

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ЦИКЛОТРОН С РАЗДЕЛЕННЫМИ ОРБИТАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Шелаев И.А.

Приведены основные параметры СП-циклотронного комплекса, генерирующего протоны с энергией 1 ГэВ и интенсивностью 100 мА в непрерывном режиме. Комплекс содержит 180 кэВ 10 мА форинжектор и 28 МэВ изохронный циклотрон с разделенными секторами, СП 240 МэВ бустерный и 1 ГэВ основной циклотроны с разделенными орбитами. Разделение орбит в секторном циклотроне достигается применением 6 дуантов с ВЧ-напряжением амплитудой 75 кВ. Поворот и фокусировка пучка в СП-циклотроне выполняется системой миниатюрных однопольных дипольных и квадрупольных магнитов, образующих 10 спиральных каналов, размещенных один над другим в общем гелиевом криостате. Инжектированные в эти каналы пучки от 10 секторных циклотронов ускоряются 12 объемными теплыми резонаторами с амплитудой 500 кэВ в бустерном циклотроне и 44 — в основном. Изначальное разделение пучка требуемой интенсивности на 10 отдельных каналов обеспечивает устойчивую работу всего комплекса и гибкость в его управлении. Стандартизация ВЧ-генераторов и резонаторов, СП-магнитов установки и других ее элементов позволяет организовать их массовое производство и тем самым снизить стоимость комплекса.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Superconducting Separated Orbit Cyclotron for Electronuclear Reactor

I.A.Shelaev

Main parameters of a cyclotron facility for generation of 1 GeV 100 mA proton beam in dc mode are given. It includes 180 keV 10 mA injector, 28 MeV isochronous separated sector cyclotron, SC 240 MeV booster separated orbit cyclotron and 1 GeV main one. Orbit separation in the sector cyclotron is achieved by application of 6 dees with 75 kV on each. Beam bending and focusing in the SOC's is fulfilled by a system of miniature dipoles and quadrupoles of the same type that form 10 spiral channels. The channels are placed one on another in common LHe cryostat. The beams injected in the channels by the 10 sector cyclotrons are accelerated by 12 warm 500 kV rf cavity in the booster cyclotron and by 44 ones in the main SOC. Division of the required intensity beam at the start of acceleration into 10 separated channels provides stable operation of the facility and its control flexibility. Standardization of hf generators, cavities, SC magnets and other elements of the facility permits one to organize mass-production of the elements and to decrease their costs.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Введение

Под электроядерным понимается реактор, в котором реакция деления ядер тяжелых элементов поддерживается незатухающей потоком нейтронов от внешнего источника. Поток нейтронов в рабочей зоне реактора возбуждается быстрыми частицами от ускорителя: протон с энергией 1 ГэВ в достаточно протяженном блоке ^{238}U , обогащенном 2% ^{235}U , создает до 50 нейтронов и примерно 4 ГэВ тепла [1]. Еще больше нейтронов и тепла образуют тяжелые ядра [2]. Разумеется, реакция представит промышленный интерес, если интенсивность падающего пучка достаточно велика. В случае протонов с энергией 1 ГэВ различные оценки дают величину 100—300 мА. Получение такой интенсивности на линейных ускорителях заставляет многих исследователей считать этот тип ускорителя наиболее перспективным для электроядерного реактора. Но эта интенсивность получена в импульсном режиме, средняя же ее величина оказывается на 2 порядка меньше, поэтому наряду с линейными ускорителями рассматриваются возможности ускорителей другого типа, в частности, циклотроны [3].

В данной работе приведены оценки параметров сверхпроводящего (СП) циклотрона с разделенными орбитами (ЦРО) [4,5], пригодного для получения пучка протонов с энергией 1 ГэВ и интенсивностью 100 мА. В циклотроне сверхпроводимость используется для создания миниатюрной магнитной системы, обеспечивающей при достаточном приросте энергии частиц за оборот вывод ускоренного пучка с эффективностью 100%. Для магнитной системы ЦРО наиболее подходящими оказываются разработанные в ЛВЭ сверхпроводящие магниты с железом [6], и ранее изучалась возможность их применения в сильноточном циклотроне [7].

В такой установке определяющими являются стоимость, КПД и надежность ВЧ-преобразователя. Циклотрон, являясь наиболее компактной машиной, позволяет получить КПД передачи ВЧ-мощности пучку на уровне 90% и выше. В нем ВЧ-преобразователь работает в диапазоне 25—50 МГц, в котором промышленностью освоены генераторы с единичной мощностью 1—2 МВт, и для ускорения протонов до энергии 1 ГэВ и интенсивностью 100 мА достаточно иметь 50 таких генераторов.

Для достижения требуемой интенсивности достаточно разделить пучок на 10 параллельных каналов с независимой фокусировкой, что существенно ослабит эффекты, связанные с пространственным зарядом, упростит последующее использование пучка в реакторе и позволит сочетать устойчивую работу ускорителя с гибкостью в его управлении.

