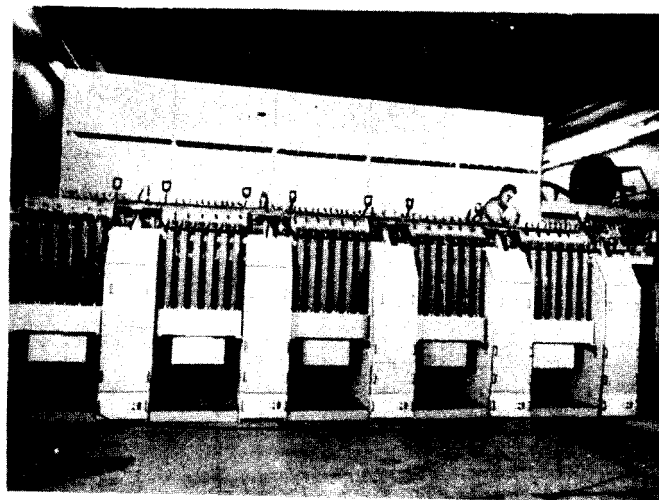


Рис.2. Ускоритель СИЛУНД-20.

Адгезатор /рис.3/. Электронный пучок инжектируется на радиус 40 см с помощью инфлектора. Радиус равновесной орбиты $R = 35 \text{ см}$. Когерентные колебания пучка компенсируются корректирующим устройством, расположенным в узле радиальных бетатронных колебаний. После прохождения корректора траектория пучка совпадает с равновесной орбитой. Быстрый спад импульса ТЕМ-волны корректора $\sim 1 \text{ ns}$ обеспечивает захват пучка длительностью, соответствующей одному обороту частиц на равновесной орбите. Сжатие сформированного кольца электронов осуществляется нарастающим во времени магнитным полем. Величина индукции магнитного поля на конечном радиусе кольца составляет $B = 2 \text{ T}$. Импульсная система питания позволяет в одном цикле сжатия дважды использовать запасенную в конденсаторах энергию - при их разряде и перезарядке. Система охлаждения Адгезатора рассчитана на отвод тепловой мощности до 200 kW /при частоте посылок 20 Hz /. Обмотки последней ступени сжатия ускоряющего соленоида и стенки титановой вакуумной камеры Адгезатора охлаждаются трансформаторным маслом, которое одновременно является изолирующей средой.

Потери частиц при сжатии устраняются выбором $n(r)$ - траектории кольца. При правильной настройке магнитной системы изменение размеров кольца соответствует адиабатическому процессу сжатия. Конечные размеры кольца $R \approx 3 \text{ см}$, $a_{r,z} \approx 2 \text{ мм}$. На рис.4 приведено распределение интенсивности синхротронного излучения по сечению кольца.

лучения по сечению кольца.

