

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМ УСКОРЕНИЯ И ВЫВОДА ПУЧКОВ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

*Д. В. Кирцев<sup>1</sup>, А. А. Акимова, А. В. Галчук, Р. М. Клопенков,  
В. Г. Мудролюбов, Ю. К. Осина*

АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты разработки резонансной ускоряющей системы и устройств вывода пучка из циклотрона многозарядных ионов. Резонансная система оснащена однозвенными панелями, обеспечивающими оперативное регулирование рабочей частоты в диапазоне 13–20 МГц. Вывод пучков из циклотрона осуществляется с помощью электростатического дефлектора и трех магнитных каналов.

The results of the development of a resonant accelerating system and devices for the output of a beam from a cyclotron of multicharged ions are presented. The resonant system is equipped with single-link panels that provide operational regulation of the operating frequency in the range of 13–20 MHz. The beams are removed from the cyclotron using an electrostatic deflector and three magnetic channels.

PACS: 29.20.dg

### ВВЕДЕНИЕ

В АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова» разрабатывается циклотрон, предназначенный для ускорения многозарядных ионов неона, кремния, аргона, железа, криптона, серебра, ксенона и висмута до энергий в диапазоне 8–15 МэВ/нуклон [1]. Разнообразие ионов, диапазон изменения их энергии и интенсивности пучков обеспечат условия проведения широкого спектра прикладных исследований, в том числе для решения ряда технологических задач.

В настоящей работе представлены результаты разработки конструкции систем, обеспечивающих ускорение и выпуск из циклотрона пучков многозарядных ионов.

### РЕЗОНАНСНАЯ УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Резонансная ускоряющая система состоит из двух зеркально-симметричных резонаторов, гальванически связанных в центре циклотрона. Дуанты расположены в противоположных долинах электромагнита, дуантные штоки выводятся через корпус вакуумной камеры горизонтально. На рис. 1 представлена 3D-модель 1/2 электромагнита циклотрона многозарядных ионов с установленной на нем резонансной системой.

---

<sup>1</sup>E-mail: kirtsev@luts.niiefa.spb.su

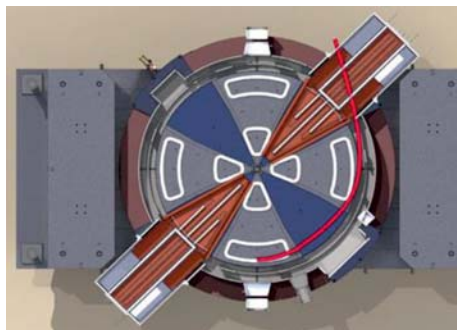


Рис. 1. 3D-модель 1/2 электромагнита и резонансной системы циклотрона многозарядных ионов

Рабочая частота резонансной системы регулируется в диапазоне 13–20 МГц. Проектная амплитуда ВЧ-напряжения составляет 70 кВ.

Регулирование рабочей частоты осуществляется за счет изменения зазоров между частью дуантного штока, находящегося в баке резонатора, и однозвенными панелями. Приводы перемещения панелей (рис. 2) изготовлены на базе тарельчатых сильфонов. Гальванический контакт панелей с передней и задней плакировкой бака обеспечивают шариковые контакты. Разработанная 3D-модель панели с контактными узлами представлена на рис. 3. Для оперативной подстройки частоты каждый резонатор снабжен триммером АПЧ с диапазоном регулирования до 50 кГц.

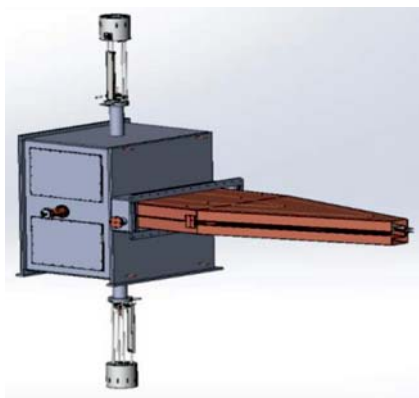


Рис. 2. Приводы перемещения панелей

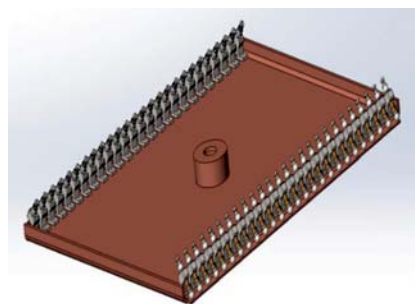


Рис. 3. 3D-модель контактной панели

Конструкцию резонансной системы отличает то, что она выполнена в виде разделяемого резонатора (верхнего и нижнего), при этом приняты специальные меры для предотвращения «прогиба» дуантов и дуантных штоков при их размещении в компактном зазоре электромагнита величиной 40 мм.

