

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОННОГО ЦИКЛОТРОНА НА ЭНЕРГИЮ 18 МэВ

Ю. К. Осина^{a, 1}, И. В. Горбунов^a, В. Г. Мудролюбов^a, К. Е. Смирнов^a

^a АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, 196641, Россия

Основной целью нового проекта АО «НИИЭФА» является создание оптимизированного по стоимости циклотрона для производства радионуклидов непосредственно в медицинских центрах. Циклотрон предназначен для получения протонов в диапазоне энергий 12–18 МэВ с током выведенного пучка 150 мкА. Циклотрон будет оснащен внутренним источником отрицательных ионов водорода. Медианная плоскость броневых электромагнитов — горизонтальная. Резонансная система работает на второй гармонике частоты обращения ионов, 40,68 МГц.

The main goal of the new project of JSC NIIIEFA is to create a cost-optimized cyclotron for the production of radionuclides directly in medical centers. The cyclotron is designed to produce protons in the energy range of 12–18 MeV with a beam output current of 150 μ A. The cyclotron will be equipped with an internal source of negative hydrogen ions. The median plane of the armored electromagnet is horizontal. The resonant system operates at the second harmonic of the ion conversion frequency, 40.68 MHz.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваемый в работе циклотрон предназначен для получения протонов в диапазоне энергий 12–18 МэВ с током выведенного пучка 150 мкА. Целью данной работы является создание максимально простого по конструкции и обслуживанию циклотрона, по стоимости доступного для установки в медицинском центре. Ранее АО «НИИЭФА» разработаны и поставлены конечным пользователям четыре комплекса на базе циклотронов СС-18/9 [1–3]. Циклотроны обеспечивают ускорение отрицательных ионов водорода и дейтерия с выпуском пучков протонов и дейтронов за счет перезарядки при прохождении обдирочных фольг. Циклотроны оснащены системами внешней инжекции и для удобства обслуживания имеют электромагниты с вертикальной медианной плоскостью. Электромагниты — броневых типа, обратный магнитопровод одновременно выполняет функции корпуса вакуумной камеры. Высоко-частотные системы работают на фиксированной частоте, соответствующей четвертой гармонике для дейтронов и второй гармонике для протонов.

¹E-mail: osina@luts.niiefa.spb.su

Были выделены основные направления оптимизации: замена системы внешней инжекции внутренним источником; применение варианта с горизонтальным расположением медианной плоскости электромагнита; исключение режимов с получением ускоренных дейтронов; использование в качестве высоковакуумного откачного средства диффузионных насосов.

Циклотроны с максимальной энергией протонов 18 МэВ используются, как правило, для производства ультракороткоживущих радионуклидов и некоторых короткоживущих радионуклидов, например, Си-64, I-123. Высокие требования к интенсивности пучков обычно не предъявляются. Применение внутреннего источника позволит существенно упростить циклотрон. При горизонтальном расположении медианной плоскости весь периметр корпуса вакуумной камеры становится доступным для размещения навесного оборудования, а система подъема подвижной части электромагнита проще и дешевле системы ее продольного перемещения.

ЭЛЕКТРОМАГНИТ ЦИКЛОТРОНА

Электромагнит циклотрона имеет четырехсекторную магнитную структуру. Боковые грани секторов прямые, сходятся, не достигая оси электромагнита около 20 мм. Боковые накладки не предусматриваются, изохронная топология обеспечивается путем доработки вкладышей, установленных в соответствующие пазы вдоль плоскости симметрии секторов [4]. Исходная форма вкладышей — наружная поверхность заподлицо с поверхностью секторов. В процессе формирования магнитного поля высота вкладышей уменьшается.

При таком конструктивном решении уменьшается количество узлов, требующих доработки, согласование с размещением резонансной системы происходит на первом этапе проектирования и не требует корректировки. Для сохранения высокой эффективности диффузионных насосов в долинах выполнены сквозные отверстия $\varnothing 220$ мм. На рис. 1 представлена расчетная 3D-модель оптимизированного электромагнита, а в табл. 1 — его параметры.

