

Моделирование магнитной системы и динамики пучка в циклотроне СС-18

К. С. Воробьев¹, Ю. К. Осина¹, Д. К. Кострин^{2✉}

¹ АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ dkkostrin@mail.ru

Аннотация. Циклотрон СС-18 предназначен для ускорения отрицательных ионов водорода и для наработки широкого спектра радионуклидов. С целью упрощения его конструкции была выбрана унифицированная конфигурация резонансной системы. Была построена модель основного электромагнита циклотрона и получено распределение индукции магнитного поля в медианной плоскости. На основе анализа статических равновесных орбит была определена изохронная кривая, соответствующая рабочей частоте резонансной системы и ускорению пучка ионов на второй гармонике. В ходе серии расчетов трехмерного распределения электрического поля и динамики частиц в центре циклотрона определена оптимальная конфигурация элементов центральной области. По результатам оптимизации конфигурации центральной области был увеличен коэффициент захвата ионов в ускорение при сохранении приемлемого радиуса зоны центров. На этапе проведения моделирования динамики частиц в зоне основного ускорения были осуществлены проверка изохронности ускорения и оценка огибающей пучка в аксиальной плоскости. Для определения углового положения обдирочных устройств было проведено моделирование выпуска частиц со статических равновесных орбит. Получены оптимальные радиальные и азимутальные координаты мест расположения графитовой перезарядной фольги.

Ключевые слова: изохронный циклотрон, резонансная система, трехмерное моделирование, основной электромагнит, динамика частиц, коэффициент захвата, обдирочное устройство, перезарядная фольга

Для цитирования: Воробьев К. С., Осина Ю. К., Кострин Д. К. Моделирование магнитной системы и динамики пучка в циклотроне СС-18 // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 8. С. 36–41. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-8-36-41.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Modeling of the Magnetic System and Beam Dynamics in the CC-18 Cyclotron

K. S. Vorobev¹, Yu. K. Osina¹, D. K. Kostrin^{2✉}

¹ JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ dkkostrin@mail.ru

Abstract. The CC-18 cyclotron is designed to accelerate negative hydrogen ions and is intended to generate a wide range of radionuclides. In order to simplify its design, a unified configuration of the resonant system was chosen. In this work, a model of the main electromagnet of the cyclotron was constructed and the distribution of the magnetic field induction in the median plane was obtained. Based on the analysis of static equilibrium orbits, an isochronous curve corresponding to the operating frequency of the resonant system and the acceleration of the ion beam at the second harmonic was determined. During a series of calculations of the three-dimensional distribution of the electric field and particle dynamics in the center of the cyclotron, the optimal configuration of the elements of the central region was determined. As a result of optimizing the configuration of the central

region, the ion capture coefficient in the acceleration was increased while maintaining an acceptable radius of the center zone. At the stage of modeling the dynamics of particles in the zone of the main acceleration, the isochroneity of acceleration was checked and the beam envelope in the axial plane was estimated. To determine the angular position of the stripping devices, a simulation of the release of particles from static equilibrium orbits was carried out. Optimal radial and azimuthal coordinates of the graphite stripper foils are obtained.

Keywords: isochronous cyclotron, resonant system, three-dimensional modeling, main electromagnet, particle dynamics, capture coefficient, stripping device, stripper foil

For citation: Vorobev K. S., Osina Yu. K., Kostrin D. K. Modeling of the Magnetic System and Beam Dynamics in the CC-18 Cyclotron // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 8. P. 36–41. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-8-36-41.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Циклотрон СС-18 предназначен для ускорения отрицательных ионов водорода H^- до энергии 18 МэВ с максимальным током выводимого пучка 150 мкА. Ускоритель будет использован для наработки широкого спектра радионуклидов. Ближайшим аналогом разработки является циклотрон СС-18/9 [1]. С целью упрощения конструкции выбрана унифицированная конфигурация резонансной системы [2], а из состава полюсных наконечников исключены поворотные шиммы, обеспечивавшие получение пучка дейтронов. Также добавлена возможность регулировки конечной энергии выводимого пучка протонов в диапазоне 12–18 МэВ.

