

Научная статья

УДК 621.384.633

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-50-56

Центральная область циклотрона Ц-250*

Илья Васильевич Горбунов¹, Анатолий Васильевич Галчук
Сергей Викторович Григоренко, Юлия Константиновна Осина
Сергей Степанович Цыганков

АО «НИИЭФА»
Санкт-Петербург, Россия

¹gorbunov@luts.niiefa.spb.su

Аннотация

Рассмотрены особенности моделирования центральной области и динамики пучка ионов водорода для циклотрона Ц-250, предназначенного для работы в широком диапазоне регулирования энергии 30–250 МэВ. На основе моделирования динамики пучка ионов в диапазоне регулирования энергии определена оптимальная конфигурация центральной области ускоряющей системы циклотрона Ц-250. В разработанной центральной области выполняются требования по обеспечению достаточной вертикальной фокусировки частиц электрическим полем при захвате пучка в широком фазовом диапазоне. Отклонение центров орбит частиц от геометрического центра циклотрона составляет 2–3 мм для всего диапазона регулирования магнитного поля циклотрона.

Ключевые слова

циклотрон, центральная область, динамика пучка, центрирование орбит

Для цитирования

Горбунов И. В., Галчук А. В., Григоренко С. В., Осина Ю. К., Цыганков С. С. Центральная область циклотрона Ц-250 // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 50–56. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-50-56

Central Region of the C-250 Cyclotron

Ilya V. Gorbunov¹, Anatoly V. Galchuk, Sergey V. Grigorenko
Yulia K. Osina, Sergey S. Tsygankov

NIIEFA JSC, St. Petersburg,
Russian Federation

¹gorbunov@luts.niiefa.spb.su

Abstract

The peculiarities of modeling of the central region and hydrogen ion beam dynamics for the cyclotron C-250 designed for operation in a wide energy control range of 30–250 MeV are considered. On the basis of modeling of ion beam dynamics in the energy control range, the optimal configuration of the central region of the accelerating system of the C-250 cyclotron is determined. The developed central region fulfills the requirements to ensure sufficient vertical focusing of particles by the electric field while capturing the beam in a wide phase range. The deviation of the centers of

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Горбунов И. В., Галчук А. В., Григоренко С. В., Осина Ю. К., Цыганков С. С., 2024

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2
Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2

particle orbits from the geometric center of the cyclotron is 2-3 mm for the whole range of regulation of the cyclotron magnetic field.

Keywords

Cyclotron, central region, beam dynamics, orbital centering

For citation

Gorbunov I. V., Galchuk A. V., Grigorenko S. V., Osina Y. K., Tsygankov S. S. Central Region of the C-250 Cyclotron. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 50–56 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-50-56

Расчетная модель центральной области циклотрона

Разработанная центральная область (рис. 1) циклотрона Ц-250 [1] предназначена для ускорения ионов водорода в широком диапазоне регулирования энергии 30–250 МэВ [2; 3]. Для обеспечения ускорения ионов во всем диапазоне энергий уровень среднего магнитного поля в центральной области должен регулироваться от 0,8 до 1,08 Тл за счет изменения тока основной обмотки. Для формирования изохронного магнитного поля предусмотрены корректирующие обмотки, устанавливаемые как на секторах электромагнита, так и в центральной области [4]. Корректирующие обмотки, располагаемые на секторах, будут иметь возможность изменения первой гармоники магнитного поля для обеспечения оптимального центрирования пучка ионов, а концентрическая обмотка в центре будет обеспечивать создание «бампа» магнитного поля, необходимого для уменьшения потерь в вертикальной плоскости на электродах ускоряющей системы.

Особое внимание уделялось режиму на нижней границе магнитного поля циклотрона, соответствующего энергии ускоренных протонов 125 МэВ, который использовался также для ускорения отрицательных ионов водорода, для обеспечения внешнего пучка протонов в диапазоне 30–125 МэВ, получаемого путем обдирки Н- на радиально перемещаемой фольге.