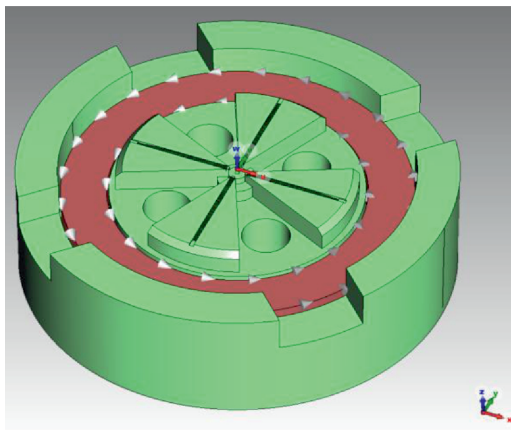


Рис. 1. 3D-модель 1/2 электромагнита циклотрона

Таблица 1. Параметры оптимизированного электромагнита циклотрона СС-18

Параметр	Значение
Диаметр электромагнита, мм	2000
Высота электромагнита, мм	1130
Диаметр полюса, мм	1160
Конечный радиус ускорения, мм	460
Угловая протяженность секторов	48
Зазоры между секторами/в долинах, мм	27/250
Индукция в центре, Тл	1,334
Индукция в холмах, Тл, не более	2,1
Масса магнита (Fe/Cu), т	19,5/1,95
Ток возбуждения, ампер-витки	53000
Мощность питания, кВт, не более	17,8

Проведен комплекс расчетов для получения топологии магнитного поля, соответствующей изохронному ускорению ионов водорода, рассчитаны частоты бетатронных колебаний, исследовано фазовое движение сгустка. Зависимость среднего и изохронного магнитного поля представлена на рис. 2. График частот бетатронных колебаний приведен на рис. 3.

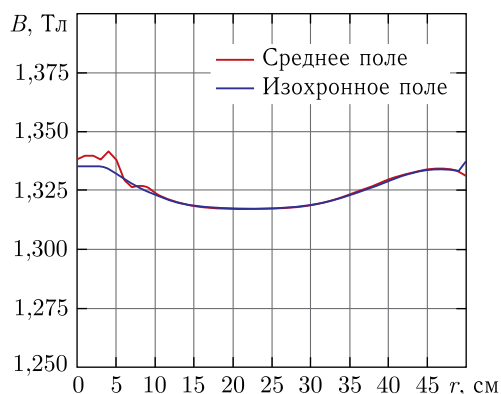


Рис. 2. Зависимость среднего и изохронного магнитного поля

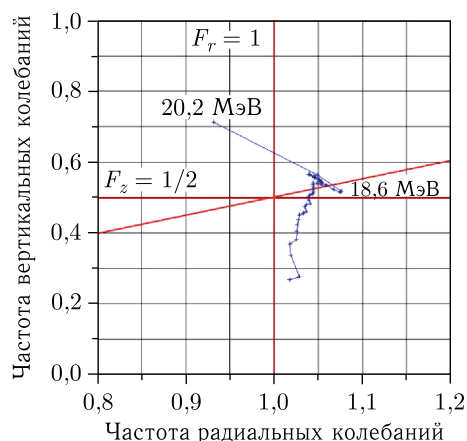


Рис. 3. Диаграмма рабочей точки (шаг 0,5 МэВ)

Таким образом, разработана конструкция магнитной структуры циклотрона, позволяющая сформировать необходимую топологию магнитного поля. В результате анализа магнитного поля установлено, что резонансы в большей части ускорения отсутствуют. Реализовано ускорение ионов водорода в расчетном поле до энергии 18 МэВ. Среднее количество оборотов ~ 200 .

РЕЗОНАНСНАЯ СИСТЕМА

Резонансная система, состоящая из двух четвертьволновых резонаторов, полностью размещена в вакуумной камере циклотрона. Штоки и баки резонаторов рас-

положены в верхних отверстиях долин электромагнита и присоединены к дуантам и плакировкам долин с одной стороны. Данная конфигурация резонансной системы была выбрана для установки в отверстиях нижнего полуярма магнита четырех диффузионных насосов. За счет несимметрии резонаторов в медианной плоскости между верхней и нижней частями дуантов возникает вертикальная компонента электрического поля, исследованию которой было уделено особое внимание.

Расчеты резонансной системы проводились в Eigenmode solver. Расчетная модель представлена на рис. 4. Распределение вертикальной компоненты электрического поля в медианной плоскости показано на рис. 5, 6.