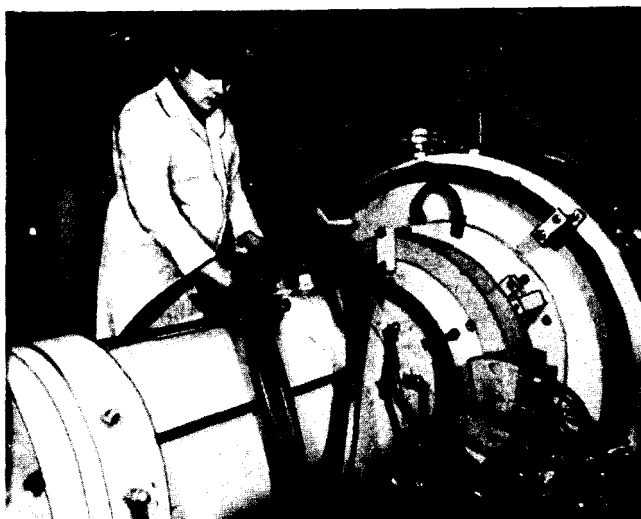


Рис.3. Адгезатор-20

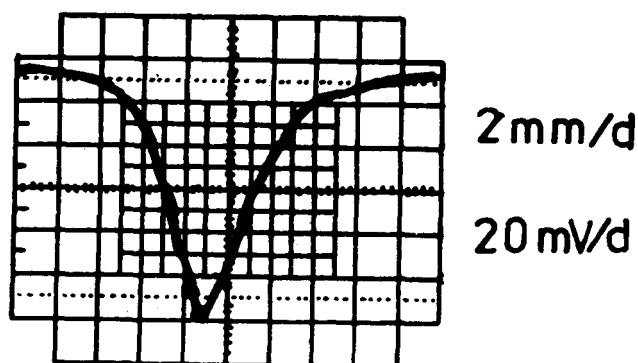


Рис.4. Распределение интенсивности синхротронного излучения по сечению кольца

Накопление ионов в электронных кольцах происходит при столкновении нейтралов с мишенью, облученной лазером, либо при сжатии кольца в определенной газовой среде. Зарядность захваченных в кольцо ионов растет со временем.

При выполаживании магнитной ямы и переводе кольца в режим предварительного ускорения в спадающем по длине магнитном поле неизбежно прохождение единичного резонанса $\nu_r = 1$. Действие резонанса сводится к радиальному дрейфу электронно-ионного кольца. Величина дрейфа существенно уменьшается ($\Delta r < 1 \pm 2 \text{ mm}$) при быстром ($\sim 10^{-7} \text{ s}$) прохождении резонанса

или путем компенсации первой гармоники магнитного поля. Быстрое снятие ямы дополнительным витком использовалось также для синхронизации вывода кольца с линейным ускорителем ЛУЭК⁵.

Ускорение колец. Начальное ускорение происходит в градиентном магнитном поле ускоряющего соленоида⁵. Средняя величина ускоряющего градиента равна $0,23 \text{ T/m}$. Набор энергии в магнитной ускоряющей системе

$$\xi = \frac{Mc^2}{2} \cdot \frac{G_m L}{1 + \xi}, \quad /1/$$

где $G_m = (1/B_z) (\partial B_z / \partial z)_m$ - среднее значение относительного градиента, $\xi = \Delta MN_1 / (m \gamma N_0) \gg 1$ - коэффициент массовой загрузки кольца,

L - длина ускорения. Для КУТИ-20 $\xi \approx Mc^2 / (7,3 \cdot \xi)$, $\xi > 40$.

Основное ускорение колец осуществляется во внешнем электрическом поле $E_{вн}$. ЛУЭК-20 - линейный ускоритель индукционного типа - формирует однородное электрическое поле напряженностью $E_{вн} \approx 10 \text{ kV/cm}$. Применение нелинейных схем усиления мощности позволило создать генераторы ускоряющего напряжения /модуляторы/ с параметрами^{5,6}:

мощность в импульсе	$P = 5 \text{ GW}$
напряжение на нагрузке $0,5 \Omega$	$U_L = 50 \text{ kV}$
ток в нагрузке	$J_L = 100 \text{ kA}$
длительность импульсов	$t \approx 80 \text{ ns}$
частота посылок	$f = 20 \text{ Hz}$
	$f_{max} = 50 \text{ Hz}$

Схема генератора и его конструкция приведены на рис.5 и 6, где: 1 - коммутатор (тиратрон ТГИ1-2500/50), 2 - накопительная емкость, 3 - каскад предварительного усиления мощности, 4 - оконечные каскады усиления и формирования, 5 - нелинейные линии-обострители, 6 - индукторы. Нагрузочная характеристика модулятора представлена на рис.7.