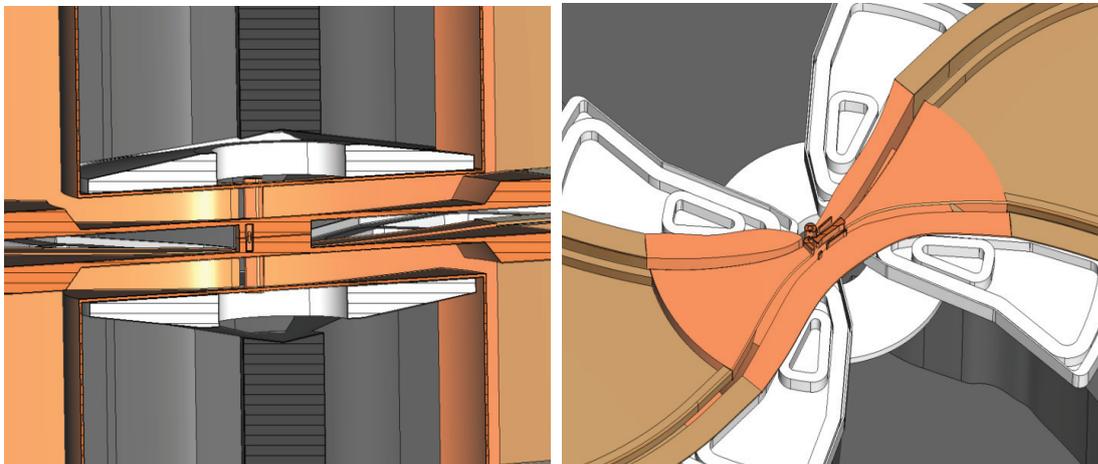


Рис. 1. Центральная область в поперечных сечениях
Fig. 1. The central region in cross sections

Разработанный источник ионов типа Пеннинга с холодными катодами генерирует ионы водорода с током извлекаемого пучка ионов до 50 мкА. Расстояние между источником и пуллерам составляет 11 мм. 3D-модель центральной области резонансной системы изображена на рис. 2.

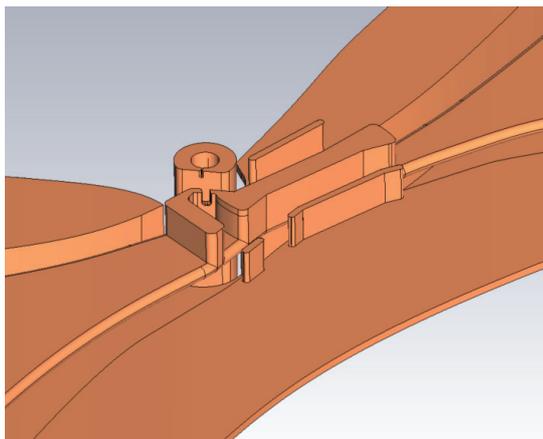


Рис. 2. 3D-модель ЦО резонансной системы
Fig. 2. 3D model of the CR of the resonant system

Основные параметры магнитной и ускоряющей систем в центре циклотрона представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры центральной области

Table 1

Parameters of the central region

Параметр	Значение
Угловая протяженность дуантов в центре циклотрона	25°–42°
Апертура дуантов, мм	25
Потенциал на дуантах, кВ	36–72
Кратность ускорения	2
Частота ВЧ-поля, МГц	24–33,2
Радиус установки щели ионного источника, мм	36
Расстояние между ионным источником и пуллером, мм	11
Диапазон изменения индукции магнитного поля в центре, Тл	0,8–1,08

