

риях с разрывом канала, что также может быть учтено расчетным путем при наличии достаточной информации о характере аварии. В настоящее время нет какой-либо доступной и достаточной экспериментальной базы данных об изотопном составе и радиационных характеристиках облученного графита РБМК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Былкин Б.К., Шапошников В.А., Романов В.Г. и др. Стратегия вывода из эксплуатации первого энергоблока Ленинградской АЭС. — Изв. Академии пром. экологии, 2001, № 1, с. 67—81.
2. Bylkin B.K., Davydova G.B., Krayushkin A.V. et al. Induced radioactivity and waste classification of reactor zone components of the Chernobyl Nuclear Power plant unit 1 after final shutdown. — Nucl. Technol., 2001, v. 136, № 1, p. 76—88.
3. Breismeister J. MCNP 4A — Monte Carlo N-Particle Transport Code System. LA-12625-M, 1993.
4. Бушуев А.В., Верзилов Ю.М., Зубарев В.Н. и др. Определение количественного содержания ^3H и ^{14}C в реакторном графите. — Атомная энергия, 1992, т. 73, вып. 6, с. 446—450.
5. Былкин Б.К., Давыдова Г.Б., Краюшкин А.В. и др. Расчетный анализ радиационных характеристик конструкций реактора 1-го блока ЧАЭС после окончательного останова. Тезисы докл. конф. Межд. черныбыльского центра, Украина, Славутич, 13—16 октября 1999, с. 4.

Поступила в Редакцию 24.12.03

УДК 621.384

РАЗРЕЗНОЙ МИКРОТРОН-РЕЦИРКУЛЯТОР СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ ВЧ-РЕЗОНАТОРАМИ

Васильев А.А., Громов А.М., Солодухов Г.В.

(Институт ядерных исследований РАН)

Для современных прецизионных исследований в области ядерной физики, где превалируют коллективные (резонансные) и двухчастичные механизмы возбуждения, необходим ускоритель электронов непрерывного действия интенсивностью среднего тока ~ 100 мкА и энергетическим разрешением $\sim 10^{-4}$. Диапазон перекрываемой энергии — до 200 МэВ. Такой ускоритель обеспечит, кроме того, возможности исследований в смежных областях науки: физике твердого тела, радиохимии, радиационном материаловедении, биологии, медицине.

Разрезной микротрон — ускоритель рециркуляционного типа со сверхпроводящими ускоряющими секциями является наиболее перспективным источником получения пучков с прецизионными параметрами [1, 2]. В таком ускорителе может быть использован ВЧ-генератор небольшой установленной мощности. При этом электрическая мощность, потребляемая ВЧ-системой ускорительного комплекса вместе с рефрижератором, оказывается небольшой по сравнению с обычным ускорителем.

Настоящая статья посвящена описанию требований и возможных решений, соответствующих выбранной схеме.

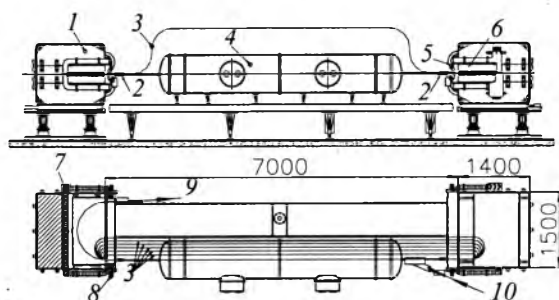
Разрезной микротрон — это ускоритель, сплошной магнит которого разделен на две одинаковые, разнесенные на некоторое расстояние части [3]. Между ними помещается секция для ускорения электронов. В магнитах пучок разворачивается на $2 \times 180^\circ$ и снова проходит через ту же ускоряющую секцию, увеличивая энергию.

Таким образом, разрезной микротрон позволяет использовать ускоряющую секцию многократно и достигать сравнительно высокой энергии на ограниченном пространстве.