В рассматриваемом циклотроне ускорение протонов осуществляется в три этапа: 10 теплых изохронных циклотронов поставляют 10×10 мА пучки с энергией 28 МэВ в 10-канальный СП-бустерный циклотрон, повышающий их энергию до 240 МэВ; конечную энергию в 1 ГэВ пучки получают в основном СП ЦРО, также содержащем 10 раздельных магнитных каналов. На каждом этапе ускорение осуществляется ВЧ-полем одной и той же частоты, что исключает потери интенсивности. Сравнительно низкая частота ВЧ-поля (31,5 МГц) обеспечивает высокий КПД, наименьшую стоимость и надежную реализуемость ВЧ-генератора — наиболее дорогой и энергоемкой системы ускорителя.

1. Энергетика электроядерного реактора

Упрощенная блок-схема электроядерного реактора и основные потоки энергии приведены на рис.1. Поступающий в рабочую зону реактора пучок быстрых протонов мощностью P_b выделяет в k раз больше тепловой энергии P_h за счет деления тяжелых ядер:

$$P_h = kP_b. \quad (1.1)$$

В электростанции это тепло преобразуется в электроэнергию P_e с КПД η_e , поэтому

$$P_e = k\eta_e P_b. \quad (1.2)$$

Выработанная электроэнергия частично возвращается в ускоритель P_a , остальная направляется потребителю P_u :

$$P_e = P_a + P_u. \quad (1.3)$$

В свою очередь, часть потребляемой ускорителем энергии расходуется на его собственные нужды P_s (охлаждение магнитов, поддержание рабочего давления в камере, система управления и пр.), а большая ее часть (P_g) потребляется ВЧ-генератором. Здесь электроэнергия промышленной частоты преобразуется в высокочастотную P_f с КПД η_g

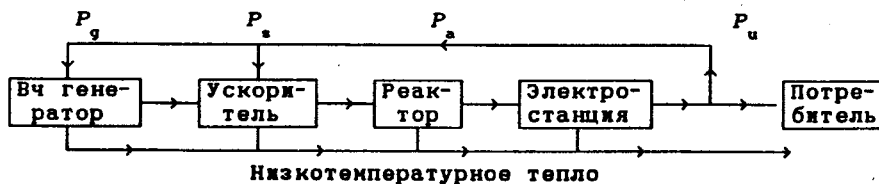


Рис.1

$$P_a = P_g + P_s = P_f / \eta_g + P_s. \quad (1.4)$$

ВЧ-мощность поступает в ускоряющий резонатор непосредственно или через фидер связи, где расходуется на возбуждение резонатора и ускорение пучка P_b . Таким образом, справедливо соотношение

$$P_f = P_b / \eta_b, \quad (1.5)$$

где η_b — КПД передачи мощности генератора пучку протонов.

Комбинируя выражения (1.1—1.5), получаем

$$P_u + P_s = \left(k\eta_e - \frac{1}{\eta_g\eta_b} \right) P_b. \quad (1.6)$$

Последнее соотношение имеет смысл, если в нем выражение в скобке неотрицательно, т.е. если

$$k\eta_e\eta_g\eta_b > 1. \quad (1.7)$$

В выражении (1.7) два коэффициента — η_e и η_g — имеют хорошо установленные величины. КПД преобразования тепловой энергии в электрическую лежит в пределах 0,3—0,4, и для оценок η_e можно принять равным 0,35. КПД ВЧ-генератора, выполненного на мощных тетрадах, в принятом здесь частотном диапазоне, равен 0,6. Таким образом, в распоряжении экспериментатора остаются два коэффициента — k и η_b .

Величиной коэффициента k можно управлять, варьируя ядерный состав мишени или массу быстрых ядер, т.е. выбирая подкритичность реактора. Тогда типом ускорителя определяется только один параметр соотношения (1.7) — η_b , который можно оценить как

$$\eta_b = P_b / P_f = P_b / (P_b + P_r), \quad (1.8)$$

где P_r — ВЧ-мощность, расходуемая в резонаторах ускорителя на возбуждение ускоряющего поля при нулевой интенсивности пучка, включая потери мощности при передаче от генератора к резонатору.

В линейном ускорителе, имеющем протяженный (порядка 1000 м) резонатор, величина P_r приближается к 100 МВт, поэтому η_b принимает заметную величину (0,6—0,7), когда мощность пучка оказывается порядка 200—300 МВт. Генераторы линейного ускорителя работают в диапазоне 400—600 МГц, где стоимость 1 Вт мощности гораздо выше.

В циклотроне ускоряющее поле проходится пучком многократно, в силу этого значительно меньше величина P_r . В результате η_b оказывается порядка 0,90—0,92 при значительно меньшей мощности пучка. Как

показано ниже, вариант СП-циклотрона с разделенными орбитами действительно позволяет ускорить интенсивный пучок протонов с высоким КПД.

