

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



B-191

Д9 - 11584

4723 / 2-78

А.А. Васильев, А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов,
В.П. Желепов, В.П. Дмитриевский,
Н.Л. Заплатин, В.В. Кольга, Н.Б. Рубин

ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ УСКОРЕНИЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ
ДО РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЙ

1978

Д9 - 11584

А.А.Васильев, А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов,
В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский,
Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга, Н.Б.Рубин

ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ УСКОРЕНИЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ
ДО РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЙ

*Направлено на VIII Международную конференцию
по циклотронам и их применению /Бламингтон, США, 1978/*



Васильев А.А. и др.

Д9 - 11584

Циклотронный комплекс для ускорения многозарядных ионов до релятивистских энергий

Рассмотрен ускорительный комплекс для получения пучков многозарядных ионов вплоть до урана с конечной энергией до 300 МэВ/нукл. Предусматривается использование линейного ускорителя типа Видероза на начальном участке ускорения (до 0,59 МэВ/нукл.), далее - изохронного секторного циклотрона с обычными обмотками (до 10 МэВ/нукл.) и в качестве последней ступени ускорения - секторного циклотрона со сверхпроводящими обмотками. Выбранная структура ускорительного комплекса обеспечивает высокую интенсивность ускоренного пучка как для конечной энергии 300 МэВ/нукл. ($\sim 10^{13}$ ионов в секунду для урана), так и для промежуточной энергии, равной 10 МэВ/нукл. ($\sim 10^{14}$ ионов в секунду для урана).

Приведены ориентировочные параметры отдельных ступеней ускорительного комплекса.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Vasilyev A.A. et al.

D9 - 11584

A Cyclotron Complex for Accelerating Multicharged Ions up to Relativistic Energies

The accelerating complex for the production of the multicharged ion beams up to uranium with a final energy of 300 MeV/amu is described. It is supposed to use a Wideroe type accelerator at the first stage of acceleration (up to 0.59 MeV/amu), a conventional isochronous cyclotron at the second stage (up to 10 MeV/amu) and an isochronous cyclotron with superconducting magnet coils at the final stage. Such a structure of the accelerating complex provides high beam intensity at the full energy of 300 MeV/amu (about 10^{13} particles per second for uranium) and the intermediate energy of 10 MeV/amu (about 10^{14} particles per second for uranium). Some preliminary parameters of the accelerator are presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna 1978

ВВЕДЕНИЕ

Повышенный интерес к использованию многозарядных ионов широкого спектра масс в исследованиях по релятивистской ядерной физике привел к разработке и реализации многочисленных проектов ускорительных установок на энергии от $6 \div 8$ МэВ/нукл. до релятивистских энергий в диапазоне $2 \div 10$ ГэВ/нукл.

В области околорелятивистских энергий /до ~ 10 МэВ/нукл./ в качестве ускорительных установок с одинаковым успехом используются циклотроны и линейные ускорители.

Для энергии $2 \div 10$ ГэВ/нукл., как правило, используются ранее созданные протонные синхротроны при соответствующей перестройке частотного диапазона и улучшении вакуумных условий, обеспечивающих длительный /секунды/ процесс ускорения без изменения зарядности иона^{4/}.

Переход от непрерывного или квазинепрерывного пучка многозарядных ионов /в циклотронных и линейных ускорителях/ к импульсному режиму /в синхротронах/ обусловил уменьшение интенсивности пучков приблизительно на три-четыре порядка, что определяется отношением времени инжекции к полному циклу магнитного поля синхротрона. Так как время инжекции /многооборотной/ трудно сделать больше 100 мкс, а полный цикл магнитного поля измеряется десятками долей и единицами секунд, то указанный фактор снижения будет характерен для всех синхротронов, даже без учета вакуумных потерь. Для случая однооборотной инжекции в синхротрон интенсивность дополнительно снизится еще на два порядка.

Несмотря на указанное снижение интенсивности многозарядных ионов при ускорении в синхротронном режиме, в области энергий $2 \div 10$ ГэВ/нукл. при современном состоянии развития ускорительной техники этот режим представляется наиболее целесообразным, так как предельный радиус (\bar{R}) при достижимых индукциях магнитного поля составляет десятки метров.

$$\xi \cdot \bar{R} \cdot \bar{B} = \frac{\sqrt{2W_n \cdot E_{op} + W_n^2}}{ec}, \quad /1/$$

где $\xi = q/A$, q - относительный заряд иона, W_n - энергия на нуклон, E_{op} - энергия покоя нуклона, \bar{B} - средняя индукция магнитного поля. Из выражения /1/ следует, что величина магнитной жесткости $\bar{B} \cdot \bar{R}$ для энергии 10 ГэВ/нукл. и $\xi = 0,5$ составляет 73 Т·м.