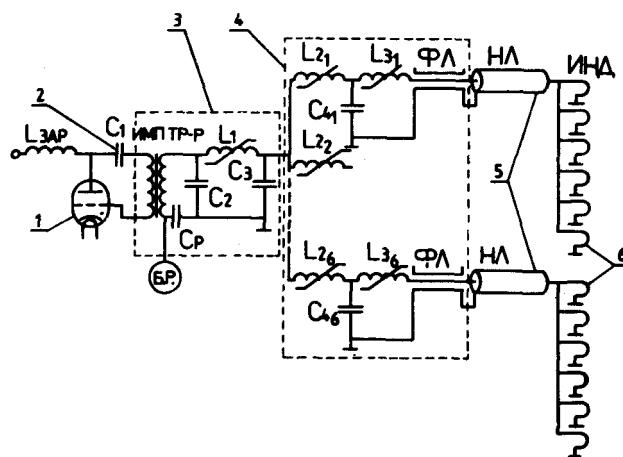


Рис.5. Схема модулятора ЛУЭК-20.

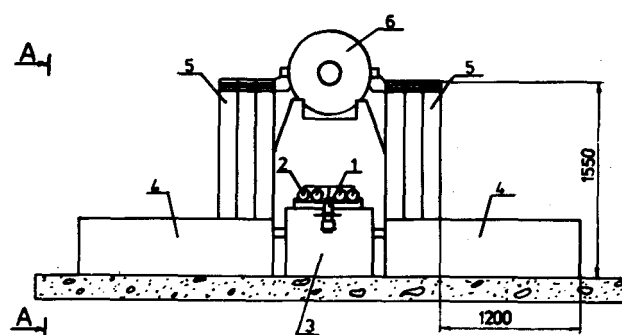


Рис.6. Конструкция модулятора ЛУЭК-20.

В состав первой очереди ЛУЭК-20 входят 3 ускоряющие секции, 3 модулятора и 42 импульсных генератора тока для формирования ведущего магнитного поля. Ведущее магнитное поле создается с помощью катушек, встроенных в каждый из 36 индукторов секции. Величина индукции поля $\sim 1,4 \text{ T}$. Секции заполнены трансформаторным маслом, которое служит изолято-

ром и теплоносителем. В межсекционных участках производится вакуумная откачка и наблюдение за кольцом при его пролете. Однородность магнитного поля в межсекционных участках не

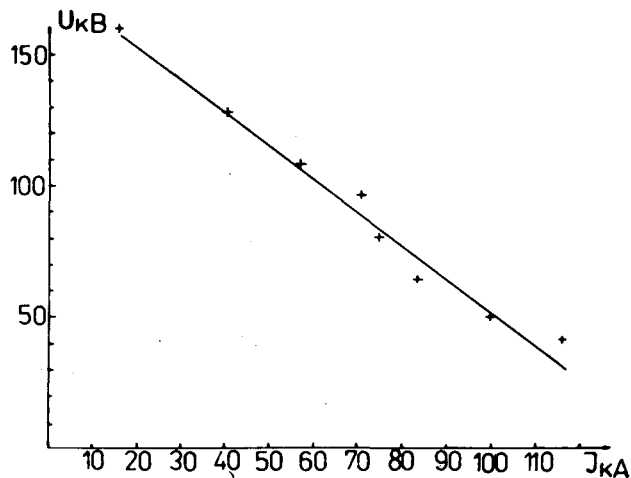


Рис. 7. Нагрузочная характеристика модулятора ЛУЭК-20.

хуже 1% ($\partial B_z / \partial z \leq 0,2 \text{ Т/м}$)⁷. Внешний вид ускорителя колец ЛУЭК-20 приведен на рис. 8.

