

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

97-86

P9-97-86

О.Н.Борисов, С.Б.Ворожцов, Г.Г.Гульбекян, Г.А.Карамышева,  
Н.А.Морозов, Е.В.Самсонов, И.Франко

ЦИКЛОТРОННАЯ ЛАБОРАТОРИЯ (CyLab)  
ПРИ СЛОВАЦКОМ МЕТРОЛОГИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ

1997

Базовой установкой проекта "CyLab" (Словакия) является изохронный циклотрон, на котором предполагается получать выведенные пучки ионов от  $H^+$  до  $He^{+40}$ , ускоренные до энергий  $70 \pm 1.3$  МэВ/нуклон с интенсивностью  $10^{13} \pm 10^{11} \text{ c}^{-1}$  [1].

### Выбор параметров циклотрона

Для выбора параметров циклотрона оценивались потери на диссоциацию  $H^-$  - ионов по формулам работы [2]. Расчеты показали, что при ускорении пучка  $H^-$  - ионов до 70 МэВ предельно большим полем в холме следует считать величину 1.88 Тл. При таком значении поля интенсивность пучка на выходе составляет не менее 95% от его интенсивности в центре.

Исходя из этого был предложен вариант циклотрона с радиусом вывода – 1.1 м, секторными шиммами без спиральности, средним полем в центре 1.05 Тл, средним полем на радиусе вывода 1.12 Тл, разностью магнитных полей в холме и долине Вхолм – Вдол = 1.2 Тл. Для таких параметров были получены зависимости от радиуса: требуемой амплитуды вариации поля (на конечном радиусе достигающей 0.6 Тл), которая предполагалась одинаковой как для протонов, так и для дейтронов; изохронного поля (протоны ускоряются до 70 МэВ, дейтроны ускоряются до 60 МэВ); диаграммы бетатронных частот даны на рис.1.

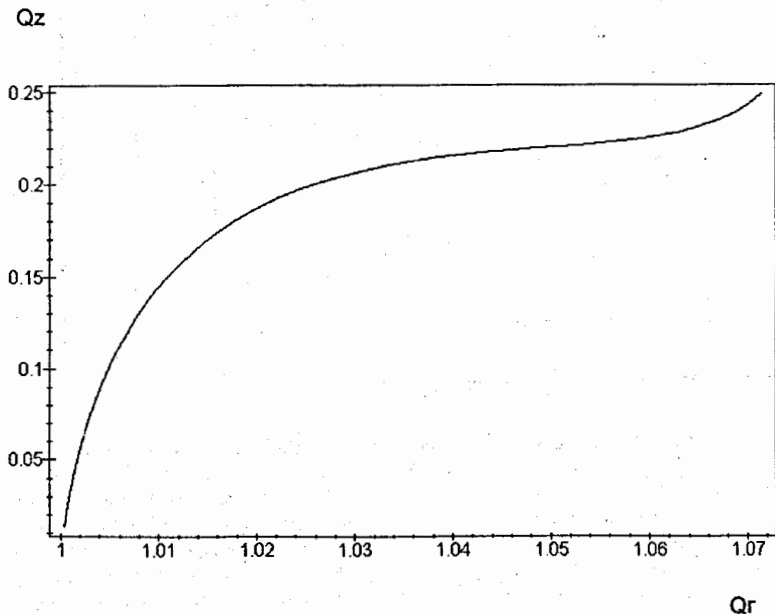
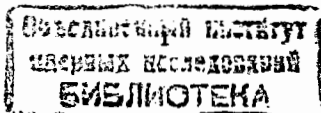


Рис.1. Диаграмма частот ( $H^-$  - ионы).



Потери на диссоциацию оценивались для двух наборов энергий на обороте: 110 кэВ и 210 кэВ. В обоих случаях интенсивность пучка на выходе достаточна и соответственно составляет 99.5%, 99.99% от его интенсивности в центре.