Моделирование распределения магнитного поля в рабочей области. Электромагнит циклотрона СС-18 – броневого типа с вертикальным расположением медианной плоскости. Магнитопровод включает в себя две балки, два монолитных полюсных наконечника, корпус вакуумной камеры, две центральные пробки и восемь вкладышей. Полюсные наконечники имеют четырехсекторную структуру, а изохронное поле сформировано за счет регулировки азимутальной протяженности секторов [3], [4]. Основные параметры электромагнита представлены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры основного электромагнита циклотрона СС-18

Tab. 1. Parameters of the main electromagnet of the CC-18 cyclotron

Параметр	Значение
Диаметр электромагнита, мм	2000
Ширина электромагнита, мм	1150
Диаметр полюсного наконечника, мм	1100
Угловая протяженность секторов, ...°	44
Зазор между секторами/долинами, мм	33/118
Мощность электромагнита, кВт	13.5
Масса активной стали/меди, кг	20 400/1900
Максимальная индукция магнитного поля, Тл	
в межсекторном зазоре	2.040
в центре	1.336

По результатам серии трехмерных расчетов была построена 3D-модель половины основного электромагнита циклотрона (рис. 1, а) и получено распределение индукции магнитного поля в медианной плоскости (рис. 1, б). В обратном магнитопроводе предусмотрены отверстия и ниши для размещения навесного оборудования, вакуумной и резонансной систем [5].

На основе анализа статических равновесных орбит была определена изохронная кривая, соответствующая рабочей частоте резонансной системы $\omega_{RF} = 40.68$ МГц и ускорению пучка ионов H^- на второй гармонике. На рис. 2, а представлены средняя индукция магнитного поля и расчетная изохронная кривая. В сформированном поле по статическим орбитам были также рассчитаны частоты бетатронных колебаний в диапазоне энергий 0.5...19 МэВ с шагом 0.25 МэВ. Построена диаграмма движения рабочей точки в фазовой плоскости v_r-v_z , представленная на рис. 2, б. Рабочая точка не пересекает опасные резонансы.

Расчет динамики пучка. Моделирование динамики заряженных частиц осуществлялось в трех областях: в зонах центра, основного ускорения и выпуска пучка. При проектировании центральной области проводились трехмерные расчеты, при которых необходимо было определить геометрию пуллера, экранов и плакировок, влияющих на движение пучка и его характеристики [6], [7]. На рис. 3 представлена расчетная 3D-модель половины центральной области резонансной системы циклотрона.

В ходе серии расчетов трехмерного распределения электрического поля и динамики частиц в центре циклотрона определена оптимальная конфигурация элементов центральной области [8]. Наибольшее влияние на форму и центрирование пучка оказывает электрическое поле первых двух

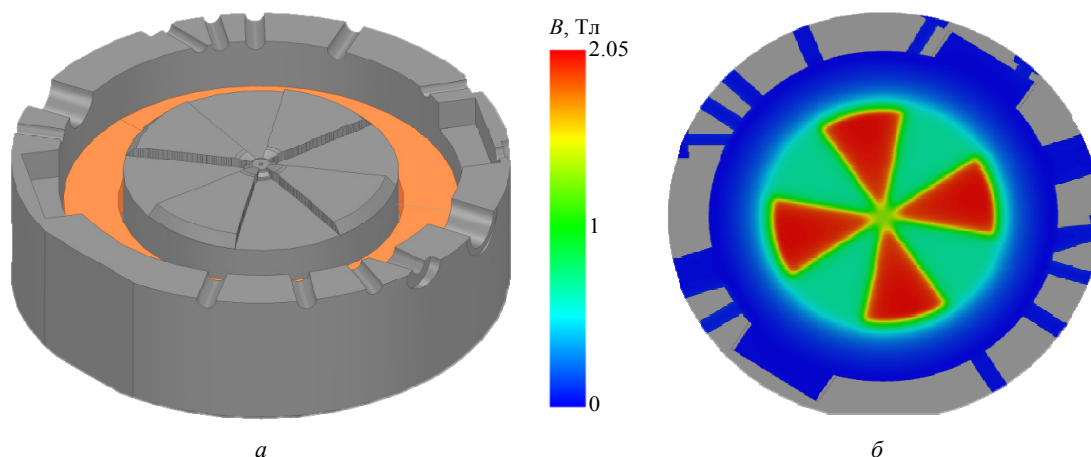


Рис. 1. Расчетная 3D-модель электромагнита циклотрона (а) и распределение магнитного поля в медианной плоскости (б)
Fig. 1. Computational 3D-model of a cyclotron electromagnet (a) and distribution of the magnetic field in the median plane (b)