Расчеты показали, что вертикальная компонента электрического поля на два порядка меньше модуля вектора электрического в медианной плоскости. Как видно из рис. 5, ее величина максимальна в зоне подключения штоков и уменьшается до нуля

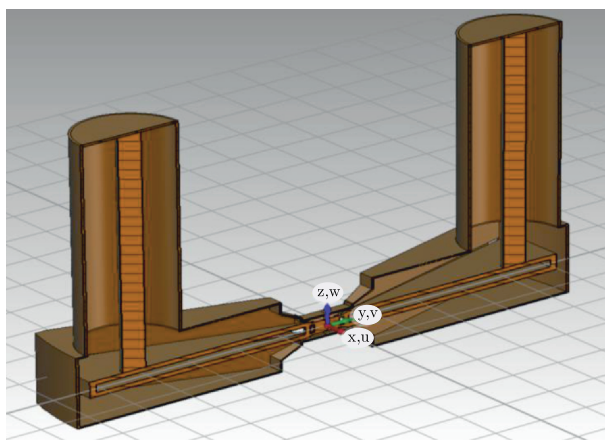


Рис. 4. 3D-модель резонансной системы с вертикальными штоками в одну сторону

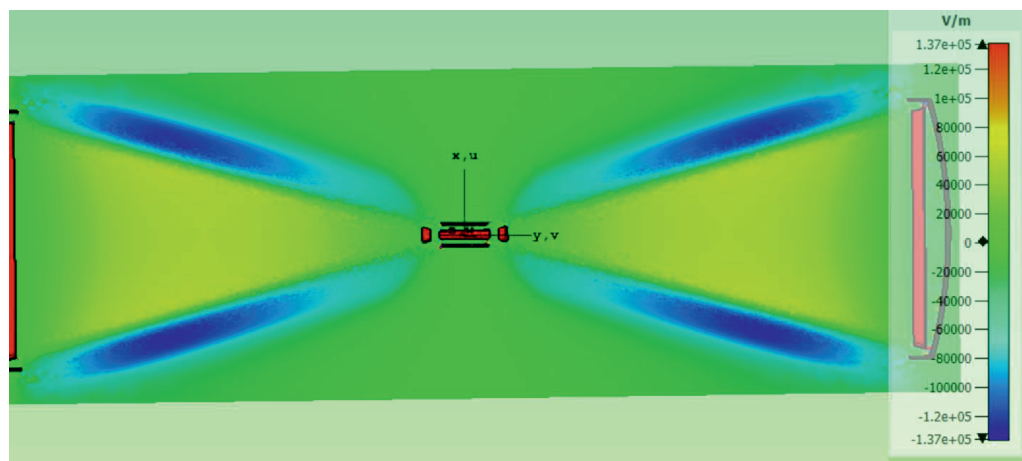


Рис. 5. Распределение вертикальной компоненты электрического поля в медианной плоскости

в местах контакта верхней и нижней частей дуантов, т.е. в центре циклотрона и вблизи конечного радиуса. Расчетные параметры резонансной системы представлены в табл. 2.

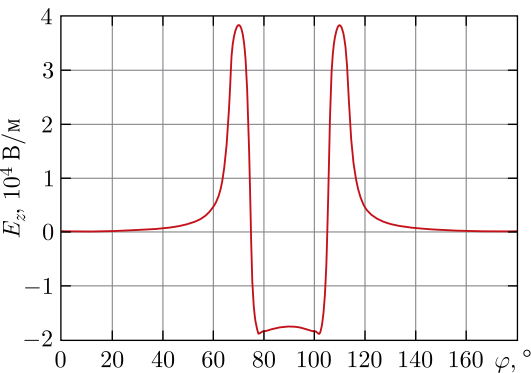


Рис. 6. Вертикальная компонента электрического поля в медианной плоскости на радиусе 300 мм

Таблица 2. Расчетные параметры резонансной системы циклотрона СС-18

Параметр	Значение
Рабочая частота, МГц	40,68
Амплитуда ВЧ-напряжения, максимальная, кВ	40
Мощность активных потерь, кВт	7
Добротность	4800

Выполнены расчеты динамики пучка в основной зоне ускорения ионов Н⁺. На рис. 7 представлены радиальные и аксиальные эмиттансы на выходном фланце циклотрона при конечной энергии 18 МэВ.

