

Компактная ускоряющая система для циклотронов

М.Ф. Ворогушин, П.В. Богданов, В.Г. Мудролюбов, Ю.В. Смирнов
*Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им.Д.В.Ефремова
Научно-производственный комплекс "ЛУЦ", Санкт-Петербург, Россия*

Рассматривается двухдуантная ускоряющая система, представляющая собой четвертьволновый резонатор с дуантным штоком сложной формы. Для таких систем достаточно иметь по одному оконечному каскаду ВЧ-генератора, датчику дуантного напряжения, исполнительному органу системы перестройки частоты, не требуется взаимное фазирование дуантных напряжений. По сравнению с традиционными системами увеличена механическая жесткость штока и снижена линейная плотность тока вблизи закорачивающего фланца. В одночастотных ускорителях с броневым исполнением электромагнита возможно размещение резонатора внутри магнитопровода, что существенно улучшает радиационную обстановку в ускорительном зале и собственные характеристики электромагнита.

Представлены результаты численного и экспериментального моделирования, а также описание конструкции ускоряющих систем предлагаемого типа, разработанных для трех различных циклотронов НИИЭФА.

В большинстве современных циклотронов прикладного применения используются ускоряющие системы с двумя дуантами малой угловой протяженности. Связь между резонаторами, работающими на четных гармониках частоты обращения ускоряемых ионов, обеспечивается кондуктивной перемычкой, соединяющей дуанты вблизи оси электромагнита.

В НИИЭФА им. Д.В.Ефремова предложена оригинальная конструкция подобной системы, содержащая один четвертьволновый резонатор. Центральный проводник последнего включает в себя два дуанта, закрепленных на штоках сложной формы, имеющих вблизи закорачивающего фланца общую часть. Благодаря двойной кондуктивной связи (перемычка между дуантами и общая часть штоков) такая система работает как единый четвертьволновый резонатор; в результате автоматически достигается ряд очевидных преимуществ. В частности, достаточно иметь один оконечный каскад ВЧ-генератора, один измеритель дуантного напряжения, одну систему подстройки частоты, не требуется взаимная фазировка дуантных напряжений. Увеличение периметра штока вблизи закорачивающего фланца (общая часть штоков) по сравнению с традиционными системами повышает механическую жесткость центрального проводника и снижает линейную плотность тока, а, следовательно, облегчает работу контактных узлов.

Рассматриваемая система компактнее известных систем, так как дуантные штоки располагаются в зазоре между основными обмотками. В частности, в одночастотном ускорителе с магнитом броневое исполнение существует реальная возможность целиком разместить резонатор во внутренней полости магнита. Это обстоятельство позволяет улучшить собственные характеристики циклотрона, а также радиационную обстановку в ускорительном зале.

Перечисленные достоинства делают предлагаемую систему весьма перспективной для применения в широком классе циклотронов, особенно в циклотронах с магнитами броневое исполнение. В связи с этим в НИИЭФА

им. Д. В. Ефремова разработаны и исследованы три модификации ускоряющих структур применительно к разным типам циклотронов: БКЦ-20, ДЦ и РИЦ-35.

Разработка БКЦ-20 проведена в качестве естественной модернизации серийного многоцелевого циклотрона МГЦ-20 с сохранением широкого диапазона энергий 5...20 Z/A МэВ для четырех типов ускоряемых ионов. БКЦ-20 (см. рис. 1) отличается от своего предшественника броневым исполнением магнита и применением однорезонаторной ускоряющей структуры с дуантами угловой протяженностью 45° (в МГЦ-20 – Ш-образный магнит и двухрезонаторная ускоряющая система с дуантами, имеющими угловую протяженность 180° вблизи оси магнита и 135° на конечном радиусе).

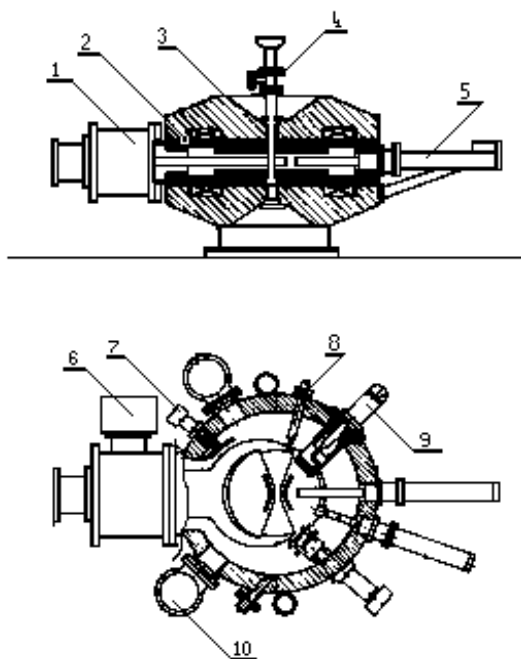


Рис. 1. Общий вид броневого компактного циклотрона.

