

РАСЧЕТ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ЦИКЛОТРОНА МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Ю. К. Осина¹, З. А. Андреева, А. В. Галчук, Ю. И. Стогов

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Разработана модель центральной области циклотрона многозарядных ионов, предназначенного для ускорения ионов $^{12}\text{C}^{+3}$, $^{16}\text{O}^{+4}$, $^{18}\text{O}^{+3}$, $^{20}\text{Ne}^{+5}$, $^{28}\text{Si}^{+6}$, $^{40}\text{Ar}^{+10}$, $^{56}\text{Fe}^{+14}$, $^{84}\text{Kr}^{+18}$, $^{107}\text{Ag}^{+22}$, $^{136}\text{Xe}^{+23}$, $^{209}\text{Bi}^{+43}$ в диапазоне энергий 8–15 МэВ/нуклон. Смоделирован пуллер, экраны и плакировки. Проведен комплекс расчетов динамики ионов в центральной области циклотрона. Определены основные требования к характеристикам инфлектора.

A central region of the multiply charged ion cyclotron designed to accelerate ions $^{12}\text{C}^{+3}$, $^{16}\text{O}^{+4}$, $^{18}\text{O}^{+3}$, $^{20}\text{Ne}^{+5}$, $^{28}\text{Si}^{+6}$, $^{40}\text{Ar}^{+10}$, $^{56}\text{Fe}^{+14}$, $^{84}\text{Kr}^{+18}$, $^{107}\text{Ag}^{+22}$, $^{136}\text{Xe}^{+23}$, $^{209}\text{Bi}^{+43}$ in the energy range 8–15 MeV/nucleon is developed. Puller, screens, and cladding for the cyclotron are modeled. A number of calculations on ion dynamics in the central region of the cyclotron have been carried out. Numerical acceleration of ions in the central region of the cyclotron is performed. The basic requirements for the inflector characteristics are determined.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых зон для ускорения пучка и его дальнейшего формирования в циклотроне является центральная область. В настоящей работе представлены результаты разработки проекта центральной области циклотрона многозарядных ионов, предназначенного для ускорения ионов с отношением массового числа к заряду $A/Z = 3-7$ ($^{12}\text{C}^{+3}$, $^{16}\text{O}^{+4}$, $^{18}\text{O}^{+3}$, $^{20}\text{Ne}^{+5}$, $^{28}\text{Si}^{+6}$, $^{40}\text{Ar}^{+10}$, $^{56}\text{Fe}^{+14}$, $^{84}\text{Kr}^{+18}$, $^{107}\text{Ag}^{+22}$, $^{136}\text{Xe}^{+23}$, $^{209}\text{Bi}^{+43}$) в диапазоне энергий 8–15 МэВ/нуклон.

Цель работы заключалась в разработке расчетной 3D-модели центральной области резонансной системы циклотрона многозарядных ионов (МЗИ), проведении расчетов электростатического поля. Полученные трехмерные карты полей использовались в расчетах динамики частиц.

1. 3D-МОДЕЛЬ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

Центральная область циклотрона многозарядных ионов разрабатывалась для ускорения ионов с различным отношением массового числа к заряду. С учетом разной частоты обращения частиц и зависимости среднего магнитного поля по радиусу для

¹E-mail: osina@luts.niiefa.spb.su

разных ионов [1] была создана оптимальная модель центральной области резонансной системы (рис. 1 и 2), для которой выполнялось центрирование пучка ионов с различным отношением массового числа к заряду. Небольшие отклонения (несколько миллиметров) зоны центров для разных ионов корректировались с помощью введения первой гармоники. Основные параметры центральной области циклотрона МЗИ представлены в таблице.