2. Общая схема ускорителя

Исходя из изложенного выше, можно сформулировать следующие основные требования к ускорителю для электроядерного реактора:

— ускоритель поставляет постоянный во времени и управляемый пучок протонов (или ядер) с энергией 1000 МэВ и интенсивностью 100 мА и более;

— ускоритель имеет максимально возможное значение КПД η_g преобразователя электрической энергии сеть — ВЧ;

— реализуемость, надежность и ремонтоспособность ВЧ-преобразователя;

— максимальное значение КПД η_b передачи ВЧ-энергии к пучку;

— минимальные потери пучка при ускорении, выводе и пр.;

— минимальная стоимость ускорителя, его компактность, надежность и ремонтоспособность.

Работоспособность электроядерного реактора в первую очередь определяется ВЧ-преобразователем. Наиболее пригодным для работы в непрерывном режиме представляется преобразователь на жестких лампах в диапазоне 25—50 МГц с мощностью оконечного каскада 2 МВт. Наибольшим КПД обладает схема, в которой ВЧ-генератор расположен рядом с резонатором, т.к. в ней отсутствует передача ВЧ-мощности на расстояние или сложение мощностей отдельных генераторов, сопровождающееся потерями. Это условие определяет общее число резонаторов в установке: для ускорения пучка общей мощностью 100 МВт необходимо не менее 50 резонаторов, возбуждаемых таким же числом генераторов мощностью 2 МВт каждый.

Общая схема ускорителя представлена на рис.2. Сформированный в форинжекторе (ионный источник, электростатический ускоритель и банчер) пучок с энергией 0,255 МэВ инжектируется в центр многодуантного изохронного секторного циклотрона. Многодуантный вариант позволяет получить примерно 1 МэВ прирост энергии пучка за оборот при приемлемом напряжении на дуантах, что при низком значении среднего магнитного поля дает необходимое для эффективного вывода разделение орбит на конечном радиусе и обеспечивает достаточно свободное место в центре циклотрона для размещения там инфлектора.

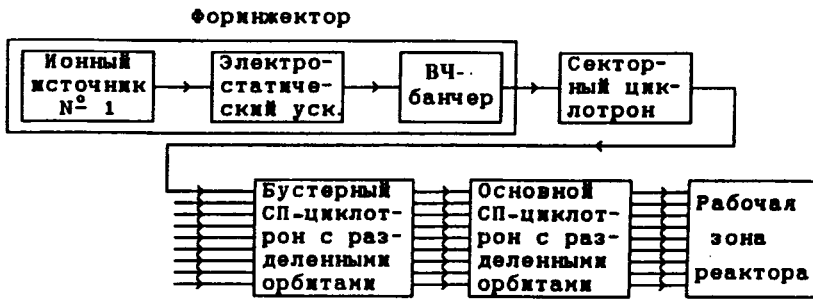


Рис.2

Форинжектор и секторный циклотрон повторяются 10 раз, и все 10 пучков инжестируются затем в 10-этажный СП-бустерный ЦРО.

В бустерном ЦРО поворот и фокусировка пучка осуществляется миниатюрной СП-магнитной системой, представляющей собой магнитную систему протонного синхротрона с разделенными функциями поворота и фокусировки. Размещенные по развевывающейся спирали ФОДО периоды магнитной системы ЦРО обеспечивают жесткую фокусировку пучка, недостижимую в секторных циклотронах. В бустерном циклотроне пучок ускоряется ВЧ-полем 12 теплых объемных резонаторов, имеющих форму параллелепипеда. В таком резонаторе амплитуда ускоряющего напряжения достигает 0,5 МВ при мощности возбуждения 0,15—0,20 МВт.

Аналогично построен и основной СП ЦРО. В обоих циклотронах используются СП-магниты и линзы, имеющие одинаковые поперечные размеры и отличающиеся только длиной. Это позволяет организовать массовое производство таких магнитных элементов, что снижает их стоимость. Ускорение пучков в основном ЦРО также осуществляется ВЧ-полем объемных резонаторов, число которых здесь выбрано равным 44. Всего же в установке имеется 56 резонаторов, что при условии их равнонагруженности (1,73 МВт/резонатор) определяет конечную энергию бустерного циклотрона.

Многоканальность бустерного и основного СП ЦРО существенно снижает эффекты пространственного заряда в каждом канале, обеспечивая требуемую общую интенсивность установки, а многократность форинжектора обеспечивает практически непрерывную работу всего комплекса, несмотря на ограниченное время жизни ионного источника. Ниже приведены более подробно параметры перечисленных ускорителей.

3. Форинжектор

Форинжектор включает ионный источник, электростатическую ускорительную трубку с напряжением 110 кВ, группирователь и предускоритель на одиночном резонаторе с частотой 31,5 МГц, канал транспортировки пучка в центр секторного циклотрона, поворотный конденсатор и систему контроля пучка. Такая сравнительно сложная схема форинжектора выбрана с тем, чтобы получить интенсивный пучок с малым эмиттансом и минимизировать потери пучка на малых радиусах в секторном циклотроне, где происходит формирование временной структуры пучка.

