

## ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ИЗОХРОННОМ ЦИКЛОТРОНЕ СС-30/15

*Ю. К. Осина<sup>1</sup>, А. В. Галчук, М. А. Емельянов, К. Е. Смирнов,  
Ю. И. Стогов, А. П. Строчакич, С. С. Цыганков*

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

Представлены особенности проектирования электромагнита изохронного циклотрона СС-30/15 с помощью методов математического моделирования. Электромагнит броневое типа имеет вертикально расположенную медианную плоскость, корпус вакуумной камеры является частью магнитопровода. Для реализации режимов ускорения ионов водорода и дейтерия применены поворотные шиммы, установленные в двух оппозитных долинах, свободных от резонансной системы. Поворотные шиммы обеспечивают оперативность перестроения магнитного поля при переходе от протонного режима ускорения ионов к дейтронному. Формирование необходимой топологии магнитного поля выполнено с использованием автоматизированного измерительного комплекса за счет контролируемой доработки съемных секторных накладок и шиммов.

Design features of the isochronous cyclotron СС 30/15 electromagnet using mathematical modeling methods are presented. The electromagnet of shielded type has a vertically located median plane, the housing of the vacuum chamber is a part of the magnetic circuit. To implement the acceleration modes of hydrogen and deuterium ions, rotary shims are used, installed in two opposite valleys, free of the resonance system. Rotary shims provide the speed of rebuilding the magnetic field during the transition from the proton mode of ion acceleration to deuterium. The necessary topology of the magnetic field is formed using an automated measuring complex due to the controlled refinement of removable sector overlays and shims.

PACS: 29.20.dg

### ВВЕДЕНИЕ

Циклотрон СС-30/15 предназначен для ускорения отрицательных ионов водорода  $H^-$  и дейтерия  $D^-$  до энергий 15–30/9–15 МэВ с током выпущенного пучка 200/50 мкА соответственно. Циклотрон СС-30/15 позволит нарабатывать широкий спектр радионуклидов — ультракороткоживущих и короткоживущих изотопов для медицинской диагностики, а также циркония-89, меди-64, таллия-201, галлия-67 [1]. Ускоритель является модернизированной версией разработанного ранее в АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова» циклотрона МСС-30/15 [2–4], поставленного в ускорительную лабораторию Университета города Ювяскюля (Финляндия). Для упрощения технологии изготовления циклотрона конструкция его электромагнита была

---

<sup>1</sup>E-mail: julia\_npf@list.ru

изменена. Удалены пассивные постоянные шиммы, секторы и полюс выполнены без зазора и являются одной деталью.

Одна из главных задач при разработке циклотрона — формирование изохронного магнитного поля [2–5].

## 1. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ЦИКЛОТРОНА

Циклотрон СС-30/15 имеет электромагнит броневого типа диаметром 2500 мм с вертикальной медианной плоскостью. Изохронное поле формируется четырехсекторной структурой полюсов и подвижными шиммами, установленными в долинах для получения изохронного поля, соответствующего типу ускоряемых ионов. Корпус вакуумной камеры представляет собой полый толстостенный цилиндр из углеродистой стали и одновременно является частью магнитного ярма [3]. Полюсные части электромагнита с приваренными фланцами из нержавеющей (немагнитной) стали являются крышками вакуумной камеры. Для обеспечения легкого доступа обслуживающего персонала внутрь вакуумной камеры циклотрона во время наладочных работ и профилактического ремонта полуядро электромагнита раздвигается на 800 мм вдоль направляющих с помощью специального устройства с электромеханическим приводом.

При формировании магнитного поля необходимо было решить следующие задачи: провести доработку формы боковых накладок секторов магнита для получения изохронных зависимостей средних по радиусу магнитных полей и формы поворотных шиммов, обеспечивающих изменение величины среднего магнитного поля при ускорении протонов и дейтронов; проконтролировать величину второй гармоники магнитного поля на предмет устойчивости движения частиц при ускорении и уменьшить ее при необходимости; уменьшить величину первой гармоники магнитного поля до значения не более 2–3 Гс.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЦИКЛОТРОНА

С помощью методов математического моделирования выполнен анализ магнитной структуры циклотрона. Моделирование магнитной системы циклотрона проводилось в программе ANSYS Maxwell. Расчетная 3D-модель электромагнита циклотрона представлена на рис. 1. В результате численного моделирования определены формы и размеры боковых накладок секторов, поворотных шиммов, зазоры в «долине»/«холме», при которых радиальная зависимость среднего по азимуту магнитного поля в медианной плоскости обеспечивает изохронность ускорения ионов  $H^-/D^-$ . Точность формирования магнитного поля составляет  $dB_{cp} < 2/B_{cp} \cong 1,5 \cdot 10^{-4}$ .

