

# ПЕРВАЯ ОЧЕРЕДЬ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ КУТИ-20

В.С.Александров, И.И.Голубев, Г.В.Долболов, 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.Шаляпин,  
А.С.Шеулин, Б.Г.Щинов

Объединенный институт ядерных исследований

Дубна, 14.1980

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.

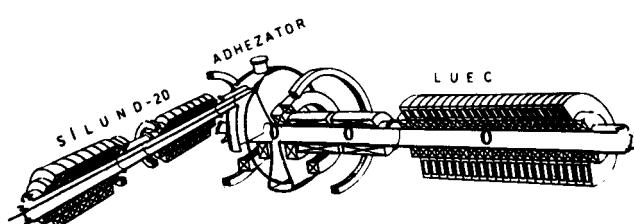


Рис.1. Схема КУТИ-20.

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 200Н2 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  $J_L = 35 \text{ kA}$  - 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  $0,1\%$ .

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

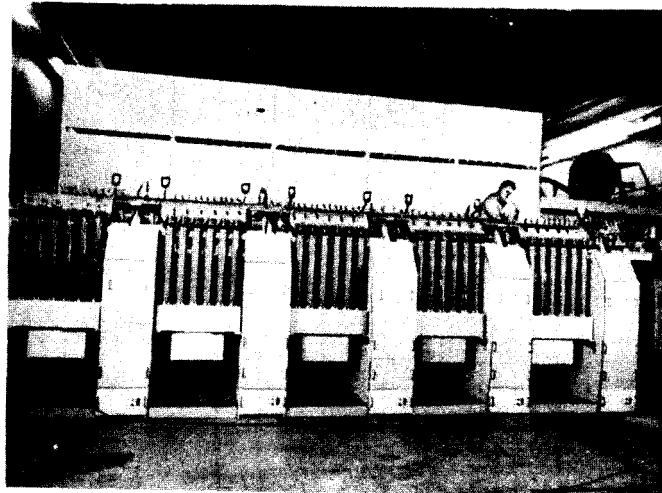


Рис.2. Ускоритель СИЛУНД-20.

Адгезатор /рис.3/. Электронный пучок инжектируется на радиус 40 см с помощью инфлектора. Радиус равновесной орбиты  $R = 35 \text{ cm}$ . 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  $n(r)$  - траекторий кольца. При правильной настройке магнитной системы изменение размеров кольца соответствует адиабатическому процессу сжатия. Конечные размеры кольца  $R \approx 3 \text{ cm}$ ,  $a_{1,2} \approx 2 \text{ mm}$ . На рис.4 приведено распределение интенсивности синхротронного излучения по сечению кольца.

лучения по сечению кольца.

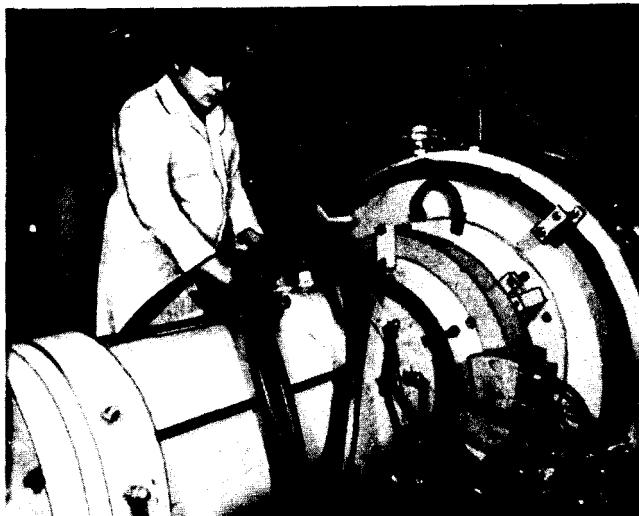


Рис.3. Адгезатор-20

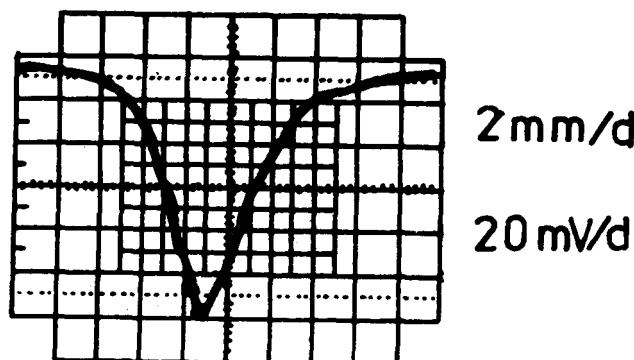


Рис.4. Распределение интенсивности синхротронного излучения по сечению кольца

Накопление ионов в электронных кольцах происходит в результате "жажда" "нейтралов с мешани", облученной лазером, либо при сжатии кольца в определенной газовой среде. Зарядность захваченных в кольце ионов зависит от времени.

При выполнении 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 ЛУЭК<sup>5</sup>.

Ускорение колец. Начальное ускорение происходит в градиентном магнитном поле ускоряющего соленоида <sup>5</sup>. 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,  $\xi = MN_1 / (mN_e) \gg 1$  - коэффициент массовой загрузки кольца,

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

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

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

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.