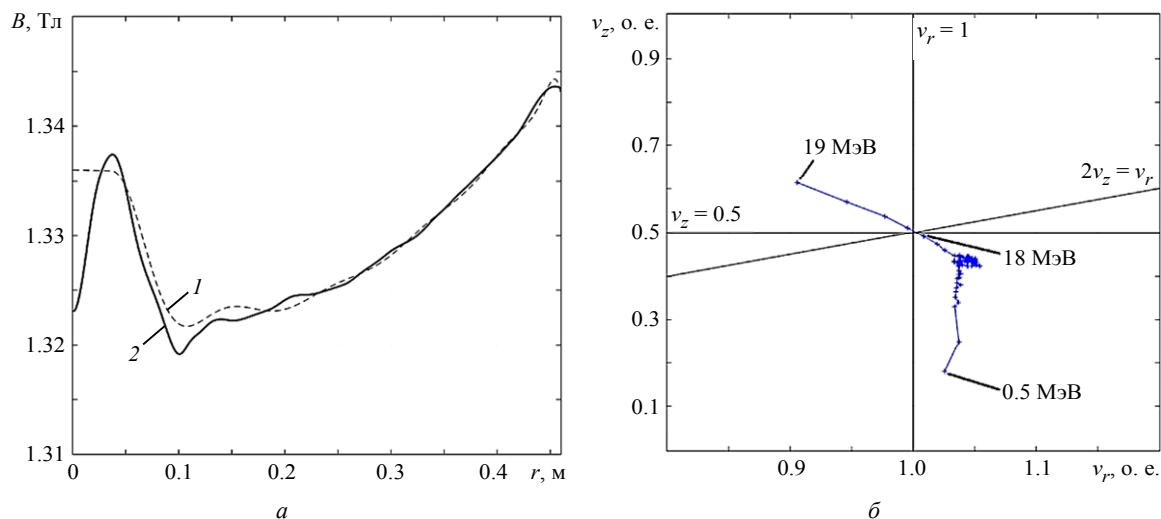


Рис. 2. Индукция среднего магнитного поля (а) и диаграмма рабочей точки (б):

1 – изохронная кривая; 2 – среднее магнитное поле

Fig. 2. Average magnetic field induction (a) and operating point diagram (b):

1 – isochronous curve; 2 – average magnetic field

ускоряющих зазоров, поэтому в первую очередь проводилась оптимизация геометрии пуллера и экрана инфлектора. Распределение электрического поля в центральной области циклотрона представлено на рис. 4 (сечение по медианной плоскости).

На рис. 5 показаны траектория движения пучка в медианной плоскости для первых тринадцати оборотов и соответствующая им зона центров ($W_k = 1$ МэВ). Красные области 1 обозначают расположение ускоряющих зазоров, черные 2 отображают сечение элементов центральной области, а бирюзовые 3 – положение секторов полюсного наконечника. Центрирование пучка определялось по траекториям частиц с энергией 1 МэВ посредством расчета дополнительного четырнадцатого оборота только в

магнитном поле с выключенным электрическим полем (рис. 5, б). Радиус зоны центров составляет 5.48 мм (95 %), а смещение зоны центров – 0.96 мм.

С целью увеличения количества захваченных в ускорение частиц варьировалась апертура пуллера и плакировок. По результатам оптимизации конфигурации центральной области был увеличен коэффициент захвата ионов в ускорение при сохранении приемлемого радиуса зоны центров. Отклонение центральной точки зоны центров от нуля составило менее 1 мм, а коэффициент захвата в ускорение – 14.5 % в фазовом диапазоне $\pm\pi$. На рис. 6 представлена форма пучка в аксиальной плоскости на первых тринадцати оборотах в центральной области.