Многократное прохождение электронного пучка через заворачивающие магниты вызывает трудности. На входе и выходе из магнитов пучок пересекает сильно неоднородное рассеянное поле, которое его дефокусирует в вертикальном направлении и препятствует тем самым прохождению по последующим орбитам. Для снижения этого эффекта в поворотных магнитах предусматриваются дополнительные полюса [4], расположенные вдоль входного зазора и имеющие обратное по отношению к основному магниту направление поля. Влияние рассеянного поля на фокусировку может регулироваться противопололем. Однако при этом меняется расположение орбит в магнитах, особенно на начальном этапе ускорения, который определяет условия устойчивого движения электронного пучка в дальнейшем и влияет на конструктивные характеристики ускорителя.

На трассе начальных орбит размещаются устройства, инжектирующие и фокусирующие пучок для последующего прохождения и ускорения частиц. Особенно критичным оказывается расстояние между входной трассой и первой орбитой. При введении противопололя это расстояние сокращается, что затрудняет размещение элементов ускорения и фокусировки на входной общей для всех орбит трассе. Изменение расположения орбит на начальном участке вызывает нелинейность в зависимости длины начальных орбит от энергии пучка, что уменьшает диапазон входных фаз при инжекции, отрицательно влияет на устойчивость ускорения и ограничивает минимальную энергию инжекции. На энергию инжекции влияет также отличие скорости пучка от скорости света. Поскольку частота ускоряющего напряжения велика ($1,5\text{—}3$ ГГц), незначительное запаздывание пучка приводит к существенному отставанию частиц по фазе от ускоряющего напряжения.

В настоящей работе рассматривается разрезной микротрон непрерывного действия, в котором в качестве ускоряющей структуры применяются сверхпроводящие резонаторы, охлаждаемые жидким гелием. Этот путь позволяет избежать чрезвычайно больших потерь СВЧ-мощности в обычном ускорителе непрерывного действия. В проектируемом ускорителе предполагается применить магниты ускорителя, изготовленные для разрезного микротрона РМ-175 [5] (рис. 1). В качестве ускоряющих секций для микротрона и инжекционного ускорителя могут быть применены модули, подобные установленным на ускорителе-рециркуляторе СЕВАФ с ниобиевыми сверхпроводящими резонаторами [6]. Каждая отдельная такая секция обеспечивает прирост энергии >5 МэВ при температуре 2 К (рис. 2).



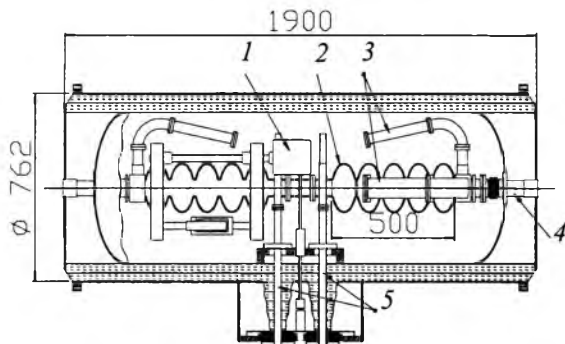
Р и с. 1. Проектируемый разрезной микротрон со сверхпроводящей ускоряющей системой; 1 — основные заворачивающие магниты; 2 — фокусирующие квадрупольные синглеты; 3 — возможные трассы обхода криостата; 4 — криостат со сверхпроводящими ускоряющими секциями; 5 — полюс противопололя; 6 — полюс основного заворачивающего поля; 7 — основная обмотка; 8 — обмотка противопололя; 9 — вывод пучка; 10 — инжекция пучка

В настоящее время разработаны и изготавливаются промышленностью компактные автономные криогенные установки замкнутого типа, не требующие постоянного обслуживания. Мощность, потребляемая криогенной установкой для отвода СВЧ-потерь в стенках ускоряющих структур микротрона на 175 МэВ и инжекционного ускорителя, с учетом дополнительных потерь через стенки криостатов и подводящих устройств составляет ориентировочно 30 кВт.