- 1 - резонатор;
- 2 - вакуумная камера;
- 3 - электромагнит;
- 4 - ионный источник;
- 5 - пробник;
- 6 - окончательный каскад ВЧ - генератора;
- 7 - триммер АПЧ;
- 8 - ВЧ - пробник;
- 9 - дефлектор;
- 10 - вакуумный агрегат.

Вакуумный кожух, в котором размещены баки резонаторов циклотрона МГЦ, имеет длину 1450 мм (без учета юстировочных устройств), ширину 1200 мм и высоту 800 мм. Диапазон рабочих частот 8...24 МГц (ускоряющая система возбуждается на первой и третьей гармониках частоты обращения). Используются по два органа перестройки частоты для каждого резонатора – трехзвенные панели, изменяющие зазор в баке, и подвижные плакировки, изменяющие зазор между штоком и горловиной камеры. Максимальная мощность активных потерь (на высшей частоте) 80 кВт.

Резонатор циклотрона БКЦ-20 работает в диапазоне частот 22...44 МГц (вторая и четвертая гармоники частоты обращения), для перестройки достаточно иметь один орган – трехзвенные панели. Максимальная расчетная мощность потерь в резонаторе 40 кВт. Такой значительный энергетический выигрыш достигается как за счет уменьшения угловой протяженности дуантов, так и за счет сокращения диапазона рабочих частот. Габариты бака существенно меньше, чем у МГЦ-20: длина 500 мм, ширина 900 мм, высота 500 мм.

На рис. 2 представлены результаты исследования полномасштабного макета резонатора.

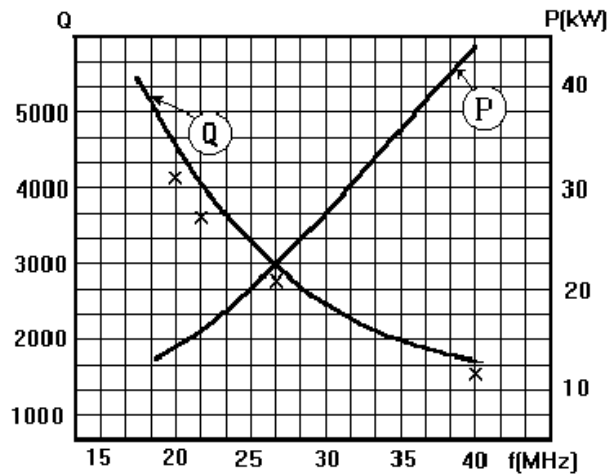


Рис. 2. Зависимость мощности потерь и добротности от частоты;
x- экспериментальные значения

Циклотрон ДЦ, предназначенный для ускорения дейтонов до энергии 3 МэВ, имеет электромагнит броневых типа и ускоряющую систему, представляющую собой четвертьволновый резонатор со 180° дуантом, возбуждаемый на рабочей частоте 10.7 МГц. Мощность потерь 5.5 кВт при амплитуде дуантного напряжения 25 кВ.

Ускоряющая система предлагаемого типа работает на второй гармонике частоты обращения ионов, 21.4 МГц. При амплитуде дуантного напряжения 15 кВ прирост энергии ионов за оборот и мощность потерь в резонаторе сохраняются. Таким образом в данном случае выигрыш достигается только в габаритах циклотрона, поскольку ускоряющая система целиком размещается внутри электромагнита, см. рис. 3. Для улучшения собственных характеристик магнита необходимо устранить окно в магнито-проводе.