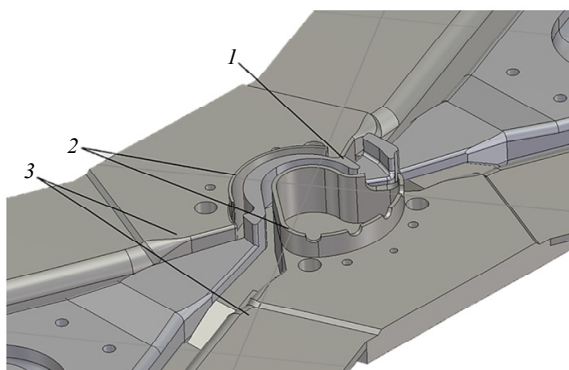


Рис. 3. Расчетная 3D-модель половины центральной области резонансной системы циклотрона:
 1 – пуллер; 2 – экраны; 3 – плакировки
 Fig. 3. Computational 3D-model of half of the central region of the cyclotron resonance system:
 1 – puller; 2 – shields; 3 – plating

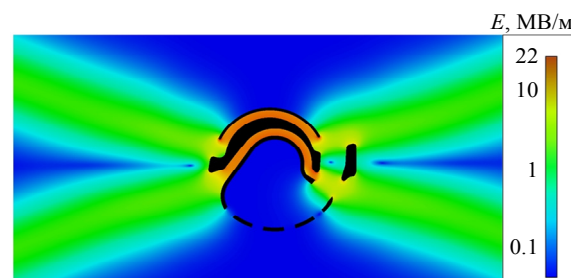


Рис. 4. Распределение электрического поля в центральной области (сечение по медианной плоскости)
 Fig. 4. Distribution of the electric field in the central region (cross section along the median plane)

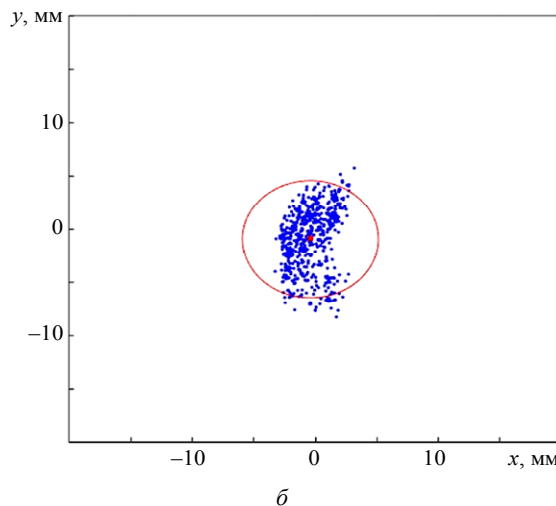
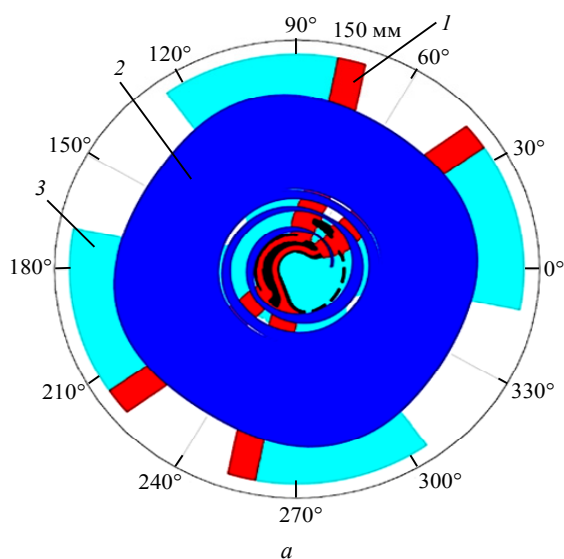