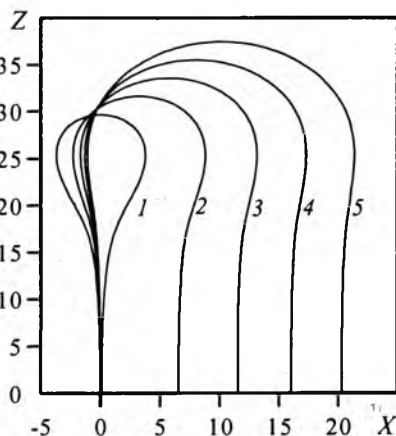
Основные параметры разрезного микротрона со сверхпроводящим ускорителем следующие:

Максимальная энергия, МэВ . . .	До 200
Ускоренный ток, мкА . . .	До 100
Энергия инжекционного ускорителя, МэВ . . .	10
Индукция в поворотных магнитах, Тл . . .	1
Частота ускоряющего напряжения, МГц . . .	1500
Равновесный прирост энергии, МэВ . . .	9,54
Равновесная фаза, рад . . .	0,301, 17,2°
Число орбит . . .	19
Расстояние между магнитами, м . . .	7
Потребление энергии криогенной системой для компенсации СВЧ- и рассеянных потерь, кВт . . .	~ 30

Для определения свойств проектируемого с помощью пакета MathCAD 7 [7] микротрона моделировали ускорение и прохождение ускоряемого пучка по всем орбитам микротрона с учетом влияния заметного отклонения от скорости света электронов в пучке и действия рассеянного поля и противоположа на поперечный эмиттанс пучка. В процессе моделирования определена минимальная энергия инжекции, при которой возможно синхронное ускорение. В большей степени энергию инжекции ограничивают снизу большие поперечные размеры ускоряющей структуры, поскольку они мешают прохождению электронного пучка на первых оборотах между магнитами. На рис. 3 показаны начальные орбиты, выходящие из поворотного магнита и отличающиеся равновесной энергией, в таблице приведены их параметры. Видно, что



Р и с. 2. Криостат с ниобиевыми ускоряющими резонаторами: 1 — устройство, регулирующее частоту резонаторов; 2 — ниобиевые сверхпроводящие резонаторы; 3 — боковые волноводные отводы для подавления поперечных мод; 4 — электропровод; 5 — волноводы, подводящие СВЧ-мощность к резонаторам



Р и с. 3. Энергия 20, 29,54, 39,08, 48,62, 58,16 МэВ первых пяти равновесных орбит в медианной плоскости при $Z = 0$ (ось x направлена параллельно зазору, ось z — в глубь зазора магнита. Зазор начинается при $z = 25$ см)

если применять ускоряющие секции типа примененных в СЕВАФ, диаметр которых 0,76 м, первая орбита, которая может обогнуть ускоряющую секцию, должна иметь энергию не ниже 50 МэВ. Для ее достижения предлагается следующая схема ускорения.

Параметры начальных орбит

Параметр	Номер орбиты				
	1	2	3	4	5
Равновесная энергия, МэВ	20	29,54	39,08	48,62	58,16
Координата выхода орбиты, см	9,92	17,4	24,34	31,05	37,64
Расстояние между соседними орбитами (2-й—1-й, 3-й—2-й и т.д.), см	—	7,48	6,94	6,71	6,6

Энергия инжекционного ускорителя выбрана равной 10 МэВ. Она обеспечивается двумя сверхпроводящими секциями, аналогичными применяемым в основном ускорителе. Энергия пучка, инжестированного в ускоряющую структуру микротрона, достигает на ее выходе 20 МэВ. Пройдя первый поворотный магнит, пучок будет отстоять от оси ускорительной секции на 10 см. Этого расстояния, как и расстояния между последующими орбитами (около 7 см), достаточно для размещения на выходном участке между магнитом и ускорительной секцией фокусирующих и отклоняющих устройств для обхода ускоряющей секции в вертикальной плоскости. Отклоняющие устройства вертикального обхода применяются на первых пяти орбитах, после чего пучок достигает энергии ~50 МэВ, достаточной для беспрепятственного прохождения на шестой орбите. Начиная с шестой орбиты пучок ускоряется в микротронном режиме. Таким образом, в микротроне создается комбинация ускорителей двух типов: с разделенными орбитами — рециркулятора и собственно микротрона. Устройство рециркуляции позволяет избежать трудностей, присущих микротрону на начальном этапе ускорения, так как на трассе обхода можно расположить дополнительные устройства для корректировки продольных и поперечных фазовых характеристик пучка.