В случае линейного ускорителя со средним погонным набором энергии на заряд U_0 для достижения энергии на нуклон W_n необходима длина

$$L = \frac{W_n}{\xi U_0}. \quad /2/$$

Для реальных величин $U_0 \approx 1 \div 3$ МэВ/м при $\xi \leq 0,5$ длина линейного ускорителя будет больше 10 км.

Однако в области средних энергий ($300 \div 400$ МэВ/нукл.) ускорение многозарядных ионов в синхротронном режиме не является оптимальным, так как для этого диапазона энергий могут быть созданы приемлемые по габаритам циклические ускорители, работающие в непрерывном режиме. В частности, на базе сверхпроводящих магнитов с напряженностью поля $4 \div 5$ Т возможна разработка циклотронной установки, работающей в непрерывном режиме, на энергию $300-400$ МэВ/нукл. при среднем радиусе ускорения, не превышающем $4 \div 4,5$ м. При этом предельные плотности заряда пучка (κ) для одинаковых частиц, при равных эмиттансах и энергиях в циклотронных и синхротронных установках, будут относиться как

$$\frac{\kappa_{II}}{\kappa_c} = \frac{Q_{II}}{Q_c} \left(\frac{q_c \cdot \bar{R}_c}{q_{II} \cdot \bar{R}_{II}} \right)^2, \quad /3/$$

где Q_{II} и Q_c - соответствующие частоты свободных колебаний.

Из соотношения /3/ следует, что даже для слабофокусирующих циклотронных систем ($Q_{II} < 1$) допустимая плотность заряда будет в несколько раз превышать синхротронную.

Таким образом, учитывая отсутствие макроскважности, что приводит к увеличению интенсивности до трех порядков, а также большую предельную плотность пучка, необходимо признать существенные преимущества циклотронной установки со сверхпроводящими обмотками для ускорения тяжелых ионов вплоть до урана в указанной области энергий / ~ 300 МэВ/нукл./.

На современном этапе ограничение интенсивности циклотронного комплекса будет определяться возможностями ионных источников, которые, однако, при невысокой степени ионизации могут обеспечить токи до десятков миллиампер. Для увеличения зарядности ионов в процессе ускорения могут быть использованы хорошо разработанные /теоретически и экспериментально/ механизмы обдирки на твердых или газообразных мишенях^{/5/}.

Эти соображения были положены авторами в основу предлагаемого варианта циклотронного комплекса многозарядных ионов.

Наряду с принципиальными соображениями, изложенными выше, существенную роль для выбора типа ускорителя играют:

- а/ трудоемкость изготовления комплекса в целом;
- б/ эксплуатационные и энергетические затраты при непрерывной работе ускорителя;
- в/ количество эксплуатационного персонала;
- г/ календарное время разработки и сооружения такого комплекса.

На стадии физического обоснования на перечисленные выше вопросы нельзя ответить с удовлетворительной степенью точности, однако опыт сооружения и эксплуатации циклотронных и синхротронных установок

в СССР и за рубежом показывает, что циклотронные системы отличаются относительной простотой, что облегчает их изготовление и эксплуатацию. Энергопотребление циклотронного комплекса в случае использования сверхпроводящих обмоток основного магнита будет весьма невелико.

1. ПОЛУЧЕНИЕ ИОНОВ ВЫСОКОЙ ЗАРЯДНОСТИ

Существующие в настоящее время источники многозарядных ионов, такие как источник типа Пеннинга (PIG)^{6/}, электронно-циклотронного резонанса (ECR)^{7/} или электронно-лучевой (EBIS)^{8/}, обеспечивают относительно высокую зарядность ионов /вплоть до $q \approx 13 \div 14/$, однако выход многозарядных ионов быстро падает с увеличением зарядности. Так, например, для источника PIG процентный состав ионов данной зарядности падает приблизительно как 2^q с максимальным выходом ионов $5 \div 7$ зарядностей. Для СВЧ-источника с электронным циклотронным резонансом и источника типа EBIS максимум выхода ионов может быть смещен на $2 \div 4$ заряда, однако при дальнейшем увеличении зарядности выход падает более резко.

Основной характеристикой, определяющей выход ионов, является фактор ионизации $n_e \cdot \tau$, где n_e - плотность потока ионизирующего электронного тока, τ - время удержания иона в электронном потоке^{9/}.

Предельные значения фактора ионизации для различных типов источников приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 следует, что фактор ионизации твердой /или газообразной / перезарядной мишени практически недостижим для источников непрерывного действия. Источники импульсного действия могут приближаться по эффективности к обдирочным мишеням, однако они не пригодны для циклотронных режимов ускорения ионов.