Ионный источник типа дуоплазмотрона [8], параметры которого приведены в табл. 1, установлен на высоковольтной платформе электростатической трубки. После ускорения в ней до энергии 110 кэВ и последующего выделения в магнитном сепараторе атомарной компоненты получим 40 мА пучок с нормализованным эмиттансом 0,33 μ мрад.

Время жизни оксидного катода ионного источника составляет 60 часов непрерывной работы, после чего катод подлежит замене. Смена катода источника означает выключение данного канала на 20 мин, при этом для сохранения неизменным потока частиц на мишень достаточно ток в остальных каналах увеличить на 10%.

После магнитного сепаратора пучок проходит через низковольтный группирователь, питаемый напряжением основной (31,5 МГц) и удвоенной частоты, и ускоряется в одиночном резонаторе с 2 ускоряющими промежутками до энергии 180 кэВ. Фокусировка пучка в нем осуществляется квадрупольными линзами на постоянных магнитах. На выходе

Таблица 1

Параметр	Размерность	Величина
Вытягивающее напряжение	кВ	45
Ток пучка (одно отверстие)	мА	65
Нормализованный эмиттанс	μ мрад	
для 100% интенсивности		1,30
для 92%		0,33
Содержание атомарного водорода	%	70
Ток дуги источника	А	8—15
Напряжение дуги	В	130—150
Ток накала нити	А	45—52
Число ампер-витков соленоида	кА	2,4
Расход водорода	л-Тор/с	0,3

резонатора получим пучок в виде банчей фазовой протяженностью 30—35°, амплитудой 130 и средним током 10—12 мА. Одиночный резонатор выполнен в виде четвертьволновой коаксиальной линии, свернутой в спираль [9] и настроенной на основную частоту 31,5 МГц; напряжение на ускоряющем электроде 35 кВ.

Такая предварительная банчировка минимизирует потери пучка в секторном циклотроне. При этом несколько увеличится эмиттанс пучка, и для дальнейших оценок примем, что нормализованный эмиттанс не превосходит 1 мрад.

Цилиндрический конденсатор с зазором 10 мм поворачивает протоны на 90° при разности потенциалов на обкладках ± 18 кВ относительно «земли» и вводит их в медианную плоскость циклотрона. Фокусировка пучка в обеих поперечных плоскостях осуществляется за счет гиперболического профиля пластин конденсатора. Все оборудование форинжектора размещается во внутренней полости центрального штока ВЧ-резонатора инжекторного циклотрона, поэтому инжекция пучка сопровождается его ускорением на 75 кэВ. Пройдя заземленный промежуток вакуумной камеры длиной 11 см, пучок поступит в первый дуант с энергией инжекции 0,255 кэВ. Этот участок оборудован парой квадрупольных линз на постоянных магнитах и конденсатором коррекции угла входа в дуант.

4. Многодуантный секторный циклотрон

Несмотря на предварительное формирование пучка, можно ожидать потерь порядка 5—15% (или 0,5—1,5 мА) на первых 2—3 оборотах в секторном циклотроне. Если средняя энергия этого пучка равна 2 МэВ, то выделяемая мощность составит 1—3 кВт, что исключает применение сверхпроводящей магнитной системы в первом циклотроне, поэтому выбран теплый вариант секторного циклотрона, основные параметры которого приведены в табл.2.

В изохронном циклотроне частота обращения иона ω_i остается постоянной на любом радиусе r :

$$\omega_i = v/r = \text{const.} \quad (4.1)$$

Из этого условия следует зависимость радиуса орбиты от энергии w , если последняя выражена в единицах энергии покоя протона,

$$r = \frac{N\lambda \sqrt{w(2+w)}}{2\pi(1+w)}, \quad (4.2)$$

Таблица 2

Параметр	Размерность	Величина	
		на входе	на выходе
Энергия протонов	МэВ	0,255	28
Интенсивность	мА	12	10
Магнитная жесткость	кЭ м	0,730	7,703
Среднее магнитное поле	кЭ	3,447	3,546
Магнитное поле в секторе	кЭ		9,066
Средний радиус орбиты	см	21,1	217,2
Прирост радиуса за оборот	см	26,7	3,5
Число секторов магнита			6
Число дуантов			6
Число оборотов пучка			27
Напряжение на дуантах	кВ		75
Частота ВЧ-напряжения	МГц		31,5
Частота обращения протонов	МГц		5,25

где λ — длина волны ускоряющего ВЧ-поля, N — номер гармоники. Если прирост энергии за оборот равен dw , то радиус увеличится на dr :

$$dr = \frac{rdw}{w(1+w)(2+w)} \quad (4.3)$$

Из последнего соотношения видно, что прирост радиуса за оборот пропорционален его величине и приросту энергии. Высокий набор энергии за оборот (0,9 МэВ) при умеренном напряжении на дуантах достигается использованием 6 дуантов, питаемых напряжением 6-й гармоники частоты обращения, на которой фаза пролета дуанта равна 180° . Фаза пролета размещенных между дуантами магнитных секторов также равна $180^\circ/\text{сектор}$, поэтому ускоряющее напряжение на всех дуантах синфазно и они присоединены к одному штоку, представляющему собой центральный электрод четвертьволновой коаксиальной линии, что существенно упрощает конструкцию ВЧ-системы циклотрона. Ось центрального штока проходит через центр ускорителя и ортогональна его медианной плоскости. Диаметр штока, поддерживающего 6-дуантную систему с общим диаметром 4,34 м, при таком же диаметре внешнего бака резонатора можно выбрать порядка 2 м, что обеспечит добротность резонатора свыше 10000. На возбуждение в таком резонаторе на-