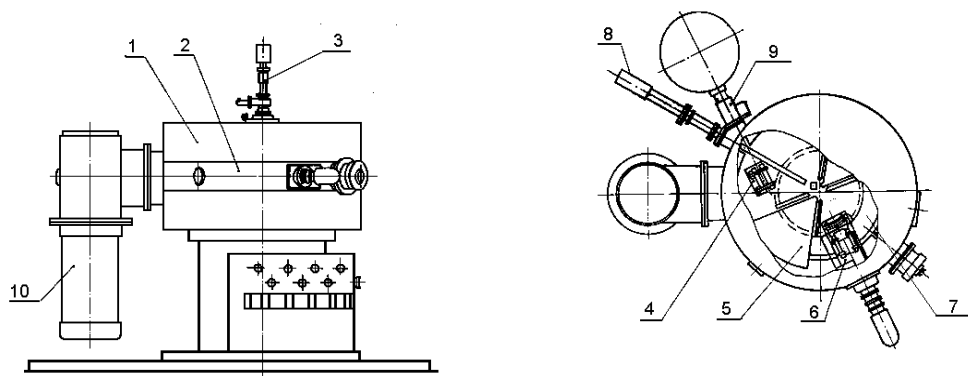


Рис. 3. Дейтронный циклотрон с двухдуантной ускоряющей системой.
1 – электромагнит, 2 – вакуумная камера, 3 – ионный источник, 4 – магнитный канал, 5 – дуант, 6 – дефлектор, 7 – дуантный шток, 8 – пробник, 9 – шибер, 10 – вакуумный агрегат.

В отличие от рассмотренных циклотронов РИЦ-35 является новой разработкой НИИЭФА и предназначен для получения отрицательных ионов водорода и

дейтерия с энергией 35 и 18 МэВ соответственно. Общий вид циклотрона представлен на рис.4.

Ускоряющая система, возбуждаемая на частоте 40.7 МГц, представляет собой резонатор с двумя дуантами угловой протяженностью 45° и размещается во внутренней полости магнита.

При амплитуде ВЧ-напряжения 50 кВ расчетная мощность потерь составляет 22 кВт. К достоинствам данной ускоряющей системы можно отнести малую линейную плотность тока (не более 20 А/см). Радиотехническая модель резонатора изготовлена в масштабе 1:2 из фольгированного текстолита. Отличие измеренной частоты, 80.2 МГц, от расчетной менее 1.5 %. Измеренная добротность 1920 значительно ниже расчетной 4300 за счет большого влияния паяных швов (30% от общей площади электропроводящих поверхностей), неучтенных переходных контактов и недостаточного качества обработки.

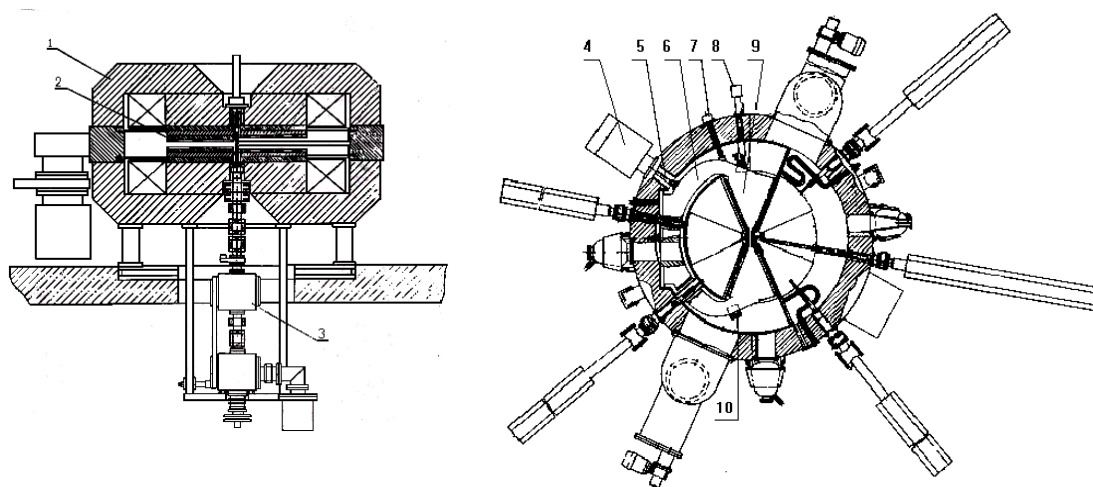


Рис. 4. Общий вид РИЦ-35. 1 – электромагнит, 2 – вакуумная камера, 3 – система внешней инжекции, 4 – оконечный каскад ВЧ-генератора, 5 – ввод ВЧ-мощности, 6 – дуантный шток, 7 – пробник, 8 – триммер АПЧ, 9 – дуант, 10 – конденсатор.

Из вышеизложенного видно, что предлагаемая ускоряющая система может быть успешно применена в широком классе циклотронов различного назначения и конструктивного исполнения.