Зависимость равновесного заряда (\bar{q}) от энергии иона при обдирке на твердой мишени приведена на рис.1.

тип источника	$n_e \cdot \tau$
PIG	$7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$
ECR	10^{18} см^{-2}
"Крион"	$2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$
Мишень (твердая или газовая)	$6 \cdot 10^{23} \frac{Z}{A} \rho d$

d - толщина мишени /см/,
 ρ - плотность мишени /г/см³ /,
 Z, A - номер и вес атомов мишени.

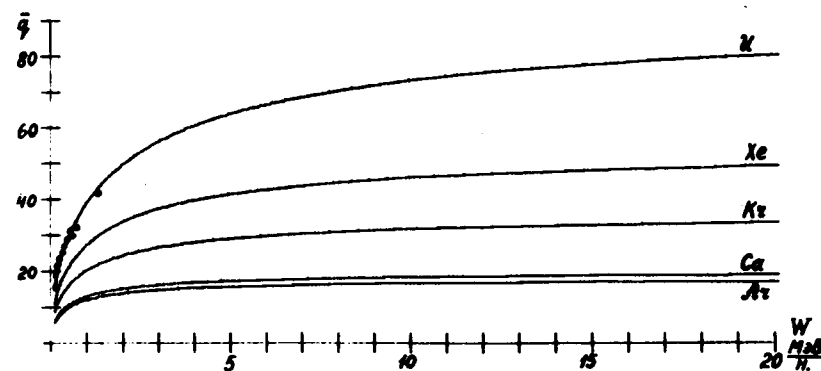


Рис. 1. Зависимость равновесного заряда от энергии иона при обдирке на твердой мишени.

Этот заряд определен по формулам^{/10/}

$$\bar{q}/z_0 = [1 + (v/3,6 \cdot 10^8 \cdot z_0^{0,45})^{-1,667}]^{-0,6}$$

$$v = c \sqrt{1 - (1 + W_n / E_{op})^{-2}}, \quad /4/$$

z_0 - заряд ядра атома.

Имеющиеся экспериментальные точки^{/5,10/}, нанесенные на графики, указывают на возможность использования расчетных данных при проектных работах.

Ширина зарядового распределения пучка и относительное количество ионов равновесного заряда после прохождения через мишень соответственно равны^{/11/}:

$$d = 0,5 \sqrt{\bar{q} [1 - (\bar{q}/z_0)^{1,667}]},$$

$$\epsilon = \frac{1}{d\sqrt{2\pi}} \int_{-0,5}^{0,5} \exp\left[-\frac{(z-\bar{q})^2}{2d^2}\right] dz. \quad /5/$$

Значения этих величин для двух стадий обдирки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Ион	\bar{q}_1	d_1	ϵ_1	\bar{q}_2	d_2	ϵ_2	$\epsilon_1 \cdot \epsilon_2$
U	34	2,62	0,15	73	2,42	0,17	0,025
Xe	23	2,33	0,17	46	3,08	0,13	0,022
Kr	18	2,04	0,19	32	2,53	0,16	0,03
Ar	10	1,25	0,31	17	0,62	0,58	0,18

Из таблицы 2 следует, что интенсивность пучка с равновесными зарядом (\bar{q}_1) будет составлять ~ 30% для легких ионов и уменьшается до ~ 15% для тяжелых ионов вплоть до U.

Для получения равновесного заряда ионов при $\beta < 0,1$ толщины мишеней выбирают в пределах^{/11/} ~ 10 ÷ 100 мкг/см², что позволяет использовать как твердые (10 ÷ 40 мкг/см²), так и газовые (~ 100 мкг/см²) мишени. Потери энергии, а также увеличение эмиттанса пучка при прохождении таких толщин пренебрежимо малы.

В настоящее время уже работающие источники позволяют получать низкозарядные состояния ионов с интенсивностью, превышающей 10^{14} (U^{+7} с интенсивностью $7 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$)^{/12/}. При двукратном прохождении через мишень /твердую или газовую/ предельное уменьшение интенсивности пучка на основании вышеприведенных расчетов не превысит коэффициента 50, то есть интенсивность ионов с максимальной зарядностью на выходе ускорительного комплекса может достигать 10^{13} с^{-1} .

Отметим, что метод получения ионов тяжелых элементов с промежуточным ускорением и перезарядкой принят в проекте ускорения урана на "Суперхайлаке". Из источника получают U^{+7} , затем с помощью секции ускорителя Видероз увеличивают энергию ионов от 12 до 113 кэВ/нукл. После перезарядки U^{+11} инжектируют в "Суперхайлак". Выигрыш в интенсивности U^{+11} - около 100 ^{/12/}.

Таким образом, схема получения высокозарядных ионов с промежуточным ускорением и последующей перезарядкой на мишени обладает несомненными преимуществами по сравнению с ионизацией до высокого заряда непосредственно в ионном источнике.

2. УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Минимальная энергия ускоренных ионов должна превышать кулоновский барьер для всех элементов периодической системы. Численно эта величина лежит в пределах 6 ÷ 10 МэВ/нукл.

Энергия 10 МэВ/нукл. , определяющая уровень первой стадии ускорения, кроме ядерно-физических требований диктуется условиями вторичной ионизации иона, которая при дальнейшем циклотронном ускорении должна быть близка к максимальной ($\bar{q} \lesssim z_0$). Таким образом, оптимальная схема циклотронного комплекса для ускорения ионов вплоть до урана должна состоять из следующих установок:

а/ источника ионов низкой зарядности для получения высокой интенсивности первичного пучка, для урана заряд иона равен семи (U^{+7});

б/ линейной ускоряющей системы, обеспечивающей необходимую энергию нуклона для получения /после первой перезарядки/ равновесного заряда, достаточного для ускорения в циклотроне до энергии 10 МэВ/нукл. /в данном случае эта энергия выбрана $0,59 \text{ МэВ/нукл.}$;

в/ циклотронной установки первой стадии ускорения;

г/ циклотронной установки второй стадии ускорения, позволяющей получить энергию 300 МэВ/нукл. для всех ионов.

Схема такого комплекса приведена на рис. 2. Ионным источником может служить любой источник непрерывного или квазинепрерывного действия, который обеспечивает средний ток ионов на уровне 1 мА . Такие токи не являются рекордными для известных ионных источников, в частности наиболее распространенный источник типа PIG полностью удовлетворяет этому требованию.

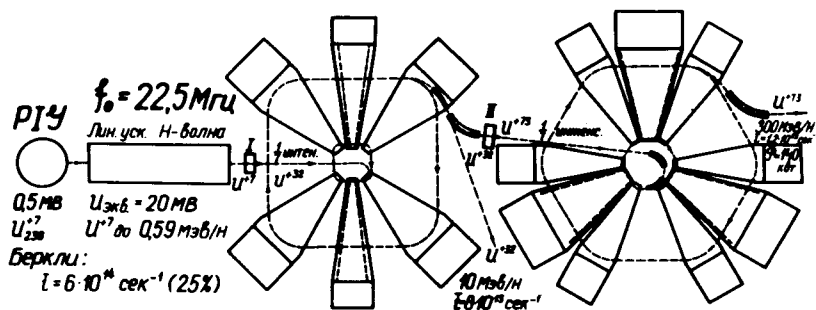


Рис.2. Общая схема ускорительного комплекса.

Источник установлен на платформе форинжектора с потенциалом $0,5 \text{ МВ}$, обеспечивающим начальную энергию U^{+7} равной $14,7 \text{ кэВ/нукл.}$

Наиболее предпочтительным инжектором для первого циклотрона является линейный ускоритель типа Видероз, ускоряющая система которого лучше других приспособлена для работы в непрерывном или квазинепрерывном /~ 25 ÷ 30%/режимах на частотах в диапазоне $20 \div 30 \text{ МГц}$. Прототипом такого ускорителя могут служить две первые секции ускорителя Видероз в ускорительном комплексе "Унилак"^{/13/}. Исходя из характеристик этих секций, можно ориентировочно оценить значения параметров линейного ускорителя-инжектора, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3

№№	Наименование параметра линейного ускорителя	Величина
1.	Изменение энергии иона при ускорении (кэВ/нукл.)	15 → 590
2.	Изменение скорости иона (%)	0,56 ± 3,54
3.	Частота ускоряющей системы (МГц)	22,5
4.	Средняя напряженность на зазорах дрейфовых трубок (кВ/см)	60
5.	Шунтовое сопротивление (МОм/м)	50 + 60
6.	ВЧ-потери в макроимпульсе (МВт)	0,4 + 0,6
7.	Длина (м)	12 + 15
8.	Суммарное эффективное напряжение (МВ)	20
9.	Макроскважность (%)	25 ± 100
10.	Нормализованный эмиттанс (см.мрад)	(0,1 → 0,17)
11.	Равновесная фаза	-30 °

Основные параметры магнитов для двух ступеней ускорения приведены в *таблице 4*.