### Ускорение тяжелых ионов

Максимальная энергия ионов на выходе изохронного циклотрона определяется двумя параметрами  $K_b$  и  $K_f$ . Параметр  $K_b$  характеризует способность магнита циклотрона удерживать частицу радиально и определяется средним магнитным полем циклотрона на радиусе вывода. Параметр  $K_f$  характеризует способность магнитного поля фокусировать пучок ионов аксиально и определяется при отсутствии спиральности относительной амплитудой вариации поля на радиусе вывода. Максимальная энергия на нуклон на выходе циклотрона определяется по формулам:

$$T_{\max}/A = K_b \cdot (Z/A)^2 \quad \text{при } Z/A < K_f/K_b$$

$$T_{\max}/A = K_f \cdot Z/A \quad \text{при } Z/A > K_f/K_b$$

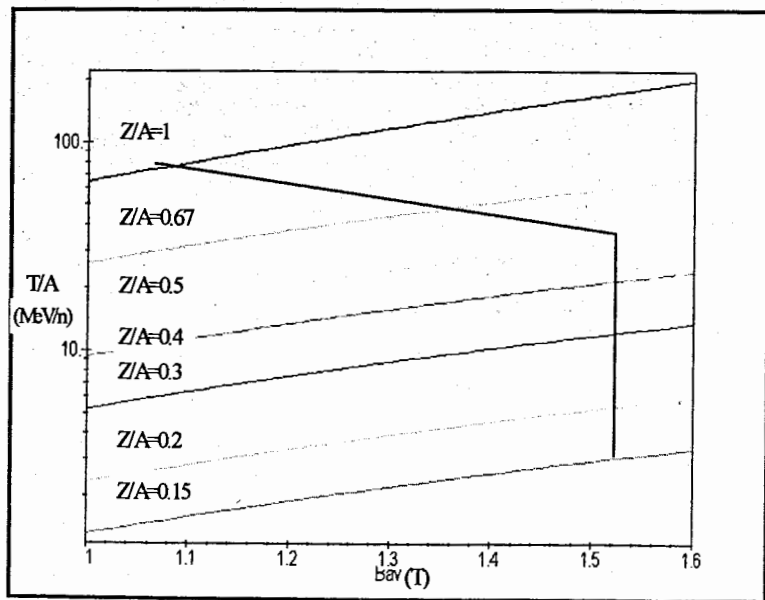


Рис.2

Для данного ускорителя достаточно  $K_b=135$  МэВ, что при радиусе вывода 1.1 м соответствует средней величине магнитного поля  $B=1.525$  Тл. Фокусирующая константа  $K_f$  равна 70 МэВ. Это означает, что для частиц с  $Z/A < K_f/K_b = 0.519$  максимальная энергия ионов ограничивается максимальным средним полем, а для частиц с  $Z/A > 0.519$  - фокусирующей способностью ускорителя. На рис.2 даны зависимости энергии иона на нуклон  $T/A$  от среднего магнитного поля  $B_{\text{ав}}$ . Жирные линии ограничивают максимальную энергию

ионов, семь кривых соответствуют различным  $Z/A$ , минимальное значение  $Z/A=0.15$  соответствует тяжелым ионам с небольшим зарядом, а максимальное  $Z/A=1$  -  $H^-$  - ионам. Минимальный уровень магнитной индукции определяется мощностью корректирующих обмоток. Диапазон ускоряемых частиц ограничивается диапазоном частоты и кратностью ускорения.

### Структура магнита

Для выбора оптимальных размеров ядра и обмотки магнита искали минимум целевой функции, учитывающей затраты на материалы (железо, медь) и расходы на электроэнергию.

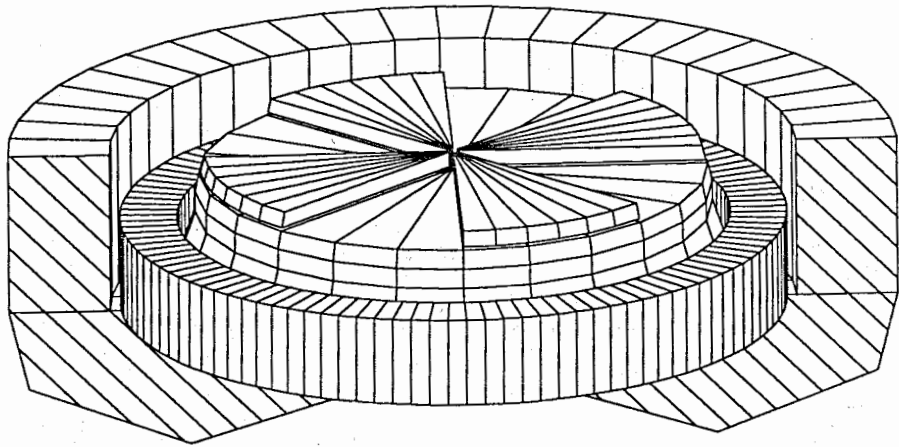
Известно, что радиус вывода частиц в изохронном циклотроне, как правило, составляет 85% от радиуса полюса магнита. Исходя из этого факта, радиус полюса и конечный радиус шимм были выбраны равными  $110.0/0.85 \approx 128$  см.