Балки, штоки и дуанты из тонколистовой меди толщиной 3 мм оснащены каркасами из алюминиевого профиля и шпильками, регулирующими положение пуллера относительно медианной плоскости электромагнита. Вертикальное сечение резонатора показано на рис. 4. Контактные панели находятся в положении, соответствующем максимальной частоте диапазона регулирования. Возбуждение резонансной системы осуществляется через кондуктивный ввод ВЧ-мощности (рис. 5). Такое решение поз-

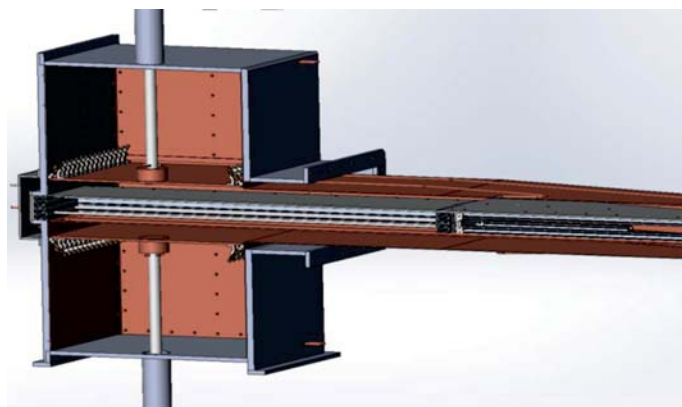


Рис. 4. Вертикальное сечение резонатора

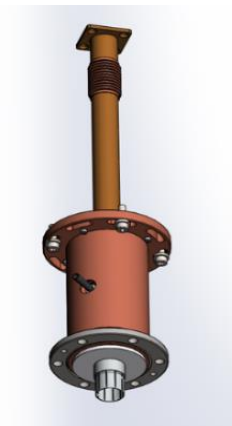


Рис. 5. Ввод ВЧ-мощности

воляет использовать резонансную систему в качестве анодного контура окончного каскада ВЧ-генератора, установленного в непосредственной близости к одному из резонаторов.

### СИСТЕМА ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ ЦИКЛОТРОНА

Для вывода пучков ускоренных ионов циклотрон оснащается дефлектором и системой магнитных каналов. Разработанная 3D-модель электромагнита циклотрона с устройствами вывода пучка представлена на рис. 6.

Электростатический дефлектор, представленный на рис. 7, устанавливается в долине и состоит из отсекающей пластины, отклоняющей высоковольтной пластины с максимальным напряжением 120 кВ и водяного дросселя. Дефлектор размещается на платформе с механизмом перемещения. Имеется независимая оперативная регулировка входной и выходной точек канала дефлектора.

Система магнитных каналов обеспечивает прохождение отклоненного дефлектором пучка без потерь в спадающем краевом поле электромагнита и получение оптимальных геометрических размеров пучка на выходном фланце циклотрона.

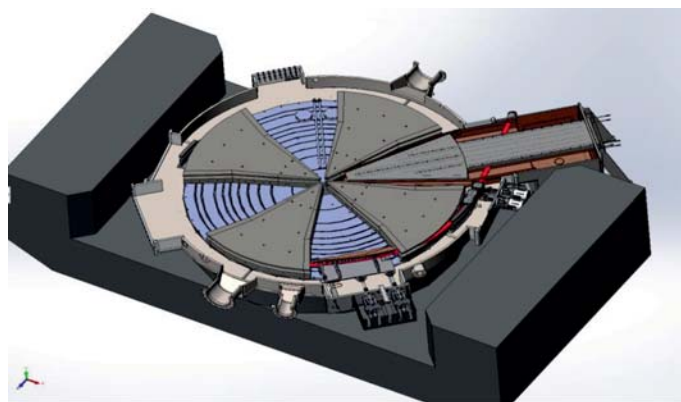


Рис. 6. 3D-модель электромагнита циклотрона многозарядных ионов с устройствами вывода ионов

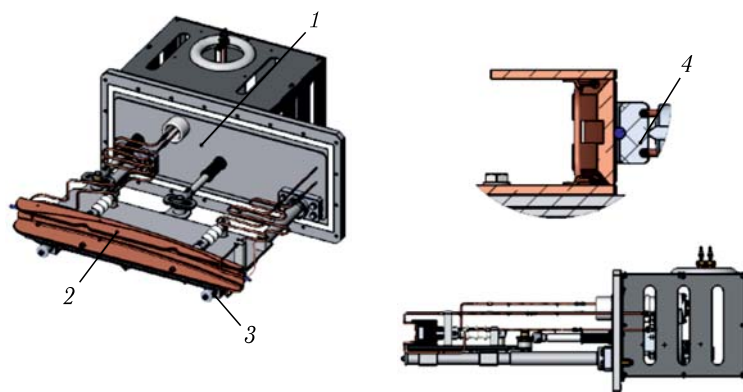


Рис. 7. 3D-модель электростатического дефлектора: 1 — основание дефлектора; 2 — септум дефлектора; 3 — направляющая дефлектора; 4 — отклоняющая пластина