Таблица 4

№№	Наименование параметра секторного магнита	I ступень	II ступень
1.	Число секторов системы	4	6
2.	Начальный радиус (см)	75	75
3.	Конечный радиус (см)	460	440
4.	Угловая протяженность полюса (градусы)	28	20
5.	Межполюсный зазор (см)	8	10
6.	Индукция (Т)	1,7+1,9	4,5+5,0
7.	Высота магнита (см)	600	800
8.	Ширина магнита по ярму (см)	240	370
9.	Длина магнита (см)	700	700
10.	Вес одного сектора (т)	500	1000
11.	Ампервитки на сектор	$250 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^6$
12.	Мощность питания (кВт)	125	—
13.	Запасенная энергия на сектор (МДж)	—	20

Магнитные системы комплекса, как это следует из схемы /рис. 2/, состоят из секторных магнитов, которые при прямолинейных образующих обеспечивают необходимую жесткость фокусировки ионов в заданном диапазоне энергий.

Прототипами предложенного ускорителя I ступени могут служить такие изохронные циклотроны, как: VICKSI /K=120/, GANIL /K=400/, Oak - Ridge /K=440/, со- оружаемые в настоящее время^{2-14/}.

В последнее время разработан ряд проектов изохронных циклотронов с использованием сверхпроводящих обмоток /например, Michigan, Chalk River //^{15/}. В этих ускорителях вариация поля в средней плоскости достигается с помощью секторных накладок на цилиндрических

полюсах Ш-образного магнита с одной парой концентрических сверхпроводящих обмоток. Принятые схемы магнитных систем обеспечивают слабую фокусировку в аксиальном направлении.

Предполагаемая магнитная система II ступени комплекса ускорения /рис. 3/, состоящая из шести секторных магнитов, в отличие от упомянутых выше, обеспечивает жесткую фокусировку пучка в обоих направлениях. Угловая протяженность полюсного наконечника, равная 20° , выбрана исходя из требований, предъявляемых как к магнитной /глубина вариации, среднее поле/, так и к высокочастотной /кратность ускорения/ системам ускорителя. Увеличение поперечного сечения магнитопровода /см. рис. 3/ необходимо для снижения требуемого количества ампервитков обмотки возбуждения электромагнитов.

На основании опубликованных данных по созданным и проектируемым сверхпроводящим обмоткам на постоянных токах плотность тока, усредненная по сечению катушки, включая вакуумный кожух, принята равной 25 А/мм^2 ^{15/}. В этом случае поперечные размеры катушки составят $\sim 20 \times 80 \text{ см}^2$. Обмотки могут быть выполнены из провод-

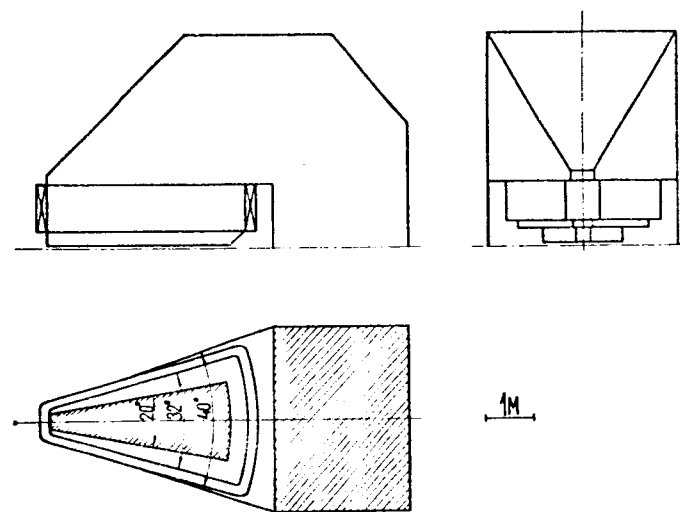


Рис.3. Сектор магнитной системы второго циклотрона.

ника размерами $2 \times 3,5$ мм², содержащего 300 сверхпроводящих жил из NbTi-50 с предельным током ~2,3 кА. Примером конструктивного решения может служить катушка магнита пузырьковой камеры ЦЕРНа^{/16/}.

Формирование среднего магнитного поля может быть обеспечено профилированием зазора и установкой шимм на боковых поверхностях полюсного наконечника. Для создания требуемой конфигурации поля в центральной области может быть использован обратный магнитопровод, который также будет помогать разгружать конструкцию от усилий, действующих на полюс. Приведенные в таблице 4 параметры секторных магнитов должны уточняться при детальной проработке и моделировании секторов магнитов как первой, так и второй ступени. Высокочастотная ускоряющая система циклотронов должна обеспечивать прирост энергии ускоряемых частиц ~1 МэВ/оборот на единичный заряд в диапазоне радиусов ~0,9 ÷ 4,3 м. В рассматриваемом случае оптимальной является высокочастотная система /ВЧ/, состоящая в первом циклотроне из двух, а во втором - из трех резонаторов с ускоряющими электродами в виде Δ -образных дуантов.