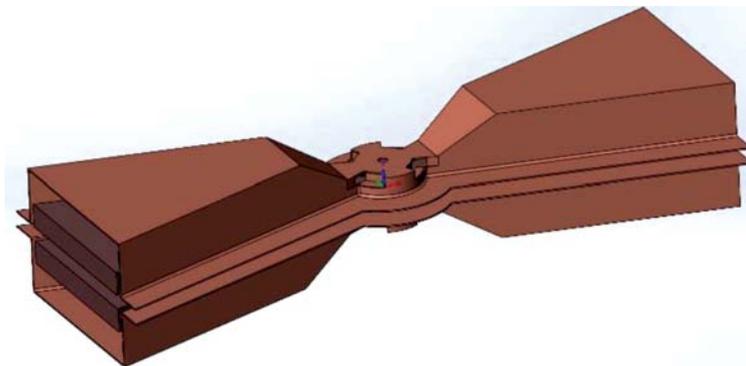


Рис. 1. 3D-модель центральной области резонансной системы

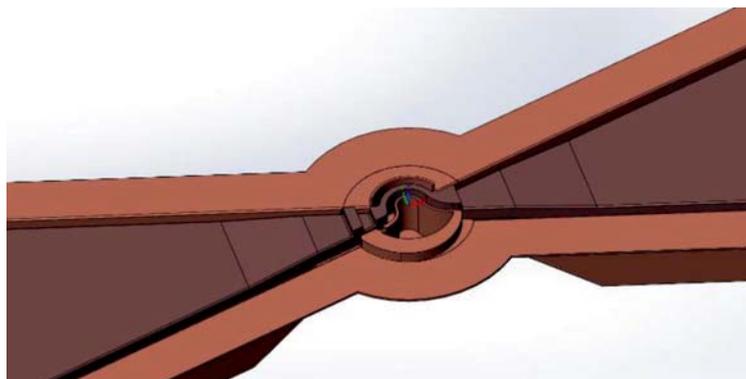


Рис. 2. Сечение центральной области резонансной системы в медианной плоскости

Основные параметры

Параметр	Значение
Угловая протяженность дуантов, °	30
Потенциал на дуантах, кВ	70
Гармоника ВЧ-поля	4
Частота ВЧ-поля, МГц	13–20
Радиус инжекции ионного пучка в медианную плоскость циклотрона, см	5,02
Индукция магнитного поля в центре, Тл	1,29–1,61

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Моделирование резонансной системы в центральной области выполнялось для 1/2-й части модели с плоскостью симметрии XU при $Z = 0$. Распределение напряженности электрического поля в медианной плоскости представлено на рис.3.