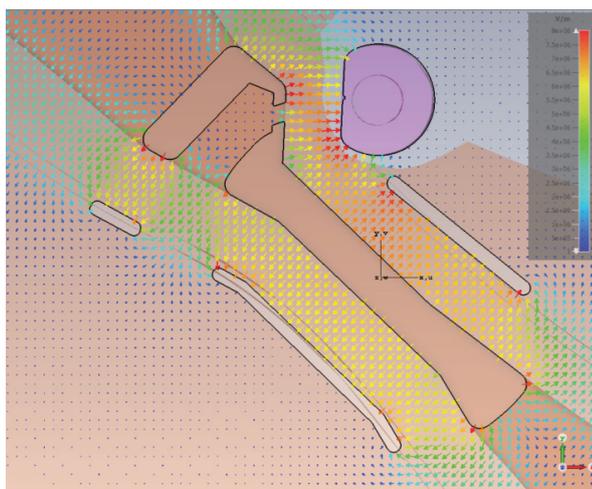


Рис. 3. Распределение вектора электрического поля в медианной плоскости

Fig. 3. Distribution of the electric field vector in the median plane

Моделирование центральной области резонансной системы проводилось для половины модели с плоскостью симметрии XU . В щели источника на расстоянии 1 мм от внешней стенки источника ионов задавалась граница плазмы для более точного расчета распределения вектора электрического поля в области щели источника ионов. Источник ионов и плакировки резонансной системы находятся под нулевым потенциалом. Амплитуда ВЧ-напряжения между дуантами и плакировками задавалась равной 72 кВ. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

Моделирование динамики пучка ионов водорода

Моделирование динамики пучка проводилось с помощью программ, созданных в АО «НИИЭФА». Для расчетов использовались трехмерная карта электрического поля и карта магнитного поля в медианной плоскости. Динамика пучка рассчитывалась с фазовым диапазоном частиц на выходе из ионного источника 0,4 радиана и однородным распределением частиц на границе плазмы ионного источника. Результаты расчета для магнитного поля в центре 1,08 Тл представлены на рис. 4. В центре магнита для вертикальной фокусировки пучка (рис. 5) применен «бамп» магнитного поля, равный 80 Гс, который может быть создан как перемещением пробки электромагнита, так и concentрической обмоткой в центре. Оптимальное центрирование пучка (рис. 6) соответствовало дуантному напряжению 72 кВ.

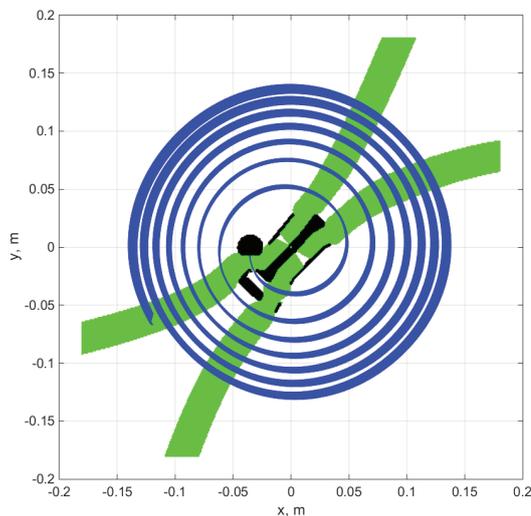


Рис. 4. Траектории пучка протонов для режима 250 МэВ в медианной плоскости
Fig. 4. Proton beam trajectories for the 250 MeV mode in the median plane

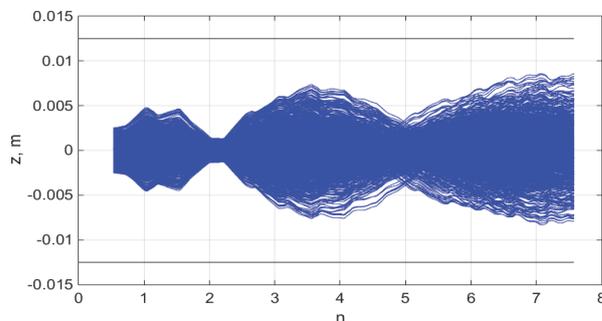


Рис. 5. Траектории пучка протонов для режима 250 МэВ в вертикальной плоскости
Fig. 5. Proton beam trajectories for the 250 MeV mode in the vertical plane

