

# Многоцелевой компактный циклотрон МГЦ-30

П.В. Богданов, А.А. Будтов, Ю.Н. Гавриш, В.Г. Мудролюбов,  
А.В. Попов, Ю.И. Стогов

*Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова,  
Санкт-Петербург, Россия*

Обсуждаются основные параметры универсального ускорителя, обеспечивающего глубокое регулирование энергии для четырех типов легких ионов (протонов, дейтронов, гелия-3 и гелия-4).

Более тридцати лет назад в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова разработан компактный циклотрон МГЦ-20, предназначенный для ускорения четырех типов легких ионов (протонов, дейтронов, ионов гелия-3 и гелия-4) с широким диапазоном конечных энергий. Такая универсальность обеспечивает возможность использования циклотрона как в физических исследованиях, так и в работах прикладного характера, в частности, для производства радионуклидов. В последние годы интерес к физическим исследованиям в области малых и средних энергий существенно снизился. В то же время непрерывно расширяется сфера применения циклотронов для наработки радионуклидов. Большинство производителей изотопов использует циклотроны с фиксированной индукцией магнитного поля. При этом пучок протонов на внешней мишени также имеет фиксированную энергию. Анализ показывает, что наиболее востребованы пучки с энергиями 11 МэВ; 16...18 МэВ и 30 МэВ. Естественно, в каждом случае набор производимых изотопов ограничен.

В связи с этим в циклотронах с фиксированной индукцией обычно ускоряют пучки отрицательных ионов с последующей перезарядкой на внутренней мишени. Изменение энергии выведенного пучка положительных ионов осуществляется перемещением перезарядной мишени. Наибольший диапазон энергий среди подобных ускорителей обеспечивает циклотрон Cyclone – 30 (Бельгия) – от 15 до 30 МэВ. Очевидно, что потребитель, заинтересованный в более глубоком регулировании энергии, предпочтет универсальный ускоритель.

В настоящей работе представлены результаты предварительной разработки такого ускорителя, выполненной с учетом интересов возможных потребителей.

Определяющую роль при выборе основных параметров циклотрона играет максимальная энергия протонов. Представляется целесообразным ограничиться величиной 30 МэВ, достаточной для производства наиболее популярных радионуклидов. Для улучшения эксплуатационных характеристик (по сравнению с циклотроном МГЦ – 20) предлагается существенно уменьшить диапазон регулирования частоты ускоряющего поля. При работе на второй и третьей гармониках частоты обращения в диапазоне 30...46 МГц реализуется ускорение протонов до конечных энергий 6...30 МэВ. Для ускорения дейтронов, ионов гелия-3 и гелия-4 необходимо использовать третью и четвертую гармоники, при этом можно получить диапазоны энергий 6.7...15; 10...40; 13.33...30 МэВ соответственно.

Наиболее важные характеристики циклотрона и его систем сведены в табл. 1.

**Таблица 1**

Ускоряемые ионы / диапазон энергий, МэВ

протоны / 6...30  
дейтроны / 6.7...15  
гелий – 3 / 10...40  
гелий – 4 / 13.3...30

Ток внутренней/внешней мишени, мкА

протоны / 200...50  
дейтроны / 200...50  
гелий – 3 / 50...25  
гелий – 4 / 50...25

Электромагнит:

диаметр полюса, см

120

число секторов

4

зазоры («холм»/ «долина»), мм

70/120

среднее значение магнитной индукции, Тл

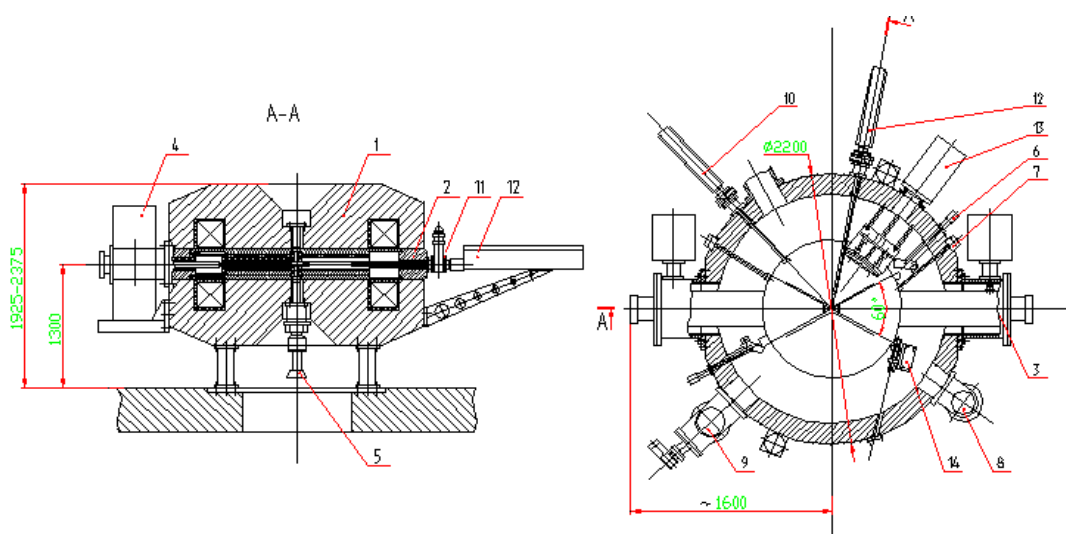
1.5

конечный радиус ускорения, см

53

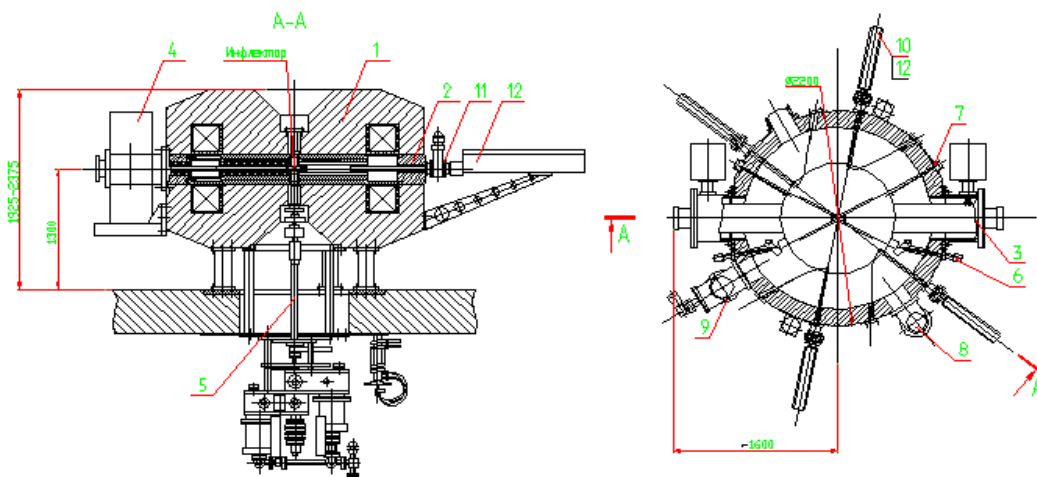
масса, т	28
максимальная потребляемая мощность, кВт	24
ВЧ-система:	
число дуантов	2
угловая протяженность дуанта, град	60
частота ускоряющего поля, МГц	30...45
максимальная амплитуда ВЧ-напряжения, кВ	35
максимальная мощность потерь на резонатор, кВт	15
максимальная мощность ВЧ-генератора, кВт	40
Максимальная потребляемая мощность, кВт	100

Компоновка основного оборудования циклотрона представлена на рис. 1



**Рис. 1.** МГЦ-30-У: 1 – электромагнит, 2 – вакуумная камера, 3 – резонатор, 4 – оконечный каскад ВЧ-генератора, 5 – дуговой ионный источник, 6 – триммер АПЧ, 7 – ВЧ-пробник, 8 – диффузионный насос, 9 – криогенный насос, 10 – внутренняя мишень, 11 – клапан, 12 – пробник, 13 – дефлектор, 14 – магнитный канал.