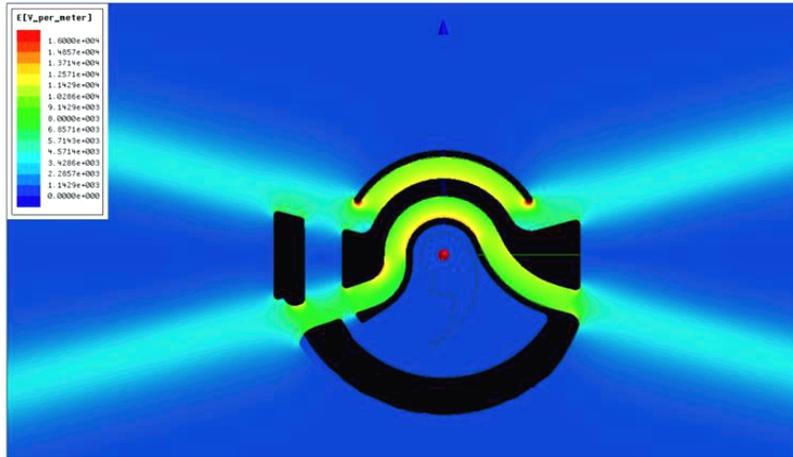


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля в медианной плоскости

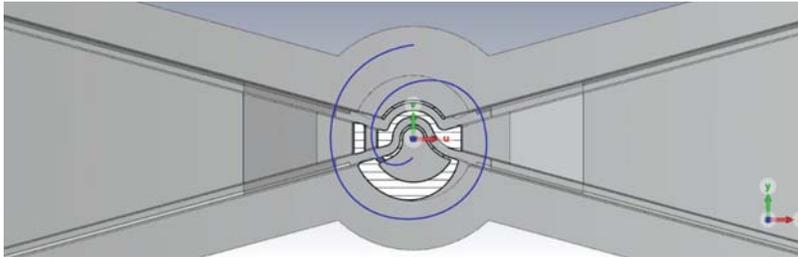


Рис. 4. Траектория опорной частицы

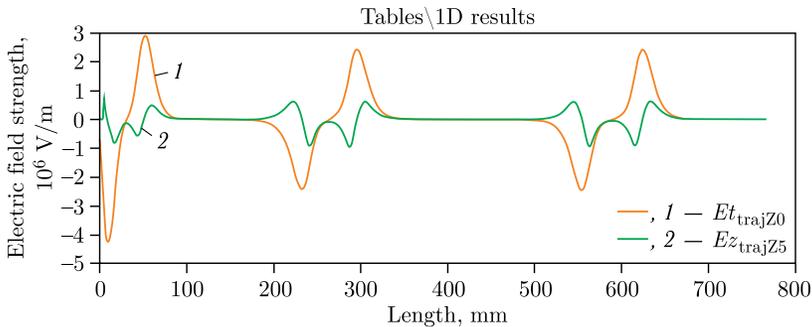


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Тангенциальная (желтая, 1) и вертикальная (зеленая, 2) составляющие напряженности электрического поля на расстоянии 5 мм от медианной плоскости вдоль траектории опорной частицы

Плакировки и экраны находятся под нулевым потенциалом, потенциал на пуллере $U_p = 70$ кВ.

Зависимости тангенциальной составляющей поля от координаты опорной частицы в медианной плоскости (рис. 4) и поперечной составляющей от координаты опорной частицы, поднятой на 5 мм над медианной плоскостью, изображены на рис. 5.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА ИОНОВ

Численное моделирование динамики пучка ионов проводилось в трехмерных электрических полях. Расчеты траекторий заключались в интегрировании уравнений движения Ньютона–Лоренца, по результатам которых были определены параметры пучка ионов на выходе электростатического инфлектора. На рис. 6 показаны траектории ионов $^{209}\text{Bi}^{+43}$ в центральной области. По данным ускоренных орбит сделаны выводы о центрировании пучка в течение первых 20 оборотов и фазовом акцептансе пучка. Поперечный вертикальный и горизонтальный эмиттансы пучка в точке влета в ускоряющий зазор равны 90π мм · мрад. Энергия инжекции частиц равна 24 кэВ/З.

Рассчитанные центры ускоренных частиц $^{209}\text{Bi}^{+43}$ изображены на рис. 7. Фазовый акцептанс пучка равен $\pm 0,2$ рад. Отклонение зоны центров порядка 3–5 мм корректировалось с помощью введения первой гармоники на радиусе от 30 до 70 см гармоническими катушками, расположенными на секторах [2]. Вертикальные траектории пучка — на рис. 8.

Рассчитанные центры ускоренных частиц $^{20}\text{Ne}^{+5}$ изображены на рис. 9. Изменяя фазу и амплитуду первых гармоник магнитного поля, удается добиться центрирования всех ионов, ускоряемых в циклотроне МЗИ. Величина первой гармоники составляет порядка 3 Гс [3].

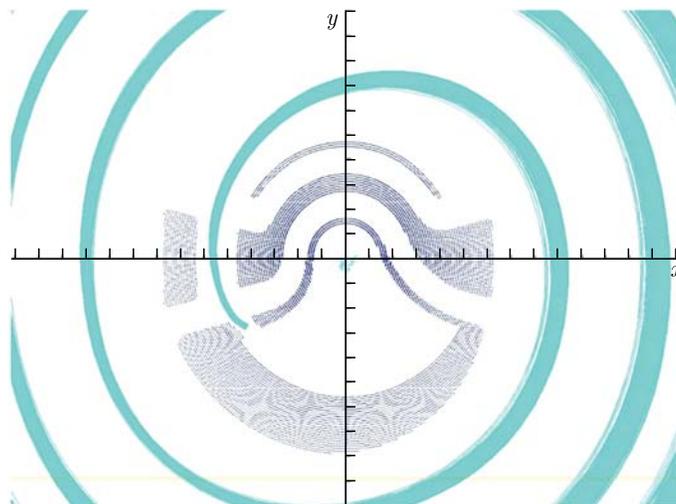


Рис. 6. Траектории пучка ионов $^{209}\text{Bi}^{+43}$ в центральной области циклотрона в режиме 700 кА-витков