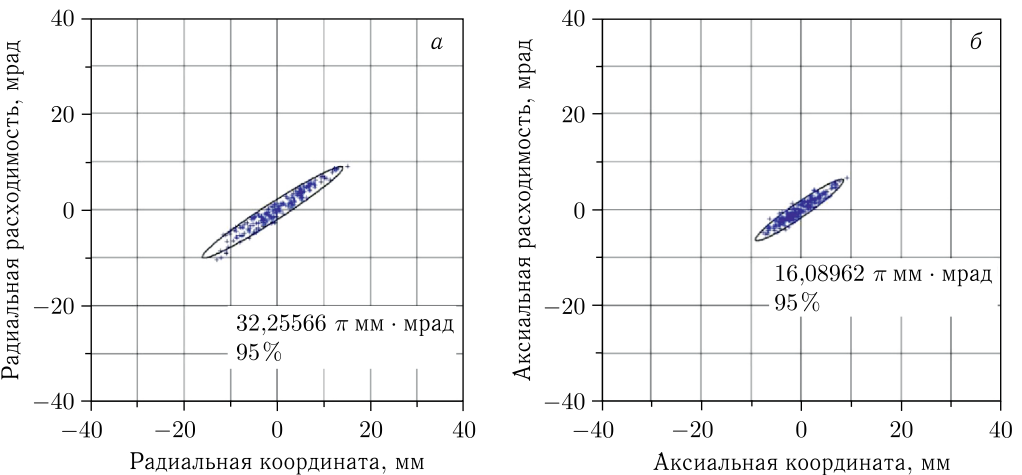


Рис. 7. Радиальный (а) и аксиальный (б) эмиттансы на выходном фланце, энергия 18 МэВ

Огибающая пучка по вертикали в зоне конечных радиусов ускорения приведена на рис. 8. Видно, что при прохождении резонансов в зоне выпуска нет роста амплитуды вертикальных колебаний.

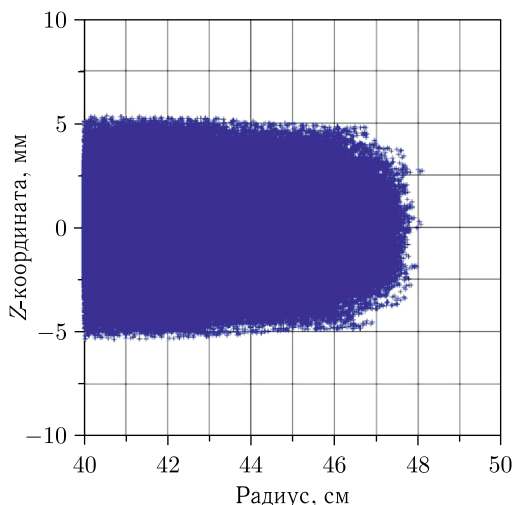


Рис. 8. Огибающая пучка по вертикали в зоне конечных радиусов ускорения

Из рис. 8 можно сделать вывод, что вертикального смещения пучка от медианной плоскости не происходит, сохраняется симметрия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены возможности упрощения конструкции основных систем циклотрона СС-18 с целью уменьшения его себестоимости. В выбранном варианте циклотрон обеспечивает получение пучков протонов в диапазоне энергий 12–18 МэВ с током 150 мкА. Электромагнит — броневое исполнение с горизонтальной медианной плоскостью и упрощенной системой секторных накладок. Резонансная система работает на второй гармонике частоты обращения ионов водорода, 40,68 МГц. Источник ионов — внутренний.

Разработаны модели электромагнита и резонансной системы, определены их характеристики. Рассчитаны топология магнитных и высокочастотных электрических полей в зоне ускорения и динамика набора ионов водорода в изохронном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Strokachand A. P. et al.* CC-18/9M Cyclotron System // Proc. RuPAC2014. WECA11. Obninsk, 2014. P. 149–151.
2. *Bogdanov P. V. et al.* Specific Features of Accelerating Systems of CC-18/9, CC-12 and MCC-30/15 Compact Cyclotrons // Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki. Ser. "Electrofizicheskaya Apparatura". No. 5. St. Petersburg, 2010. P. 65–74.

3. *Klopenkov R. M. et al.* The CC-18/9M Cyclotron System for Production of Isotopes for PET // Proc. RuPAC2016. THCAMH05. St. Petersburg, 2016. P. 117–119.
4. *Zaremba S., Kleeven W., Van de Walle J., Nuttens V., De Neuter S., Abs M.* Magnet Design of the New IBA Cyclotron for PET Radio-Isotope Production // Proc. “Cyclotrons 2016”. Zurich, 2016. P. 170–172.

Получено 28 октября 2024 г.