Система магнитных каналов состоит из трех частей (рис. 8). Первый магнитный канал находится в области наибольших радиальных градиентов спадающего магнитного поля и является корректором градиента. Он состоит из двух железных брусков, расположенных параллельно траектории ионов. Расчетное максимальное значение положительного радиального градиента магнитного поля, вносимого брусками, составляет 1600 Гс/см. Магнитный канал 1 не имеет оперативного регулирования, являясь продолжением поля основного магнита циклотрона.

Второй и третий (рис. 9) магнитные каналы представляют собой дублет квадрупольных линз и изготовлены на базе постоянных магнитов ( $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ). Магниты с помощью кронштейнов крепятся к платформе. Обеспечена оперативная дистанционная регулировка входа и выхода платформы  $\pm 20$  мм по радиусу. Предусмотрена возможность неоперативной независимой установки входа и выхода обеих частей магнитного канала в диапазоне  $\pm 15$  мм.

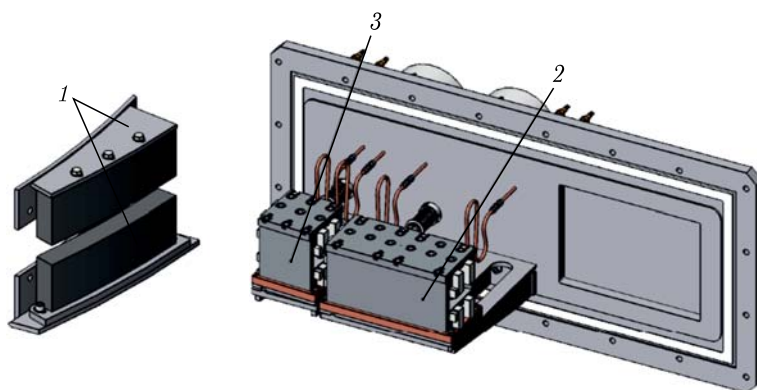


Рис. 8. 3D-модели магнитных каналов: 1 — магнитный канал № 1; 2 — магнитный канал № 2; 3 — магнитный канал № 3

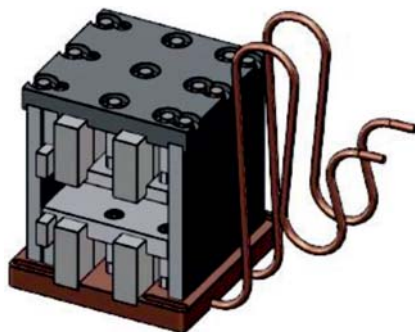


Рис. 9. 3D-модель магнитного канала №3

Для компенсации вносимого магнитным каналом возмущения типа первой гармоники циклотрон оснащается вторым идентичным магнитным каналом №1, смещенным по азимуту на  $180^\circ$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конструкторско-технологическая документация резонансной ускоряющей системы циклотрона многозарядных ионов разработана и передана в производство. Изготовлены дуанты и штоки, контактные панели и приводы их перемещения, ввод ВЧ-мощности и триммеры автоподстройки частоты, завершается изготовление баков резонаторов и узлов центральной области. Дуанты и штоки смонтированы, проведены испытания на изгиб дуантов. Подтверждена возможность компенсации прогиба за счет регулирующих шпилек. Продолжаются монтаж и наладка изготовленного оборудования циклотрона многозарядных ионов, предназначенного для ускорения ионов с отношением массы к заряду от 3 до 7 в широком диапазоне энергий 8–15 МэВ/нуклон.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Osina Yu. K., Akimova A. A., Gavrish Yu. N., Galchuck A. V., Grigorenko S. V., Grigoriev V. I., Klopenkov M. L., Klopenkov R. M., Korolev L. E., Kravchuck K. A., Kuzhlev A. N., Mezhev I. I., Mudrolyubov V. G., Smirnov K. E., Stogov Yu. I., Tsygankov S. S., Usanova M. V. Cyclotron of Multicharged Ions // Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2021), Alushta, Russia, Sept. 27 – Oct. 1, 2021. P.96–98; doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRA02.

Получено 18 ноября 2022 г.