В данном циклотроне без изменения базовых систем можно осуществлять ускорение отрицательных ионов водорода в диапазоне конечных энергий 6...30 МэВ (см. рис. 2). Для этого вместо внутреннего источника, внутренней мишени и традиционной системы вывода пучка необходимо установить систему внешней инжекции 5 и перезарядные мишени 10.



**Рис. 2.** МГЦ-30-Н.

Принципиальной особенностью этой модификации циклотрона является фиксированный конечный радиус, с которого выводится пучок протонов, что значительно упрощает конструктивное исполнение перезарядного устройства и снижает энергопотребление, так как уменьшение конечной энергии обеспечивается за счет уменьшения магнитной индукции и частоты ускоряющего поля. По желанию потребителя могут быть поставлены две системы инъекции и вывода пучка. Таким образом, небольшие дополнительные затраты позволят реализовать возможности обеих модификаций циклотрона.

## ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Циклотрон создается на базе электромагнита броневого исполнения с диаметром полюсов 1200 мм. При этом магнитопровод, наружный диаметр которого равен 2200 мм, одновременно является обечайкой вакуумной камеры. Магнит такой конструкции не только улучшает общую компоновку оборудования циклотрона в целом, но и ослабляет радиационный фон в рабочей зоне. Магнит оснащен концентрическими обмотками, а также корректирующими обмотками, размещаемыми в долинах. Предварительный расчет выполнен для соотношения долин и холмов, имевшего место в циклотроне МГЦ – 20.

Ускоряющая система состоит из двух четвертьволновых резонаторов с дуантами угловой протяженностью  $60^\circ$ . Амплитуда ВЧ–напряжения на зазоре между дуантом и плакировкой камеры 35 кВ в диапазоне частот 30...45 МГц. Регулирование собственной частоты предполагается осуществлять трехзвенными панелями. На высшей частоте диапазона линейная плотность тока в закорачивающем фланце не превышает 40 А/см, а мощность активных потерь в каждом резонаторе не превышает 15 кВт. На низшей частоте диапазона – не более 6 кВт.

Система ВЧ–питания строится по схеме независимого возбуждения с отдельными каскадами усиления, выполненными в виде двух независимых линеек с собственной автоматикой и общими источниками питания. Система включает в себя задающий генератор, фазовый расщепитель, апериодические усилители, предоконечные и оконечные каскады усиления, системы автоподстройки амплитуды, частоты и фазы, фазовые и амплитудные датчики, а также необходимые источники питания.

В качестве задающего генератора можно использовать стандартный синтезатор Ч6 – 31 с диапазоном перестройки 0...50 МГц и дискретностью 0.01 Гц, или его западный аналог. Фазовый расщепитель, разработанный на современном уровне с двойным преобразованием частоты, позволяет как дискретно, так и плавно регулировать фазу каждого канала в диапазоне 0...360°, чем обеспечивается возможность работы ускоряющей системы в синфазном, либо в противофазном режимах. Точность взаимного фазирования каналов не хуже  $1^\circ$ . Для предварительного усиления сигнала используются унифицированные широкополосные усилители циклотрона МГЦ – 20 с выходной мощностью 50 Вт. Перечисленные узлы, а также блоки автоматической стабилизации размещаются в пультовой.