Рис. 5. Траектория движения пучка в центральной области (а) и соответствующая зона центров (б)
 Fig. 5. Trajectory of the beam in the central region (а) and the corresponding zone of the centers (б)

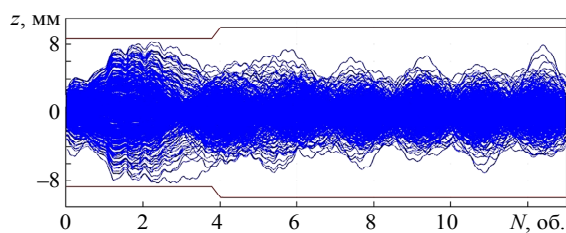


Рис. 6. Пучок в аксиальной плоскости в центральной области
 Fig. 6. Beam in the axial plane in the central region

На этапе проведения моделирования динамики частиц в зоне основного ускорения были проверены изохронность ускорения и оценка огибающей пучка в аксиальной плоскости. По результатам расчета ускорение пучка до конечной энергии происходило в среднем за 195 об. при дуантном напряжении 38 кВ. Максимальная амплитуда аксиальных колебаний составила 6 мм (рис. 7).

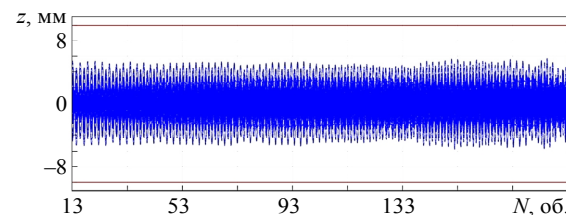


Рис. 7. Пучок в аксиальной плоскости в зоне основного ускорения
 Fig. 7. Beam in the axial plane in the zone of the main acceleration

Выпуск пучка из ускорительной камеры осуществляется в двух направлениях: с одной стороны выводится пучок протонов с фиксированной энергией 18 МэВ [9], с другой – в диапазоне 12...18 МэВ, путем перезарядки ионов H^- (рис. 8). Для этого используются два обдирочных устройства с тремя расположениями графитовой фольги на каждом [10]. На одном из двух выводов протоны с разной конечной энергией направляются вдоль единой оси за счет ди-

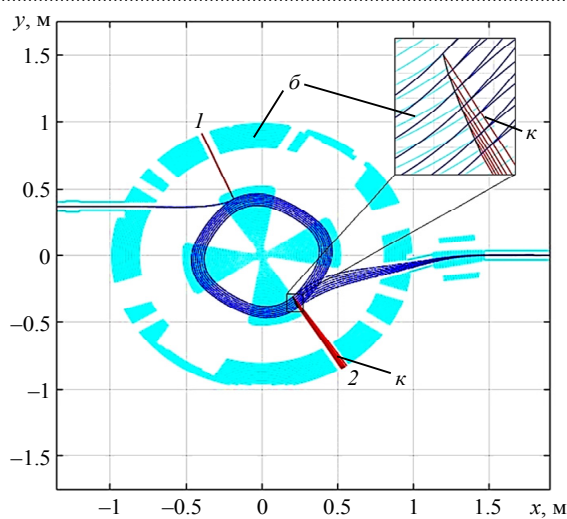


Рис. 8. Схема вывода пучка в рабочем энергетическом диапазоне
Fig. 8. Beam output scheme in the operating energy range

польного согласующего электромагнита, устанавливаемого в начале тракта транспортировки пучка.

Для определения углового положения обдирочных устройств 1 и 2 было проведено моделирование выпуска частиц со статических равновесных орбит. В расчетах также учтено влияние

магнитного поля в выводных отверстиях. Получены оптимальные радиальные и азимутальные координаты мест расположения графитовой перезарядной фольги. На рис. 8 представлены траектории движения протонов, полученных после перезарядки ускоренных ионов H^- в диапазоне энергий 12...18 МэВ с шагом 1 МэВ. Бирюзовым цветом б обозначены положения секторов, сечения обратного магнитопровода в медианной плоскости, согласующего электромагнита и стенок ионопровода. Красные линии к на графике соответствуют азимуту расположения края перезарядной фольги.