пряжения амплитудой 75 кВ потребуется около 20 кВт. При токе ускоренного пучка 10 мА потребляемая мощность возрастет до 300 кВт, т.е. в 15 раз; КПД передачи мощности пучку η_b составит 93%.

Напряжение на дуантах выбрано примерно в 2—2,5 раза выше, чем в промышленных циклотронах с непрерывным режимом. Такой выбор основан на следующем. Во-первых, значительно увеличен зазор дуант — камера — с 14—20 мм до 350. Этот зазор электрически наиболее прочен, т.к. здесь разряд в обычных циклотронах происходит по магнитному полю; в инжекторном циклотроне дуанты находятся вне поля. Во-вторых, увеличены радиусы скругления кромок дуантов, поэтому хотя в центре циклотрона расстояние между кромками дуанта и камерой всего 20 мм, но в этом зазоре рассеянное магнитное поле направлено поперек зазора, что увеличивает его электрическую прочность. С увеличением зазоров уменьшается емкость дуантов, составляющая, по оценкам, 200—250 пФ. Наконец, инжекторные циклотроны могут работать в импульсном режиме, при котором из 10 циклотронов 9 всегда поставляют пучки в реактор и лишь один выключен.

Расчет замкнутой орбиты в магните циклотрона матричным методом дает для набега фазы радиальных бетатронных колебаний σ_r на период величину

$$\begin{aligned} \cos \sigma_r = & \left[1 + \frac{l}{2\rho} (\operatorname{tg} \varepsilon_1 + \operatorname{tg} \varepsilon_2) \right] \cos \vartheta + \\ & + \left[\frac{\operatorname{tg} \varepsilon_1 + \operatorname{tg} \varepsilon_2}{2} - \frac{l}{2\rho} (1 - \operatorname{tg} \varepsilon_1 \operatorname{tg} \varepsilon_2) \right] \sin \vartheta \end{aligned} \quad (4.4)$$

и вертикальных σ_z

$$\cos \sigma_z = 1 - \left(\vartheta + \frac{l}{\rho} \right) \frac{\operatorname{tg} \varepsilon_1 + \operatorname{tg} \varepsilon_2}{2} + \frac{l\vartheta}{2\rho} \operatorname{tg} \varepsilon_1 \operatorname{tg} \varepsilon_2. \quad (4.5)$$

Здесь ρ — радиус кривизны траектории в магните, ϑ — угол поворота в секторе, ε_1 и ε_2 — углы входа и выхода траектории, l — длина свободно-от магнитного поля промежутка. Аналогично вычисляются и другие параметры замкнутой орбиты; результаты приведены в табл.3. Снижение угловой протяженности магнита повышает частоту бетатронных колебаний и упрощает размещение магнитов в центре циклотрона. Рост угловой протяженности секторных магнитов с радиусом компенсирует релятивистский рост массы протона с энергией.

В циклотроне β -функции пропорциональны радиусу кривизны; эмиттанс пучка, напротив, обратно пропорционален радиусу (при ма-

Таблица 3

Параметр	Размерность	Величина	
		на входе	на выходе
Угловая протяженность магнита	град	21,40	22,13
Угловая протяженность свободного промежутка	град	38,60	37,87
Радиус кривизны, ρ	см	8,05	85,0
Набег фазы на период			
радиальных колебаний	град	64,6	63,8
вертикальных колебаний	град	82,9	80,5
β_r -функция минимальная		2,20 ρ	2,13 ρ
максимальная		3,30 ρ	3,18 ρ
β_z -функция минимальная		1,74 ρ	1,76 ρ
максимальная		2,19 ρ	2,16 ρ
Частота радиальная		1,066	1,064
Частота вертикальная		1,381	1,342
Амплитуда радиальная	мм	1,5	1,7
Амплитуда вертикальная	мм	1,3	1,4

лых энергиях), поэтому амплитуды бетатронных колебаний остаются постоянными на всех радиусах, если сохраняется постоянным нормализованный эмиттанс пучка. Как видно из табл.3, размеры пучка за счет бетатронных колебаний не превышают 3,5 мм в любом направлении.