Магнитная система второго ускорителя, образованная шестью секторами 20-градусной угловой протяженности в медианной плоскости, позволяет разместить в межсекторном пространстве ускоряющие электроды только 30-градусной протяженности. Набор энергии в электроде будет максимальным при кратности $q=6$, однако по соображениям динамики ускорения приходится ограничиваться $q=3$ и, следовательно, набором 0,707 от максимального. Рабочая частота при этом равна 22,5 МГц. Такой рабочей частоте соответствует 14-я кратность в первом ускорителе, и для обеспечения максимального набора энергии угловая протяженность ускоряющего электрода должна быть ~13°. Как в первом, так и во втором ускорителях диапазон рабочих радиусов составляет примерно четверть длины волны ускоряющего напряжения, что приводит к необходимости использовать полуволновую резонансную систему с вертикальным расположением резонансных линий. Во избежание значительного изменения напряжения вдоль ускоряющей кромки и для уменьшения мощности ВЧ-потерь стембель резонансной

линии должен иметь радиальную протяженность, сравнимую с радиальными размерами Δ -электрода.

Мощность ВЧ-потерь в резонаторах в значительной мере будет определяться емкостью между Δ -электродом и наружным электродом, и поэтому необходимо принять меры к максимальному ее уменьшению.

В первом ускорителе расстояние между магнитами таково, что ускоряющий зазор может быть образован кромкой Δ -электрода и выступами из наружных стенок резонатора /рис. 4/. При этом основную роль играет

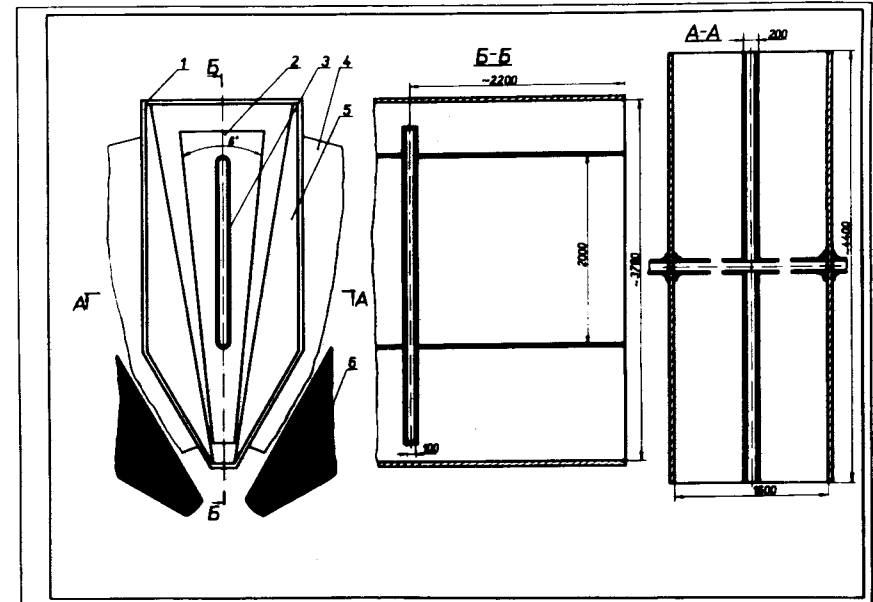


Рис.4. Высокочастотный ускоряющий резонатор первого циклотрона: 1 - наружная стенка резонатора; 2 - Δ -электрод; 3 - стембель Δ -электрода; 4 - ускоряющая камера; 5 - выступы, формирующие ускоряющее поле; 6 - сектор магнита.

емкость боковых кромок, образованная емкостью ускоряющей щели и горизонтальных частей Δ -электродов, а также выступов, к ним примыкающих. Если допустить,

что для ускоряющего напряжения с амплитудой 250 кВ минимальный ускоряющий зазор /при R_{\min} / равняется 5 см, то угловая протяженность зазора α составит $5 \cdot 10^{-2}$ рад. Угол пролета в щели будет равняться 40° а фактор времени пролета $F = 0,98$, что является вполне приемлемым. Расчетная емкость при таком α составит ~ 140 пкФ. Емкость задней и передней кромок может быть найдена с помощью выражений, приведенных в ^{17/} и составит ~ 20 пкФ. Если принять, что ширина центрального электрода линии равняется 2 м, а зазор в линии равен 0,7 м, то резонансная длина линии /каждой из половинок/ будет 2,2 м, а мощность потерь в линиях составит около 40 кВт.