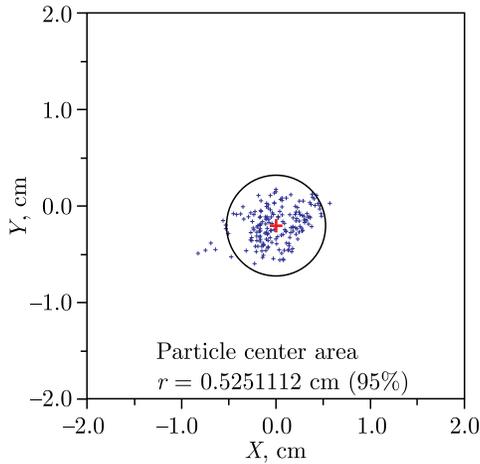


Рис. 7. Зона центров при ускорении набора ионов $^{209}\text{Bi}^{+43}$ до энергии 235,9 МэВ (первые 20 оборотов)

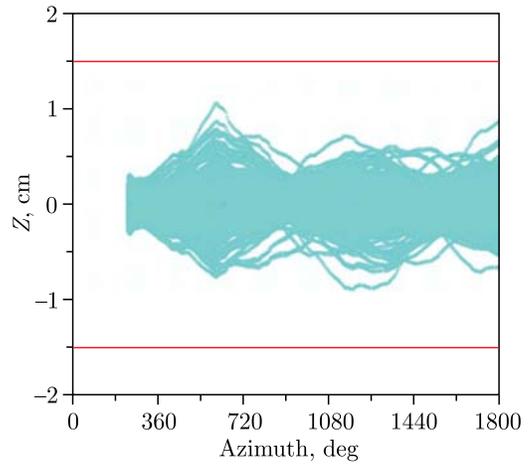


Рис. 8. Вертикальные траектории пучка в центре циклотрона при ускорении ионов $^{209}\text{Bi}^{+43}$. Показаны вертикальные апертуры ± 15 мм

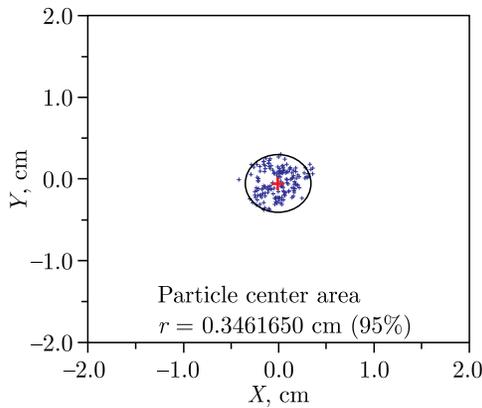


Рис. 9. Зона центров при ускорении набора ионов $^{20}\text{Ne}^{+5}$ до энергии 17,1 МэВ (первые 20 оборотов)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численного моделирования динамики пучка была разработана модель центральной области резонансной системы. Выполнен комплекс расчетных работ по определению характеристик резонансной системы в центральной области циклотрона с учетом регулирования энергии многозарядных ионов в диапазоне 8–15 МэВ/нуклон.

Разработана расчетная модель центральной области циклотрона МЗИ. Проведены расчеты электрического поля и сформирована карта поля для использования в расчетах динамики пучка. Сформированное электрическое поле для ускорения ионов, имеющих $A/Z = 3-7$, удовлетворяет требованиям вертикальной и радиальной устой-

чивости частиц в центральной области и широкому фазовому диапазону частиц, захваченных в ускоряющий режим. Построены траектории пучков в центральной области и определены зоны центров ионов $^{209}\text{Bi}^{+43}$ и $^{20}\text{Ne}^{+5}$.

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. (RuPAC2021), Alushta, Russia, Sept. 27 – Oct. 1, 2021. P. 96–98; doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRA02.
2. Osina Yu. K., Gavrish Yu. N., Galchuck A. V., Stogov Yu. I. Modeling of the Magnetic System of the Cyclotron of Multicharged Ions // Proc of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC2021), Alushta, Russia, Sept. 27 – Oct. 1, 2021. P. 216–218; doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA52.
3. Осина Ю. К., Гавриш Ю. Н., Галчук А. В., Григоренко С. В., Григорьев В. И., Клопенков Р. М., Королев Л. Е., Кравчук К. А., Кузлев А. Н., Межев И. И., Мудролюбов В. Г., Смирнов К. Е., Стогов Ю. И., Усанова М. В. Циклотронный комплекс многозарядных ионов // Ядерные и электрофизические установки — источники мощных ионизирующих излучений: Сб. тез. докл. научно-техн. конф., РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Россия, 15–18 июня 2021 г. С. 5–6.

Получено 18 ноября 2022 г.