Заключение. Результаты моделирования динамики пучка в центральной зоне циклотрона демонстрируют хороший коэффициент захвата частиц (14.5 %) из системы внешней инжекции, приемлемые размеры (5.5 мм) и значение смещения области центров (~1 мм). В зоне основного ускорения движение пучка можно считать практически изохронным, что позволяет судить о корректности конфигурации расчетного распределения магнитного поля. В ходе моделирования вывода пучка протонов из рабочей зоны рассчитаны радиальные и азимутальные координаты мест расположения графитовой фольги обдирочных устройств.

Список литературы

1. Создание компактных циклотронов СС-18/9, СС-12 и МСС-30/15 для производства медицинских радиоизотопов / П. В. Богданов, М. Ф. Ворогушин, Е. А. Ламзин, В. П. Кухтин, С. Е. Силаев, Ю. И. Стогов, А. П. Строкач, С. Е. Сычевский, Н. Ф. Шилкин // Журн. технической физики. 2011. Т. 81, № 10. С. 68–83.
2. Особенности конструирования магнитных систем ряда современных компактных изохронных циклотронов с использованием методов математического моделирования / П. В. Богданов, В. П. Кухтин, Е. А. Ламзин, Ю. И. Стогов, С. Е. Сычевский // Журн. технической физики. 2010. Т. 80, № 9. С. 125–133.
3. Формирование магнитного поля в изохронном циклотроне СС-30/15 / Ю. К. Осина, А. В. Галчук, М. А. Емельянов, К. Е. Смирнов, Ю. И. Стогов, А. П. Строкач, С. С. Цыганков // Письма в журн. «Физика элементарных частиц и атомного ядра». 2020. Т. 17, № 4. С. 492–496.
4. Андрианов С. Н., Артамонов С. А. Оптимальный алгоритм и программы построения изохронного магнитного поля на основе статических равновесных орбит в ускорителях с азимутальной вариацией // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2009. № 2. С. 3–14.
5. Нестеров С. Б., Васильев Ю. К., Андросов А. В. Методы расчета вакуумных систем. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 220 с.
6. Смирнов В. Л. Компьютерное моделирование компактного изохронного циклотрона // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2015. Т. 46, № 6. С. 1738–1769.
7. Смирнов В. Л. Циклотрон и его моделирование // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2021. Т. 52, № 5. С. 1158–1304.
8. Смирнов В. Л. Проектирование центральной зоны компактного циклотрона // Письма в журн. «Физика элементарных частиц и атомного ядра». 2019. Т. 16, № 1. С. 40–45.
9. Вывод протонного пучка из высокоэнергетического циклотрона с глубоким регулированием энергии / Ю. К. Осина, А. В. Галчук, Ю. И. Стогов, Д. В. Кирцев, А. П. Клинов // Письма в журн. «Физика элементарных частиц и атомного ядра». 2024. Т. 21, № 3. С. 299–306.
10. Jaggi V., Pavan R. A., Zeisler S. K. Production of carbon stripper foils for high-power cyclotrons / Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2006. Vol. 561. № 1. P. 1–3. doi: 10.1016/j.nima.2005.12.183.

Информация об авторах

Воробьев Кирилл Сергеевич – инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории магнитных систем и динамики пучка в циклических ускорителях НТЦ «ЛУЦ». АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», дор. на Металлострой, д. 3, Санкт-Петербург, 196641, Россия.
E-mail: vorobyev@luts.niiefa.spb.su

Осина Юлия Константиновна – канд. техн. наук, заместитель начальника отделения, начальник лаборатории магнитных систем и динамики пучка в циклических ускорителях НТЦ «ЛУЦ». АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», дор. на Металлострой, д. 3, Санкт-Петербург, 196641, Россия.
E-mail: osina@luts.niiefa.spb.su

Кострин Дмитрий Константинович – д-р техн. наук, профессор кафедры электронных приборов и устройств. СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: dkkostrin@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