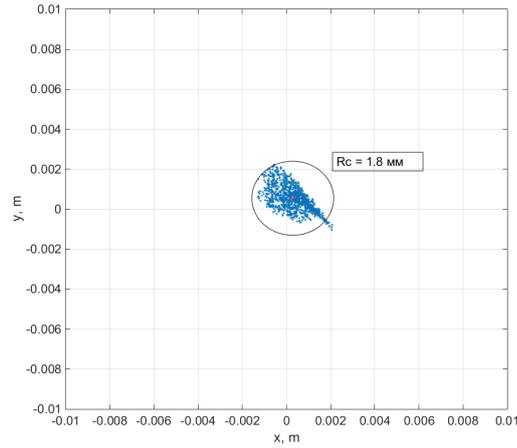


Рис. 6. Область центров пучка протонов для режима 250 МэВ
 Fig. 6. Area of proton beam centers for the 250 MeV mode

При моделировании динамики пучка на нижней границе магнитного поля циклотрона, соответствующего энергии ускоренных протонов 125 МэВ, напряжение на дуантах было снижено в два раза до 36 кВ для обеспечения подобия орбит в центральной области. Результаты расчета траекторий в вертикальной плоскости и положения центров орбит представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

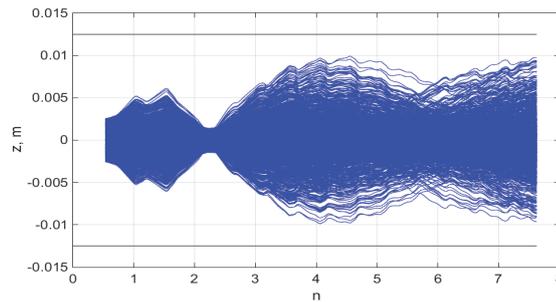


Рис. 7. Траектории пучка протонов для режима 125 МэВ в вертикальной плоскости
 Fig. 7. Proton beam trajectories for the 125 MeV mode in the vertical plane

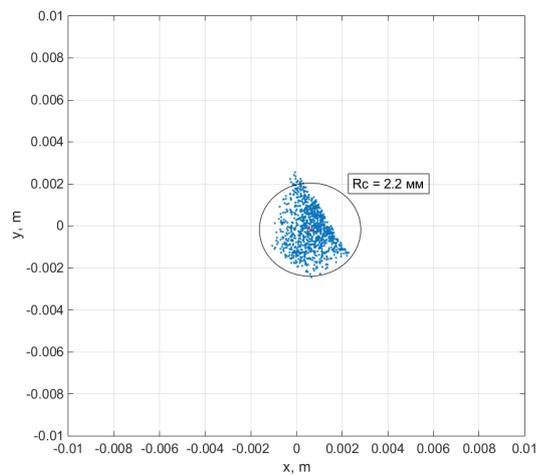


Рис. 8. Область центров пучка протонов для режима 125 МэВ
 Fig. 8. Area of proton beam centers for the 125 MeV mode

Заключение

В работе представлены результаты моделирования 3D-модели центральной области резонансной системы и динамики пучка ускоренных ионов водорода.

В результате численного моделирования динамики пучка разработана модель центральной области, обеспечивающая оптимальное ускорение ионов водорода в полном диапазоне регулирования магнитного поля циклотрона.

Сформированные электрические и магнитные поля в центре циклотрона Ц-250 удовлетворяют требованиям по вертикальной и радиальной фокусировке частиц, центрированию пучка и широкому фазовому диапазону частиц, захваченных в режим ускорения.