С учетом этих требований путем расчетов по программе POISCR был проведен выбор параметров магнита и магнитной системы для этого циклотрона. Определяющим для выбора структуры секторов является получение в случае отсутствия спиральности необходимого уровня вариации 0.6 Тл на конечном радиусе  $R_k=1.1$  м при среднем поле 1.12 Тл. Максимальное рабочее среднее поле на конечном радиусе составляет 1.5 Тл. Расстояние от сектора до медианной плоскости  $h_1$  равнялось 2 см, для размещения системы корректирующих обмоток между секторами и полюсом магнита был введен зазор 1.5 см. Для этой модели были проведены расчеты для четырех значений аксиального размера секторов  $h_2=7, 7.5, 8.5, 9.5$  см. Из этих расчетов следует, что необходимая вариация поля 0.6 Тл обеспечивается для  $h_2=7.5$  см.

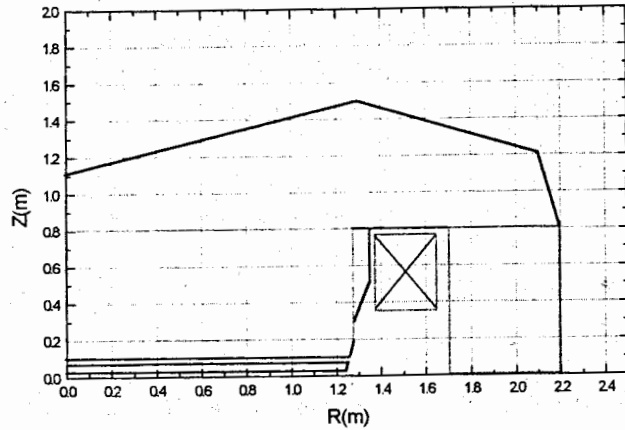
Была рассчитана структура магнита бронзового типа. В современных условиях капитальные затраты на ферромагнитный материал для ядра магнита и медь для обмотки возбуждения составляют лишь несколько процентов от затрат на оплату электроэнергии за 30-40 лет работы циклотрона. Поэтому увеличение массы железа и меди даже в 2 раза является экономически оправданным, если это приводит к снижению энергопотребления магнита в 2 раза. Исходя из последних соображений, при выборе формы ядра магнита для уровня магнитного поля в рабочем зазоре 1.5 Тл мы стремились обеспечить значение индукции в железе на уровне, не превышающем 1.8 Тл, а значение плотности тока в проводнике при этом - на уровне  $\approx 1$  А/мм<sup>2</sup>. С учетом этих обстоятельств путем расчета для нескольких конфигураций магнита выбрана геометрия магнита, изображенная на рис.3,4. Основные параметры магнита приведены в таблице 1.

Для базового режима:  $H^-$ , 70 МэВ при среднем поле 1.12 Тл в обмотке возбуждения рассеивается мощность только  $\approx 7.5$  кВт, что, по всей видимости, даст возможность эксплуатации магнита в этом режиме без использования воды для охлаждения.

Как показал опыт расчетов по программе POISCR, ее результаты получены с точностью 10-15% и должны быть уточнены при помощи трехмерных расчетов. Однако принципиального влияния на выбор параметров магнита это не оказывает, существенно будет только воздействие на способ шиммирования поля и выбор параметров корректирующих обмоток. Предполагается использовать 10 корректирующих обмоток, потребляемая мощность которых 15 кВт.



а



б

Рис.3. Геометрия магнита.