Таким образом, определены размеры боковых накладок секторов, формы шиммов, обеспечива-

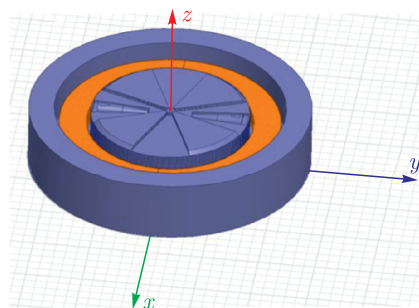


Рис. 1. Расчетная 3D-модель 1/2 электромагнита циклотрона СС-30/15

ющие изохронный режим ускорения  $H^-/D^-$ . Формирование магнитного поля в центре проводилось путем последовательных приближений по эффекту.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Магнитопровод циклотрона СС-30/15 был изготовлен на предприятии НКМЗ (Краматорск). На рис. 2 — фото циклотрона на испытательном стенде.

Ток в основной обмотке электромагнита для протонов/дейтронов составляет 117,5/116,5 А.

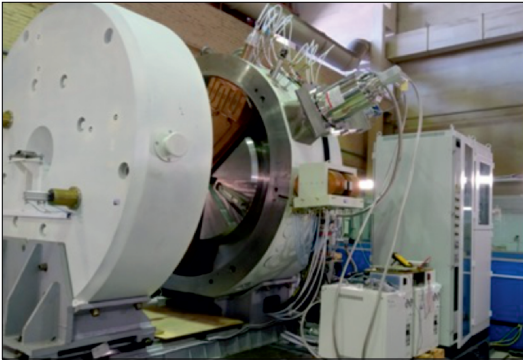


Рис. 2. Изготовленный циклотрон СС-30/15

Измерение топографии магнитного поля выполнено в средней плоскости магнита вдоль 40 круговых орбит в интервале  $\Theta = 0-360^\circ$  с шагом  $1^\circ$ . Вычисление интеграла поля  $B_{cp} = 1/2\pi \int_0^{2\pi} B(R, \theta) d\theta$  по топографии  $B = f(R, \Theta)$  сделано в диапазоне радиусов 20–985 мм. Проведена коррекция формы боковых накладок секторов, шиммов и пробок для получения изохронных зависимостей  $B_{cp} = f(R, \Theta)$  в протонном и дейтронном вариантах.

При измерении топографии индукции магнитного поля использовалась полярная система координат. Измерение индукции осуществлялось после поворота на шаг вокруг продольной оси магнита радиальной линейки с датчиками Холла типа ИМ103Б2-1. Для измерений использовалось 40 датчиков, размещенных на одном луче, начиная с радиуса 20 мм и заканчивая 985 мм. Датчики откалиброваны с помощью ЯМР-аппаратуры в однородном магнитном поле высокой стабильности (0,01%). Ошибка определения абсолютного значения магнитной индукции в любой точке не превышает  $1,8 \cdot 10^{-4}$  Тл.