Низкий уровень среднего магнитного поля, определяемый частотой ускоряющего напряжения, приводит к необычно большому размеру магнита, однако его вес и энергопотребление оказываются вполне приемлемыми, что видно из табл.4. Энергопотребление магнита в инжекторном циклотроне невелико в силу низкого уровня поля и небольшой величины зазора между полюсами — 12 мм, или 3,5 вертикальных размера пучка. Вес магнитопровода снижается почти вдвое благодаря введению радиальной вариации магнитного поля: поле на кольцевой дорожке шириной 32 мм равно полю сектора, и зазор между полюсами здесь равен 12 мм, а между соседними дорожками поле в 4 раза меньше за счет увеличенного зазора. В результате уменьшается индукция в обратном магнитопроводе, а с ней уменьшается его вес. Магнитопровод, покрытый вместе с катушками возбуждения тонколистовой медью, размещается в вакуумной камере ускорителя.

Таблица 4

Параметр	Размерность	Величина
Напряженность магнитного поля	кЭ	9,066
Зазор между полюсами	мм	12
Ампер-витки катушки возбуждения	А	8657
Число витков		12
Ток магнита	А	721,4
Размер проводника	мм ²	13,8×13,8
Сопротивление катушки	мОм	45,8
Потребляемая мощность	кВт	23,8
Вес меди катушки	т	0,50
Высота секторного магнита	м	0,82
Вес магнитопровода	т	5,7
Общая потребляемая мощность	кВт	23,05
Общий вес магнита	т	34,4

Вывод пучка из многодуантного циклотрона происходит автоматически за счет того, что конечный радиус магнита в шестом секторе на 35 мм меньше, чем в первом. По каналу транспортировки пучок направляется в один из СП-поворотных-фокусирующих каналов бустерного циклотрона.

5. Бустерный СП-циклотрон

Применение теплых резонаторов для ускорения в бустерном ЦРО вызвано тем, что, во-первых, представляется довольно сложной разработка петли связи, передающей 2 МВт ВЧ-мощности в СП-резонатор при температуре жидкого гелия. Во-вторых, потребовался бы усилитель с необычно большим диапазоном по мощности для возбуждения СП-резонатора с пучком и без него.

Исходя из условия равнонагруженности ВЧ-резонаторов в бустерном СП-циклотроне с разделенными орбитами ускорение осуществляется в 12 объемных резонаторах, работающих на 8-й гармонике частоты обращения протонов. Поворотных-фокусирующая магнитная система представляет собой развернутую в спираль ФОДО структуру жесткофокусирующего синхротрона с разделенными функциями поворота и фокусировки, содержащую 16 FODO периодов на оборот. Разомкнутость магнитной системы обеспечивает автоматическое выполнение опе-

Таблица 5

Параметр	Размерность	Величина	
		на входе	на выходе
Энергия протонов	МэВ	28,0	241,3
Интенсивность	мА	100,0	100,0
Магнитная жесткость	кЭ	7,703	23,85
Средний радиус траектории	м	2,896	7,344
Среднее магнитное поле	м	2,660	3,248
Радиус кривизны, ρ	м	0,550	1,704
Прирост энергии за оборот	МэВ	2,32	5,96
Прирост радиуса за оборот	см	11,2	6,47
Частота обращения протонов	МГц		3,938
Напряжение на резонаторе	кВ		500
Число резонаторов			12
Число оборотов протонов			43

раций ввода и вывода пучка со 100% эффективностью. Параметры бустерного ЦРО даны в табл.5.

Структура периода магнитной системы показана на рис.3 и внешне бустер предстает как собранные в кольцо 16 гелиевых криостатов, между которыми размещены 12 теплых объемных ВЧ-резонаторов. В каждом криостате содержится СП-фокусирующая линза Φ , 2 поворотных магнита M и дефокусирующая линза D . Это оборудование занимает примерно половину ФODO-периода. В оставшемся большом промежутке O' размещен ВЧ-резонатор; в каждом четвертом периоде вместо него в этом свободном промежутке размещены устройства контроля и коррекции орбиты, подходят вводные и выводные каналы транспортировки пучка и пр.

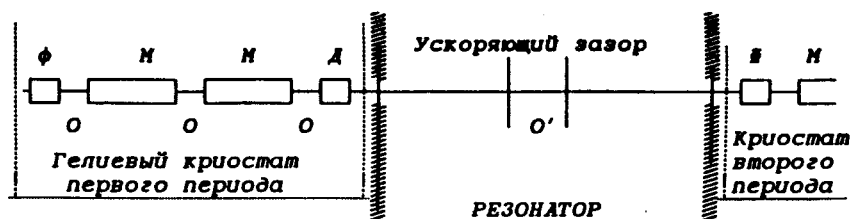


Рис.3

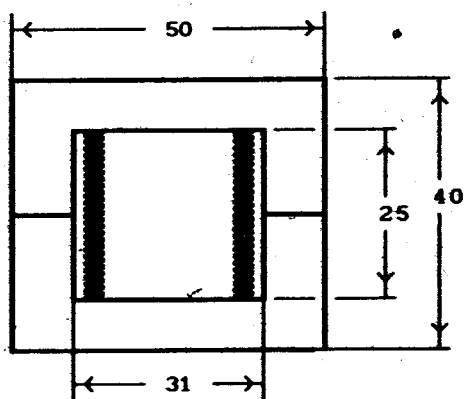


Рис.4

10-этажная магнитная система бустерного ЦРО собрана из миниатюрных сверхпроводящих магнитов и квадрупольных линз. Поле напряженностью 14 кЭ в таких магнитах формирует СП-катушкой и близко расположенным ярмом из магнитного мягкого железа. Поперечное сечение магнита показано на рис.4. Низкий уровень магнитного поля позволяет применить СП-катушку с малым поперечным сечением (горизонтальный размер витка 2,5 мм) и большим запасом по критическому току.