В резонаторах второго ускорителя для уменьшения мощности потерь целесообразно профилировать наружный электрод в соответствии с вертикальным профилем магнита и сделать переменной ширину внутреннего электрода /рис. 5/. Расчет емкости электрода при $\alpha = 5^\circ$ приводит

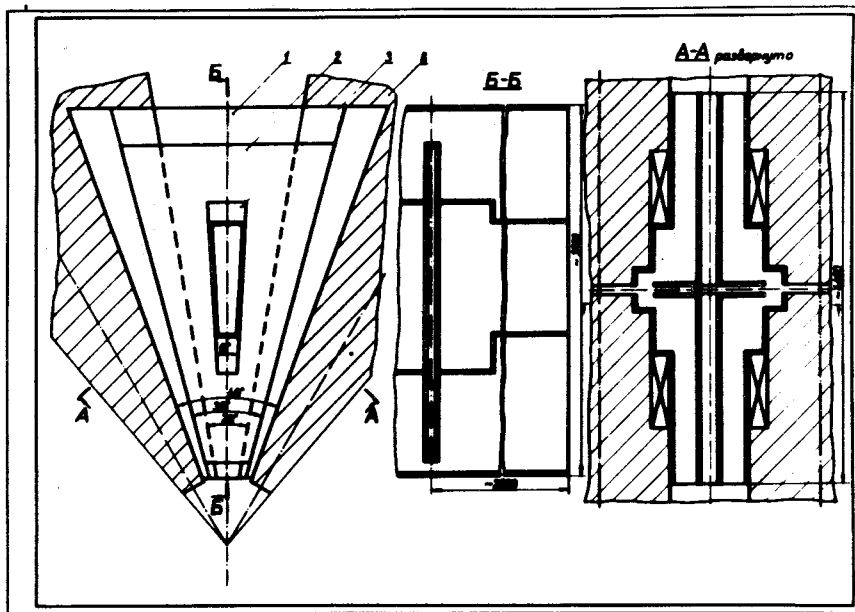


Рис. 5. Высокочастотный ускоряющий резонатор второго циклотрона. Обозначения те же, что и на рис. 4.

к значению $C \approx 200$ пкФ. Резонансная длина линии и суммарная мощность потерь в линиях будут равняться $\sim 2,2$ м и 80 кВт соответственно. Мощность потерь в Δ -электродах составит около киловатта для первого ускорителя и около двух киловатт для второго.

Работоспособность ускорительного комплекса тяжелых ионов, состоящего из нескольких каскадов, с системами перевода ионов и согласования характеристик всех входящих в комплекс устройств может быть обеспечена применением достаточно развитой системы управления. Большой опыт построения таких систем накоплен при сооружении протонных синхротронов на большие энергии /CERN, FNAL, ИФВЭ и др./. На этих ускорительных комплексах, также состоящих из нескольких каскадов ускорения /форинжектор - линейный ускоритель - бустерный синхротрон - основной синхротрон/, созданы и успешно эксплуатируются системы управления иерархического типа с широким использованием ЭВМ как в качестве накопителей информации о режимах работы всех систем ускорителя, так и для глубокого анализа по поступающим сигналам всех аспектов режима ускорения и автоматического управления характеристиками ряда основных систем синхротрона. Опыт показал целесообразность построения таких систем с "двух- и "трехэтажной" структурой. Системы управления отдельных ступеней ускорения и ряда важнейших узлов ускорителя строятся на автономных ЭВМ малого или среднего класса. Управление всем ускорительным комплексом с центрального пульта осуществляется с помощью большой ЭВМ, оснащенной дисплейными системами и системами связи со всеми подсистемами младших уровней. Ускорительный комплекс тяжелых ионов состоит из ряда "стандартных" устройств, широко применяющихся в экспериментальных физических лабораториях. Устройства управления ионных источников, форинжектов, линейных ускорителей, изохронных циклотронов уже в той или иной степени проработаны или реализованы. Следовательно, задача разработки комплексной системы управления в значительной мере может базироваться на уже имеющемся положительном опыте и представляется вполне реализуемой. Обо-

рудование, необходимое для реализации системы, сейчас также имеется. Малые и средние ЭВМ третьего поколения, такие как серия машин ЕС, по функциональным возможностям и степени надежности вполне удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям. Получивший в последнее время широкое развитие в ядерной электронике стандарт КАМАК позволяет строить гибкие системы связей ЭВМ с датчиками сигналов и исполнительными элементами на основе стандартизированной, выпускаемой серийно системы электронных блоков. Это существенным образом сокращает время разработки и реализации как отдельных подсистем, так и всего комплекса управления в целом. Появление в последнее время элементной базы четвертого поколения/ микропроцессоров, интегральных элементов памяти и т.д./ приведет к дальнейшему сокращению объема и удешевлению всех основных узлов систем управления.

Основные параметры двухкаскадного циклотронного комплекса для ускорения тяжелых ионов приведены в *таблице 5*.