Альтернативный вариант достижения энергии инжекции, равной 10 МэВ, состоит в создании инжекционного ускорителя на 5 МэВ с одной рециркуляцией, что удешевит криомодуль за счет уменьшения его длины. Окончательно система инжекции будет выбрана после тщательного изучения возможных вариантов.

Особенностью разрезного микротрона является воздействие на циркулирующий пучок краевых рассеянных полей в зазоре поворотного магнита [8]. При моделировании исследовали влияние противоположа на воздействие суммарного краевого поля на пучок. Установлено, что в горизонтальном направлении суммарное краевое поле не оказывает какого-либо фокусирующего действия, весь магнит воспринимается пучком при повороте на 180° как пространство дрейфа, длина которого немного возрастает на первых трех-четырех оборотах и затем не зависит от энергии. В вертикальном направлении противоположе сильно влияет на фокусирующие свойства зазора. Так, изменение противоположа на 5% может изменить действие краевого поля с фокусирующего на дефокусирующее.

Для прохождения пучка по всем орбитам на входе в первый поворотный магнит и на выходе из второго устанавливаются по квадрупольному синглету с одинаковыми градиентами, действующими на все орбиты сразу. Синглеты ориентируются так, чтобы фокусировать пучок в горизонтальном направлении и дефокусировать в вертикальном. В этом случае в плоскости симметрии, проходящей через середину дрейфовых промежутков, при соответствующем подборе градиентов в синглетах образуется горизонтальный кроссовер пучка для всех орбит. Градиенты поля при этом можно варьировать в широких пределах. В вертикальном направлении будет действовать дублет, который состоит из дефокусирующей части синглетов и фокусирующей части, образующейся под влиянием противопололя. Регулировкой противопололя при постоянных градиентах синглетов можно получить вертикальный кроссовер в плоскости симметрии для всех орбит. В описываемом варианте для этих целей потребовались синглеты длиной 10 см с градиентом 10^{-4} Тл/см. Противополе в минимуме составляет $-0,2$ Тл, диапазон настройки около 2,5%. Согласованный эмиттанс на входе в первый синглет и выходе из второго одинаковы. Для согласования эмиттансов предыдущих орбит с аксептансами последующих устанавливается отдельная фокусирующая система на трассе ускорительной секции, через которую проходят все орбиты. В расчетах использовали методы решения уравнений с периодическими коэффициентами типа уравнений Хилла [9], которые широко используются при исследовании магнитных систем кольцевых ускорителей.

Таким образом, современные возможности криогенной техники и конструкторские разработки и расчеты подтверждают, что может быть создан надежный компактный и сравнительно дешевый в эксплуатации высокоинтенсивный ускоритель электронов на энергию среднего диапазона.

Работа выполняется при поддержке РФФИ (грант 03-02-16476).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич Г.М., Джилавян Л.З., Долбилкин Б.С. и др. Проект программы исследований на Московском разрезном микротроне непрерывного действия с максимальной энергией ускоренных электронов 175 МэВ: Препринт ИЯИ РАН 1040/2000. 83 с.
2. Platz M., Beinhauer W., Brunken M. e.a. Latest developments at the S-Dalinac. — In: Proc. of EPAC 2002, p. 2700—2702.
3. Коломенский А.А. Физические основы методов ускорения заряженных частиц. М.: Изд-во МГУ, 1980, с. 213—217.
4. Babic H., Sedlacek M. A method for stabilizing particle orbits in the race-track microtron. — Nucl. Instrum. Meth., 1967, v. 56, p. 170—172.
5. Alimov A.S., Chepurinov A.S., Chubarov O.V. e.a. Moscow CW Race-Track Microtron: Preprint MSU 93-9/301, 1993. 50 p.
6. CEBAF design report. — In: Continuous Electron Beam Accelerator Facility. Newport News, Virginia, USA, 1986, p. 66.
7. Дьяконов В.П. MathCAD Plus 7.0 pro. М., СК Пресс, 1998. 345 с.
8. Штеффен К. Оптика пучков высокой энергии. М.: Мир, 1969, с. 105—109.
9. Steffen K. Basic course on accelerator optics. — In: Proc. of CAS, 1985, v. 1, p. 25—63.