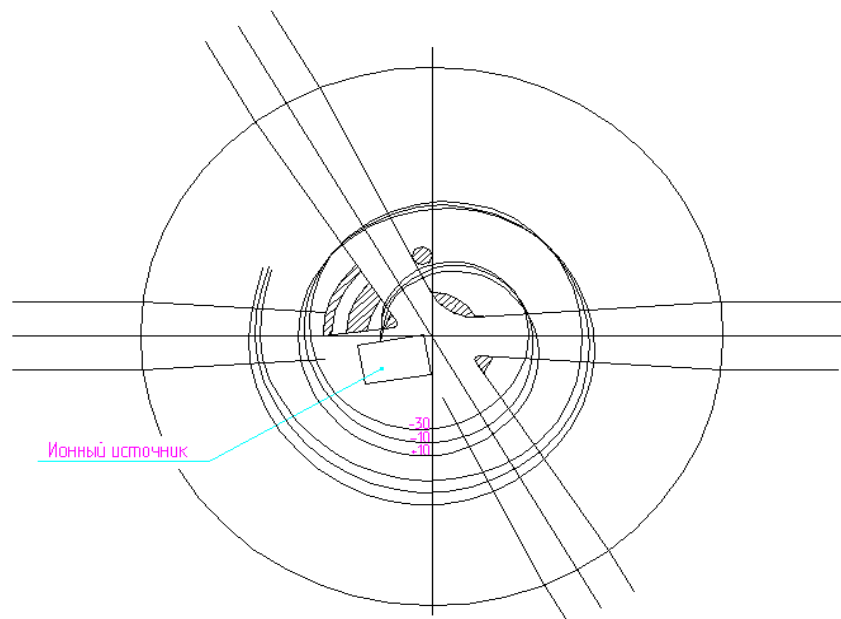
Предоконечные каскады предполагается выполнить на тетрадах ГУ – 78Б по схеме с общим катодом. Выходная мощность каждого каскада 1 кВт при КПД порядка 50%. Оконечные каскады строятся на триодах ГУ – 115А (ЗСВ 30.000) по схеме с заземленной сеткой. Коэффициент усиления по мощности не менее 20 при КПД = 65%. Предоконечный и оконечный каскады каждой линейки с устройствами охлаждения, накальными трансформаторами и развязывающими фильтрами помещаются в общий шкаф, который крепится к баку соответствующего резонатора. Связь оконечных каскадов с резонаторами – гальваническая.

Все мощные системы питания аналогичны соответствующим системам циклотрона МГЦ – 20 и имеют собственную быстродействующую защиту. Маломощные источники выполняются по схеме компенсационной стабилизации и обеспечивают  $k_{ст}$  не хуже  $10^3$ . Выпрямитель предоконечных каскадов и система питания оконечных каскадов устанавливаются в помещении источников питания.

Максимальная мощность, потребляемая ВЧ–системой от сети при работе в непрерывном режиме, 70 кВт.

## ДИНАМИКА ПУЧКА

Проведен предварительный расчет центральной области, ограниченной зоной с радиусом 80 мм. Выбран вариант, обеспечивающий оптимальную единую для всех режимов работы геометрию (изменяется только положение внутреннего источника ионов). Ускоряющий промежуток в этой области равен 10 мм, при больших радиусах он увеличивается до 20 мм. Дополнительно применены коллиматоры, уменьшающие провисание электрического поля во внутренние полости дуантов и за противодуантные рамки. Ионный источник устанавливается напротив одной из двух щелей в пуллере (рис. 3). Предусматривается дистанционное перемещение источника по двум осям без нарушения вакуума.



**Рис. 3.** Центральная область. Протоны,  $E_k = 30$  МэВ,  $Q = 2$ ,  $f = 44.8$  МГц,  $B = 1.47$  Тл.

Расчет изохронного поля показывает, что при выбранном соотношении «холмов» и «долин» фокусировка пучков на конечном радиусе обеспечивается даже без спиральности.

Система вывода пучков положительных ионов включает в себя deflectор угловой протяженностью  $65^\circ$  с максимальным напряжением 50 кВ и пассивный магнитный канал, состоящий из трех ферромагнитных брусьев.

При использовании аксиальной инъекции пучка ионов из внешнего источника конфигурация центральной области должна быть изменена, в связи с этим необходимо предусмотреть съемные детали дуантов. Вывод протонов после перезарядной мишени не требует дополнительных конструктивных элементов. Для повышения эффективности вывода предусматриваются четыре разнесенных по азимуту канала, рассчитанных на четыре диапазона энергий: 6...12; 2...18; 18...24 и 24...30 МэВ.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предлагается универсальный ускоритель нового поколения, определены пути создания его основных систем. Для не рассмотренных в данной работе узлов и систем циклотрона представляется целесообразным максимально использовать конструкторско-технологические решения, апробированные в циклотронах МГЦ – 20 и РИЦ – 35.