References

1. Sozdanie kompaktnykh ciklotronov SS-18/9, SS-12 i MSS-30/15 dlja proizvodstva medicinskih radioizotopov / P. V. Bogdanov, M. F. Vorogushin, E. A. Lamzin, V. P. Kuhtin, S. E. Silaev, Ju. I. Stogov, A. P. Strokach, S. E. Sychevskij, N. F. Shilkin // Zhurn. tehnicheckoj fiziki. 2011. T. 81, № 10. S. 68–83. (In Russ.).
2. Osobennosti konstruirovaniya magnitnykh sistem rjada sovremennykh kompaktnykh izohronnykh ciklotronov s ispol'zovaniem metodov matematicheskogo modelirovaniya / P. V. Bogdanov, V. P. Kuhtin, E. A. Lamzin, Ju. I. Stogov, S. E. Sychevskij // Zhurn. tehnicheckoj fiziki. 2010. T. 80, № 9. S. 125–133. (In Russ.).
3. Formirovanie magnitnogo polja v izohronnom ciklotrone SS-30/15 / Ju. K. Osina, A. V. Galchuk, M. A. Emel'janov, K. E. Smirnov, Ju. I. Stogov, A. P. Strokach, S. S. Cygankov // Pis'ma v zhurn. «Fizika jelementarnykh chastic i atomnogo jadra». 2020. T. 17, № 4. S. 492–496. (In Russ.).
4. Andrianov S. N., Artamonov S. A. Optimal'nyj algoritm i programmy postroeniya izohronnogo magnitnogo polja na osnove staticheskikh ravnovesnykh orbit v uskoriteljah s azimutal'noj variaciej // Vestn. Sankt-Peterburgskogo un-ta. Prikladnaja matematika. Informatika. Processy upravleniya. 2009. № 2. S. 3–14. (In Russ.).
5. Nesterov S. B., Vasil'ev Ju. K., Androsov A. V. Metody rascheta vakuumnykh sistem. M.: Izd-vo MJeI, 2004. 220 s. (In Russ.).
6. Smirnov V. L. Komp'juternoe modelirovanie kompaktного izohronnogo ciklotrona // Fizika jelementarnykh chastic i atomnogo jadra. 2015. T. 46, № 6. S. 1738–1769. (In Russ.).
7. Smirnov V. L. Ciklotron i ego modelirovanie // Fizika jelementarnykh chastic i atomnogo jadra. 2021. T. 52, № 5. S. 1158–1304. (In Russ.).
8. Smirnov V. L. Proektirovanie central'noj zony kompaktного ciklotrona // Pis'ma v zhurn. «Fizika jelementarnykh chastic i atomnogo jadra». 2019. T. 16, № 1. S. 40–45. (In Russ.).
9. Vyvod protonnogo puchka iz vysokojenergeticheskogo ciklotrona s glubokim regulirovaniem jenergii / Ju. K. Osina, A. V. Galchuk, Ju. I. Stogov, D. V. Kircev, A. P. Klinov // Pis'ma v zhurn. «Fizika jelementarnykh chastic i atomnogo jadra». 2024. T. 21, № 3. S. 299–306. (In Russ.).
10. Jaggi V., Pavan R. A., Zeisler S. K. Production of carbon stripper foils for high-power cyclotrons / Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2006. Vol. 561. № 1. P. 1–3. doi: 10.1016/j.nima.2005.12.183.

Information about the authors

Kirill S. Vorobev – research engineer of the magnetic system and beam dynamics in cyclic accelerators laboratory. JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», Rd. to Metallostroy, 3, Saint Petersburg, 196641, Russia.
E-mail: vorobyev@luts.niiefa.spb.su

Yulia K. Osina – Cand. Sci. (Eng.), deputy head of department, Head of Laboratory of Magnetic System and beam dynamics in cyclic accelerators. JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», Rd. to Metallostroy, 3, Saint Petersburg, 196641, Russia.
E-mail: osina@luts.niiefa.spb.su

Dmitry K. Kostrin – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices. Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: dkkostrin@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

Статья поступила в редакцию 25.05.2025; принята к публикации после рецензирования 05.07.2025; опубликована онлайн 30.10.2025.

Submitted 25.05.2025; accepted 05.07.2025; published online 30.10.2025.