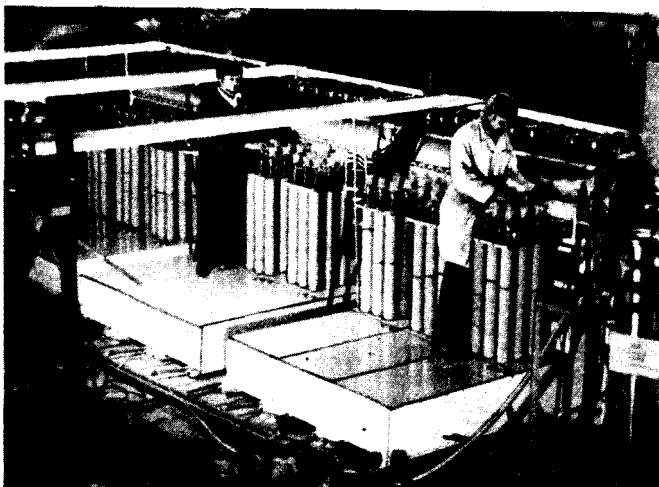


Рис. 8. Первая очередь ЛУЭК-20.

В результате предварительной наладки ускоряющей системы ЛУЭК-20 получены параметры, близкие к расчетам. Измерения скорости электронного кольца по времени пролета показали, что прирост энергии продольного движения составляет $1,5 \pm 1,8 \text{ MeV}$ на секцию и соответствует напряженности электрического поля

$\sim 10 \text{ кВ/см}$. В настоящее время проводятся работы по физическому запуску первой очереди КУТИ-20 в режиме ускорения ионов азота.

В первых экспериментах измерялось время пролета кольцом секций ЛУЭК-20 по синхротронному излучению электронов, регистрируемому в межсекционных камерах ускорителя.

Скорость дрейфа кольца, ускоренного в градиентном соленоиде, составляет $V_z / c = 0,07 \pm 0,01$. Поскольку продольная скорость электронного кольца без ионов в этом случае должна быть равной $V_z / c \approx 0,5$, следует, что увеличение эффективной массы кольца обусловлено наличием ионов. Из величины скорости можно определить энергию ионов, которая равна $\mathcal{E} = 2,3 \pm 0,6 \text{ MeV/нуклон}$. Коэффициент массовой загрузки кольца для такой энергии ионов составляет $\xi \approx 60$, что при

$N_e = 5 \cdot 10^{12}$ соответствует числу ионов азота $N_i \sim 4 \cdot 10^{11}$.

Прирост энергии ионов при ускорении кольца в электрическом поле ЛУЭК-20, определяемый по уменьшению времени пролета, составляет $\Delta \mathcal{E} \approx 0,8 \pm 1 \text{ MeV/нуклон}$ н.о.н. секцию.

Дальнейшие работы на ускорителе направлены на оптимизацию режимов работы с целью получения проектных параметров ускоренного пучка.

Литература

1. Г.В.Долбилов и др. Исследование источника электронов ускорителя СИЛУНД-20.—Сообщение ОИЯИ, Р9-82-70,—Дубна, 1982.
2. Г.В.Долбилов и др. Коллективный ускоритель тяжелых ионов КУТИ-20. СИЛУНД-20, системы управления, контроля и диагностики.—Сообщение ОИЯИ, Р9-83-307,—Дубна, 1983.
3. Б.Г.Горин и др. Экспериментальное исследование систем индукционного ускорителя с повышенной цикличностью СИЛУНД-П.—Сообщение ОИЯИ, 9-12148,—Дубна, 1979.
4. Г.В.Долбилов и др. Система стабилизированной резонансной зарядки модуляторов ускорителя СИЛУНД-20.—Препринт ОИЯИ, 9-85-424,—Дубна, 1984.
5. В.С.Александров и др. Ускорительный комплекс тяжелых ионов в ОИЯИ.—Сообщение ОИЯИ, Р9-83-613,—Дубна, 1983.
6. Г.В.Долбилов и др. Модулятор линейного индукционного ускорителя электронно-ионных колец ЛУЭК-20.—Препринт ОИЯИ, Р9-86-156,—Дубна, 1986г.
7. В.С.Александров и др. Система формирования ведущего магнитного поля линейного индукционного ускорителя электронно-ионных колец ЛУЭК-20.—Сообщение ОИЯИ, 9-86-157,—Дубна, 1986.