Еще меньше поперечные размеры явнополюсной квадрупольной линзы при той же апертуре. Простая форма ярма магнита упрощает его высокоточное изготовление, а использование ярма в качестве шаблона при намотке СП-катушки задает высокую повторяемость параметров серии магнитов. Все магниты и линзы в бустерном циклотроне имеют стандартные поперечные размеры и отличаются лишь длиной. Длина диполя равна 10,7 см при инжекции и 33,3 см на последнем обороте. Собранные в 10-канальную стопку высотой 40 см магниты и линзы всех оборотов одного периода общим весом 3,4 т помещаются в общий гелиевый криостат.

Анализ бетатронного движения показывает, что фокусировка пучка настолько жесткая (частота бетатронных колебаний 3,25), что его поперечные размеры всюду оказываются менее 15 мм, а наибольшую величину в горизонтальной апертуре занимает сагитта — до 8 мм. Другие требования к апертуре, связанные, например, с несовершенством магнитной системы, можно не учитывать, т.к. в ЦРО небольшое число оборотов и на каждом реализуема достаточно развитая система коррекции орбиты.

Пучки ускоряются в прямоугольном резонаторе, в котором возбуждаются колебания простейшей моды типа TM_{110} , если выполняется условие

$$(2/\lambda)^2 = (1/a)^2 + (1/b)^2, \quad (5.1)$$

где λ — длина волны, a, b — наибольшие стороны параллелепипеда. При этом распределение электрического поля в резонаторе имеет вид

$$E_z = E_0 \sin(\pi x/a) \sin(\pi y/b), \quad E_x = E_y = 0. \quad (5.2)$$

Таблица 6

Параметр	Размерность	Величина
Собственная частота	МГц	31,5
Амплитуда напряжения	кВ	500
Размеры резонатора: радиальный	м	10,73
вертикальный	м	5,31
азимутальный	м	0,54
Ускоряющий зазор	см	15
Фаза пролета ускоряющего зазора	град	23
Средний прирост энергии пучка	МэВ	0,401
Число резонаторов		12
Разность фаз между соседними резонаторами	град	180
Мощность возбуждения ненагруженного резонатора	кВт	150

В табл.6 представлены параметры резонатора в гладком приближении, когда не учитывалось влияние выступов в области ускорения пучка, необходимых для уменьшения времени пролета протона через резонатор.

Вычисление прироста энергии и радиуса пучка за оборот выполнялось с учетом распределения электрического поля (5.2). Из него можно найти, что вертикальное распределение электрического поля по 10 каналам отлично от постоянного на $\pm 3 \cdot 10^{-3}$. Радиальная же зависимость ускоряющего поля возбуждает в пучке синхротронные колебания [10].

Фазирование соседних резонаторов и входного резонатора с инжекторными циклотронами выполняется выбором фазы возбуждения ВЧ-генераторов, представляющих собой оконечные каскады многокаскадных усилителей мощности.

6. Основной СП-циклотрон

В основном СП ЦРО пучок во всех 10 каналах ускоряется 44 тепловыми резонаторами, работающими на той же частоте 31,5 МГц, которая здесь оказывается 12-й гармоникой частоты обращения протонов. Для размещения такого числа резонаторов выбрана магнитная структура, имеющая 24 ФОДО-периода на оборот, и, как видно из рис.5, в каждом ФОДО-полупериоде размещен гелиевый криостат с Φ (или D) линзой и

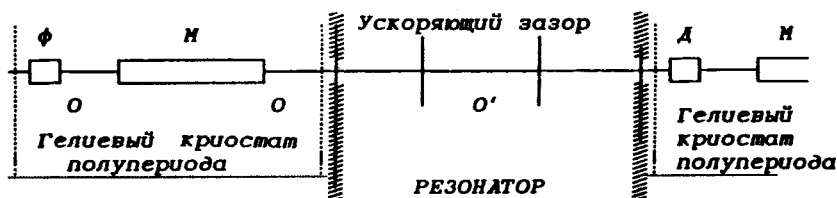


Рис.5

поворотным магнитом M и теплый резонатор. Как и в бустерном ЦРО, здесь в каждом 6-ом периоде опущено по одному резонатору и освободившееся место занято системой контроля и коррекции орбиты и другим оборудованием.