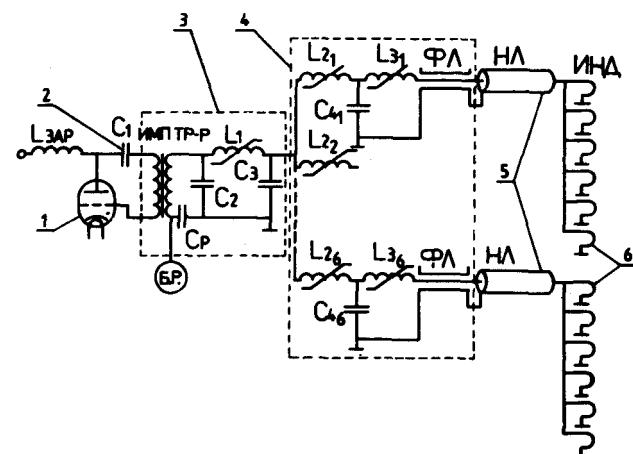


Рис.5. Схема модулятора ЛУЭК-20.

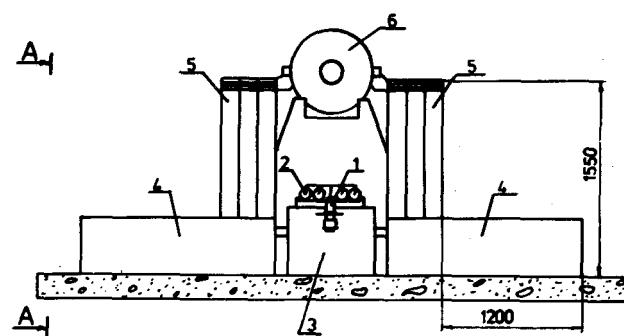


Рис.6. Конструкция модулятора ЛУЭК-20.

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 секций. 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

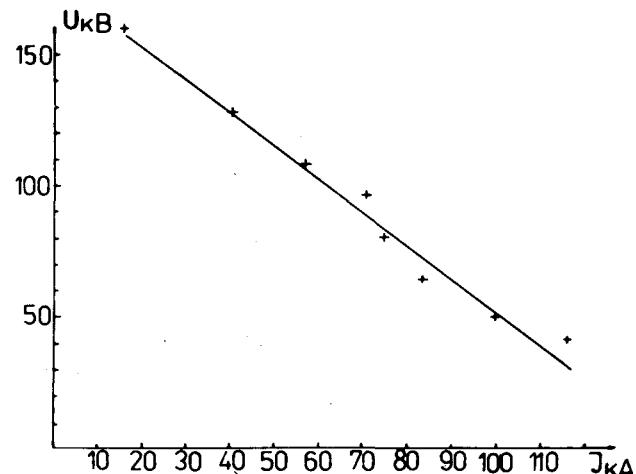


Рис. 7. Нагрузочная характеристика модулятора ЛУЭК-20.

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

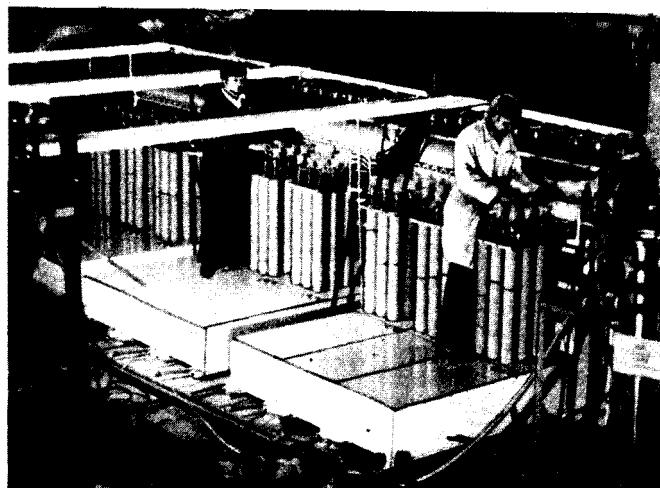


Рис. 8. Первая очередь ЛУЭК-20.

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  $E = 2,3 \pm 0,6 \text{ MeV}$  / 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  $\Delta E \approx 0,8 \pm 1 \text{ MeV}$  / нуклон на секцию.

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

#### Литература

- Г.В.Долбилов и др. Исследование источника электронов ускорителя СИЛУНД-20.-Сообщение ОИЯИ, Р9-82-70.-Дубна, 1982.
- 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.
- Б.Г.Горинов и др. Экспериментальное исследование систем индукционного ускорителя с повышенной цикличностью СИЛУНД-П.-Сообщение ОИЯИ, 9-12148.-Дубна, 1979.
- Г.В.Долбилов и др. Система стабилизированной резонансной зарядки модуляторов ускорителя СИЛУНД-20.-Препринт ОИЯИ, 9-85-424.-Дубна, 1984.
- В.С.Александров и др. Ускорительный комплекс тяжелых ионов в ОИЯИ.-Сообщение ОИЯИ, Р9-83-613,-Дубна, 1983.
- Г.В.Долбилов и др. Модулятор линейного индукционного ускорителя электронно-ионных колец ЛУЭК-20.-Препринт ОИЯИ, Р9-86-156.-Дубна, 1986г.
- 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.