Как это следует из *таблицы 5*, система вывода пучка из первого ускорителя легко реализуется с помощью известных типов железно-токовых каналов¹⁸/ септумы которых лежат в пределах $4 \div 6$ мм. При радиальном шаге 2,6 см и эмиттансах внутреннего пучка, не превышающих $\sim \pi$ см·град, имеет место полное разделение орбит на конечном радиусе и коэффициент вывода будет близок к 100%. Для второй стадии ускорения требуется увеличение разделения замкнутых орбит приблизительно в 10-20 раз, что реализуется с помощью эффекта расширения замкнутых орбит на предельных радиусах при уменьшении вариации основной гармоники на $5 \div 10\%$ ¹⁹.

Специальных требований к вакуумной системе из-за малого количества оборотов при ускорении /70 и 980/ не предъявляется. При вакууме в камере на уровне 10^{-7} Тор перезарядные явления будут пренебрежимо малы.

Согласование оптических свойств пучка между линейным ускорителем и первым циклотроном, а также между первым и вторым циклотронами осуществляется с помощью квадрупольных линз и поворотных магнитов. Меж-

ду первым и вторым циклотронами располагается анализирующий магнит, отделяющий ионы с нерезонансным зарядом для работы на физический эксперимент.

Приведенные выше параметры ускорительного комплекса многозарядных ионов /см. *табл. 5*/ будут уточ-

Таблица 5

№№	Параметр	I -й циклотрон	II -й циклотрон
1.	Радиус инжекции (м)	1,04	0,93
2.	Радиус вывода пучка (м)	4,3	4,15
3.	Средняя напряженность магнитного поля при инжекции (Т)	0,784	1,60
4.	Средняя напряженность на конечном радиусе (Т)	0,792	2,11
5.	Ведущая частота ускорения (МГц)	22,5	22,5
6.	Кратность ускорения	14	3
7.	Набор энергии за оборот ($\frac{\text{МэВ}}{\text{заряд}}$)	1,0	1,0
8.	Радиальный шаг в зоне вывода пучка (см)	2,4	0,13
9.	Конечная энергия ($\frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$)	10	300
10.	Энергия инжекции " "	0,59	10
11.	Максимальное отношение A/q	7,4	3,26
12.	Произведение кратности на число оборотов	980	2940
13.	Заряд и интенсивность ионов ($\frac{\text{част}}{c}$)		
	а) уран	32; 10^{14}	73; $1,4 \cdot 10^{13}$
	б) ксенон	23	46
	в) криптон	18	32
	г) аргон	$10; 10^{15}$	$17; 3 \cdot 10^{14}$

няться в процессе детальной разработки и моделирования отдельных систем комплекса. Тем не менее уже на этой стадии проработки видна принципиальная реализуемость всех систем комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Böhne D. In: *Proc. of Linear Accelerator Conference, Los Alamos, 1972, (LASL Report LA 5115), p. 25.*
2. The Ganil Study group. In: *Proc. of the 7th Intern. Conf. on Cyclotron, Zurich, 1975, p. 111.*
3. Балдин А.М. и др. В кн: *Труды ИУ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 2, "Наука", М., 1975, с. 4.*
4. Barale J. et al. *IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-22, No. 3, 1975, p. 1672.*
5. Betz. H.D. *Rev. Mod. Phys. 1972, 44, p. 465.*
6. Bex L. et al. *IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-22, No. 3, 1975, p. 1702.*
7. Geller R. et al. *IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-23, 1976, p. 904.*
8. Donetz E. et al. *IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-23, 1976, p. 897.*
9. Daugherty et al. *Phys. Rev. Lett., 20, 1968, p. 369.*
10. Nikolaev V.S., Dmitriev I.S. *Phys. Lett., 28A, 1968, p. 277.*
11. Дмитриев И.С., Николаев В.С. *ЖЭТФ, 20, 1965, с. 409.*
12. Staples J. et al. In: *Proc. of Proton Linear Accelerator Conference, Chalk River, 1976, Conference, Chalk River, 1976, p. 81.*
13. Kaspar K. *Ibid. p. 73.*
14. Maier K.H. In: *Proc. of the Intern. Conf. on Cyclotrons, Zurich, 1976, p. 68. S.W. Mosko et al. Ibid., p. 600.*
15. Ormrod J.H. et al. *Ibid. p. 595.*
16. Брехна Г. *Сверхпроводящие магнитные системы. "Мир", М., 1976.*
17. Глазов А.А. и др. В кн: *Материалы II Рабочего совещания по изохронному циклотрону У-120М. Р9-6241, Дубна, 1972, с. 43.*
18. Giannini R., Susini A, *MSC/PR/280, CERN, 1969; Заплатин Н.Л. и др. ОИЯИ, Р9-9023, Дубна, 1975.*
19. Дмитриевский В.П. и др. *ОИЯИ, Р9-6733, Дубна, 1972.*

Рукопись поступила в издательский отдел
19 мая 1978 года.