Магнитная система собрана из таких же элементов, что и в бустерном циклотроне, но увеличенной длины. Магниты полупериодов собираются в 48 криостатов, имеющих в плане форму трапеции с основаниями 0,8 и 1,5 м и высотой 6 м. Наибольший теплоприток к криостату связан с выходами холодных вакуумных камер в теплый резонатор. По этой причине теплоприток к одному гелиевому криостату составит 10—12 Вт, а ко всем криостатам бустерного и основного ЦРО в 640—780 Вт, т.е. примерно мощность одной гелиевой установки типа КГУ-1600/4,5 [11]. Иными словами, на поддержание рабочей темпера-

Таблица 7

Параметр	Размерность	Величина	
		на входе	на выходе
Энергия протонов	МэВ	241,3	1000,5
Интенсивность	мА	100,0	100,0
Магнитная жесткость	кЭ	23,85	56,59
Средний радиус траектории	м	11,02	15,91
Среднее магнитное поле	м	2,164	3,557
Радиус кривизны, ρ	м	1,704	4,042
Прирост энергии за оборот	МэВ	12,5	19,8
Прирост радиуса за оборот	см	19,64	5,05
Частоты обращения протонов	МГц	2,625	
Напряжение на резонаторе	кВ	500	
Число резонаторов		44	
Число оборотов протонов		38	

туры всей СП-магнитной системы потребуется около 1 МВт электроэнергии из сети, т.е. 1 % мощности ускоренного пучка.

Основной ЦРО оборудован такими же резонаторами, что и бустер, для возбуждения которых без пучка потребуется также 150—200 кВт на резонатор, поэтому КПД передачи ВЧ-энергии от резонатора к пучку во всей установке составит 90 %.

Заключение

Цель данной работы состояла в том, чтобы показать возможность эффективно ускорить на изохронном циклотроне интенсивный пучок протонов до энергии 1 ГэВ с высоким КПД и без потерь, и эта цель, по моему, достигнута. Из изложенного видно, что разделение в СП ЦРО интенсивного пучка на ряд пучков меньшей интенсивности ведет к тому, что разделяются функции ускорения пучка и его фокусировки. При этом отдельные пучки благодаря миниатюрности СП-магнитной системы фокусируются различными не связанными между собой магнитными каналами, пребывая в них значительно большую часть времени ускорения, и только в течение малой его части ускоряются в общих для всех пучков ВЧ-резонаторах. Тем самым эффекты пространственного заряда сводятся к минимуму.

Такое разделение функций дается дорого с точки зрения начальных затрат: требуется 56 резонаторов, подобных которым в мире построено всего 4 (на циклотроне SIN), и несколько тысяч СП-магнитов. Но резонаторы попутно выполняют важнейшую роль: обеспечивая сложение мощностей отдельных генераторов на пучке, исключают сложные проблемы сложения и ввода мощностей на порядок большей величины, если во столько же раз сократить число резонаторов. СП-магниты обеспечивают гибкость в управлении ускорителем и определенные удобства при последующем использовании пучка с мощностью 100 МВт.

В этой сложной установке по возможности стандартизировались размеры и форма отдельных элементов и узлов с тем, чтобы снизить стоимость их изготовления. Разумеется, найденные решения нуждаются в дальнейшей оптимизации. Хотя подобного ускорителя еще нет, входящие в него узлы и системы успешно работают во многих лабораториях, что дает основание предполагать реализуемость всей установки и ее работоспособность.

Автор выражает глубокую благодарность академику А.М.Балдину, чья энергичная поддержка и внимание определили появление этой работы.

Литература

1. Bartholomew G.A., Fraser J.S., Garvey P.M. — Accelerator Breeder Concept. AECL-6383, Chalk River, Ontario, 1978.
2. Tolstov K.D. — Perspectives of Electronuclear Method of Energy Generation and Nuclear Waste Transmutation. In this issue of JINR Rapid Communications.
3. Желепов В.П., Дмитриевский В.П., Кольга В.В. — Препринт ОИЯИ Р9-9066, Дубна, 1976.
4. Russel F.M. et al. — Nucl. Instr. & Meth., 1963, 23, p.229.
5. Trinks U. — Superconducting Separated Orbit Cyclotron. Proc. of the Inter. Conf. on Cyclotron. Vancouver, Canada, May 1992.
6. Аверичев С.А. и др. — Препринт ОИЯИ Р8-11700, Дубна, 1978.
7. Шелаев И.А. — Циклотрон с разделенными орбитами. В сб.: Проблемы электроядерного бридинга. МИФИ, Обнинск, 1980, с.46.
8. Shubaly M.P. — AECL-6578, 1979.
9. Schempp A., Klein H. — Proc. of the 1976 Proton Linear Acc. Conf. AECL-5677, p.67.
10. Hinderer G., Trinks U. — Das Tritron als Zwidchenbeschleuniger fur Suse. Technische Universitat, Munchen, 1983.
11. Шелаев И.А., Алфеев В.С., Балдин А.М. и др. — Сообщения ОИЯИ, Р9-85-593, Дубна, 1985.

Рукопись поступила 13 января 1994 года.