Список литературы

1. Горбунов И. В., Галчук А. В., Осина Ю. К., Стогов Ю. И. Расчет центральной области циклотрона Ц-250 // *OPENSCIENCE 2022: Сб. тезисов IX Всероссийского молодежного научного форума*. Гатчина, 2023. СПб.: Изд-во Петербург. ин-та ядерной физики им. Б. П. Константинова, 2023. С. 59.
2. Smirnov K. E., Gavrish Yu. N., Galchuck A. V., Grigorenko S. V., Grigoriev V. I., Klopenkov R. M., Korolev L. E., Kravchuck K. A., Kuzhlev A. N., Mezhov I. I., Mudrolyubov V. G., Osina Yu. K., Stogov Yu. I., Usanova M. V. CYCLOTRON SYSTEM C-250 // *RuPAC2021, Alushta, Russia. 27th Russian Particle Acc. Conf.* P. 105–107. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRA05.
3. Смирнов К. Е., Гавриш Ю. Н., Галчук А. В., Григоренко С. В., Григорьев В. И., Клопенков Р. М., Королёв Л. Е., Кравчук К. А., Кужлев А. Н., Межов И. И., Мудролюбов В. Г., Осина Ю. К., Стогов Ю. И., Усанова М. В. Циклотронный комплекс Ц-250 // *Ядерные и электрофизические установки – источники мощных ионизирующих излучений: Сб. тез. докл. науч.-техн. конф. 15–18 июня 2021 г.* Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2021. С. 29.
4. Osina Yu. K., Ananyeva O. V., Galchuck A. V., Gorbunov I. V., Grigorenko S. V., Mudrolyubov V. G., Smirnov K. E., Stogov Yu. I. Modeling of Magnetic Field and Dynamics of H⁻, H⁺ Ions for the Cyclotron C-250. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 2023. No. 20. P. 846–849.

References

1. Gorbunov I. V., Galchuk A. V., Osina Y. K., Stogov Y. I. Calculation of the central region of the C-250 cyclotron. *OPENSCIENCE 2022 Collection of abstracts of IX All-Russian Youth Scientific Forum*. Gatchina, 2023. Publisher: Federal State Budgetary Institution “St. Petersburg Institute of Nuclear Physics named after B. P. Konstantinov National Research Institute of Nuclear Physics”. B. P. Konstantinov National Research Center “Kurchatov Institute” (Gatchina), p. 59. (in Russ.)
2. Smirnov K. E., Gavrish Yu. N., Galchuck A. V., Grigorenko S. V., Grigoriev V. I., Klopenkov R. M., Korolev L. E., Kravchuck K. A., Kuzhlev A. N., Mezhov I. I., Mudrolyubov V. G., Osina Yu., Stogov Yu. I., Usanova M. V. CYCLOTRON SYSTEM C-250. *RuPAC2021, Alushta, Russia. 27th Russian Particle Acc. Conf.* doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRA05, pp. 105–107.
3. Smirnov K. E., Gavrish Yu., Klopenkov R. M., Korolev L. E., Kravchuk K. A., Kuzhlev A. N., Mezhov I. I., Mudrolyubov V. G., Osina Yu. K., Stogov Yu. I., Usanova M. V. Cyclotron complex C-250. *Nuclear and Electrophysical Facilities Sources of Powerful Ionizing Radiation: Collection of Abstracts of Scientific and Technical Conference June 15-18, 2021*. Snezhinsk: RFNC-VNIITF Publishing House, 2021, p. 29. (in Russ.)

4. **Osina Yu. K., Ananyeva O. V., Galchuck A. V., Gorbunov I. V., Grigorenko S. V., Mudrolyubov V. G., Smirnov K. E., Stogov Yu. I.** Modeling of Magnetic Field and Dynamics of H^- , H^+ ions for the Cyclotron C-250. *Phys. Part. Nuclei Lett.*, 2023, no. 20, pp. 846–849.

Сведения об авторах

Горбунов Илья Васильевич, аспирант, инженер-исследователь 2-й категории

Галчук Анатолий Васильевич, ведущий научный сотрудник

Григоренко Сергей Викторович, кандидат технических наук, начальник лаборатории

Осина Юлия Константиновна, кандидат технических наук, начальник лаборатории

Цыганков Сергей Степанович, ведущий исследователь

Information about the Authors

Ilya V. Gorbunov, Graduate Student, Research Engineer

Anatoly V. Galchuk, Leading Researcher

Sergey V. Grigorenko, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory

Yulia K. Osina, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory

Sergey S. Tsygankov, Lead Researcher

*Статья поступила в редакцию 13.09.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023;
принята к публикации 12.01.2024*

*The article was submitted 13.09.2023; approved after reviewing 15.09.2023;
accepted for publication 12.01.2024*