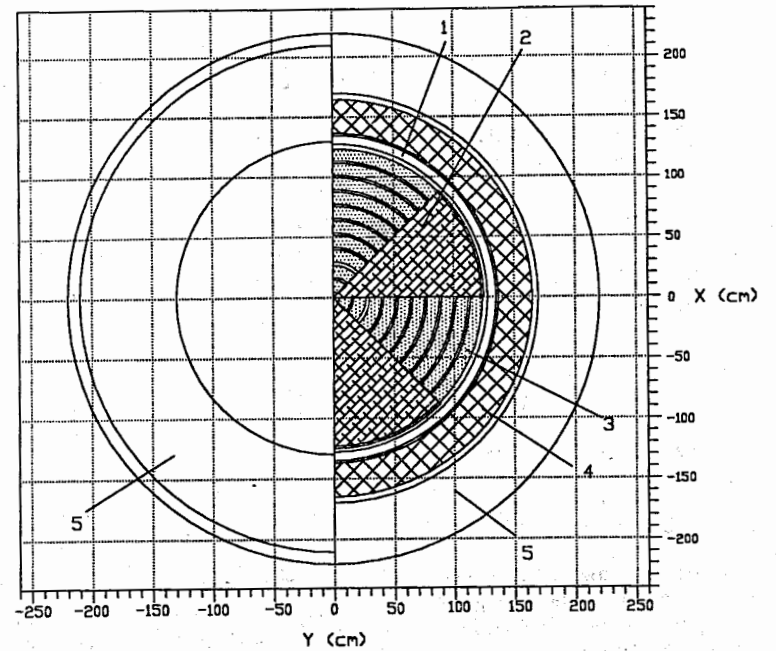


Рис.4. Вид сверху. (1 - полюс, 2 - сектор, 3 - коррект.обмотки, 4 - основная обмотка, 5 - ярмо.)

Таблица 1

Среднее магнитное поле на $g=Rk$	1.12±1.5 Тл
Вхолм-Вдолина на $g=Rk$	1.2 Тл
Радиус вывода пучка	1.1 м
Эмиттанс пучка прот. из источника	150 $\mu\text{мм}\cdot\text{мрад}$
Частота генератора	16±30 МГц
Кратность ускорения	1, 2, 3, 4
Диаметр полюса	2.56 м
Высота магнита	3 м
Диаметр магнита	4.4 м
Вес железа	265 т
Сечение обмотки возбуждения	0.28×0.44 м <sup>2</sup>
Тип проводника	Cu, 18.5×18.5 мм <sup>2</sup> , $\varnothing$ 10 мм
Количество витков в одной обмотке	14×16=224
Вес меди	10.2 т
Число ампер-витков для поля 1.5 Тл на полюс	70000
Рабочий ток для поля 1.5 Тл	312 А
Плотность тока в проводнике	1.2 А/мм <sup>2</sup>
Мощность коррект. обмоток	15 кВт
Мощность в основных обмотках при поле 1.5 Тл	28.5 кВт
Общая мощность магнита	43 кВт
Угловая протяж сектора	45°
Угол спиральности	0°

## Система вывода

Целесообразно использовать вывод перезарядкой на фольге. Это позволит выводить легкие ионы  $H^-$ ,  $D^-$ ,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$  со 100% эффективностью для широкого диапазона энергий, а также тяжелые ионы при коэффициенте перезарядки  $z2/z1 \geq 2$  ( $z1$  - заряд ускоряемого иона,  $z2$  - заряд выведенного иона). В таблице 2 представлены некоторые ионы, которые могут быть выведены перезарядкой.

Таблица 2

Ускоряемые ионы	Выводимые ионы	Энергия (МэВ/нукл.)	Козффициент вывода (%)
$H^-$	$H^+$	50 ÷ 70	100
$D^-$	$D^+$	20 ÷ 30	100
$H_2^+$	$2 \times H^+$	20 ÷ 35	100
$H_3^+$	$3 \times H^+$	15	100
$O_{16}^{+4}$	$O_{16}^{+8}$	4 ÷ 10	≈25
$Ne_{20}^{+4,+5}$	$Ne_{20}^{+10}$	3 ÷ 10	≈16
$Xe_{132}^{+20}$	$Xe_{132}^{+40}$	1 ÷ 3	≈20

Существует принципиальная возможность вывода и при меньших  $z2/z1$ , но в этом случае возникает сложность с выводом в заданном направлении. Необходимо либо увеличивать диапазон перемещения фольги, либо дополнительный отклоняющий магнитный канал.

## Заключение

Полученные результаты по выбору параметров изохронного циклотрона могут быть использованы как стартовые условия для согласования параметров систем ускорителя и развития общей концепции разрабатываемой установки.

## Литература

- [1] G.Gulbekyan "Proposed Version of Cyclotron". Report at the First International Workshop on the National Cyclotron Center of Slovak Republik. Casta-Papiernicka, March 31- April 1, 1996.
- [2] R.T.Lee Calculation on the Electro-magnetic Dissociation of  $H^-$ , Vancouver, B.C., Canada, TRI-DN-89-32

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 марта 1997 года.