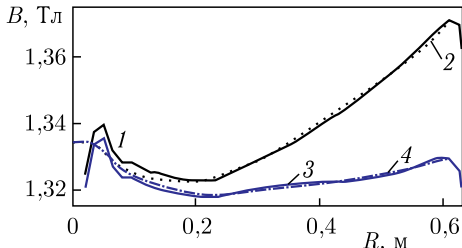
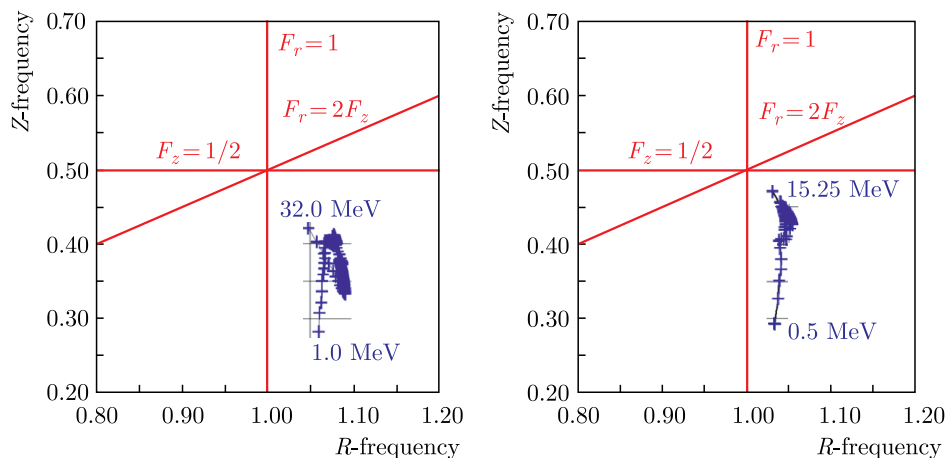


Рис. 3. Зависимости изохронного (2, 4) и среднего (1, 3) поля от радиуса для протонов и дейтронов в циклотроне СС-30/15

Поле в центре сформировано регулировкой пробок. Провал поля на малых радиусах скомпенсирован дополнительными пластинами в долинах с шиммами. Изохронные и финальные средние поля для протонов и дейтронов приведены на рис. 3.

Частоты аксиальных и радиальных колебаний для режимов ускорения протонов и дейтронов  $\nu_z, \nu_r$  показаны на рис. 4. Бетатронные колебания находятся вне зоны резонансов.

Формирование поля по интегралам производилось с помощью механической обработки боковых накладок на гранях холмов и локальных подрезок поверхности шиммов.


 Рис. 4. Графики частот бетатронных колебаний  $\nu_z$ ,  $\nu_r$  протонов и дейтронов

Основные параметры электромагнита циклотрона СС-30/15 представлены в таблице.

#### Основные параметры электромагнита циклотрона СС-30/15

Параметр	Значение
Высота электромагнита, мм	1350
Наружный диаметр, мм	2500
Диаметр полюсного наконечника, мм	1400
Количество холмов	4
Угловая протяженность холма (сектора), °	46
Воздушный зазор по холмам/в долинах, мм	40/120
Индукция магнитного поля ( $H^-/D^-$ ), тлх, Тл	
по холмам	1,98/1,98
в долинах	0,7/0,5–0,7
Мощность электромагнита, кВт	12
Масса активной стали / активной меди обмотки, кг	44000/2600

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работ по формированию магнитного поля циклотрона СС-30/15 подтвердили, что полученные магнитные поля обеспечат ускорение ионов  $H^-$  и  $D^-$  до энергий в диапазонах 15–30/9–15 МэВ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Osina Yu. K., Andreeva Z. A., Galchuck A. V., Gavrish Yu. N., Grigorenko S. V., Grigoriev V. I., Klopenkov M. L., Klopenkov R. M., Korolev L. E., Kravchuck K. A., Kuzhlev A. N., Mezhev I. I., Miroshnichenko A. G., Mudrolyubov V. G., Muraviov G. V., Ponomarenko V. I., Smirnov K. E.,

- Tsygankov S. S., Usanova M. V., Vanin A. V., Veresov O. L., Zuev Yu. V.* Cyclotron System for Thailand Institute of Nuclear Technology // Proc. of RuPAC2018, Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. TUPSA43. P. 233–235.
2. *Богданов П. В., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Стогов Ю. И., Сычевский С. Е.* Особенности конструирования магнитных систем ряда современных компактных изохронных циклотронов с использованием методов математического моделирования // ЖТФ. 2010. Т. 80, вып. 9. С. 125–133.
  3. *Богданов П. В., Heikkinen P., Ворогушин М. Ф., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Стогов Ю. И., Строкач А. П., Сычевский С. Е.* Особенности создания магнитной системы циклотрона МСС-30/15 и формирования поля с использованием поворотных шимм // Там же. Вып. 11. С. 105–110.
  4. *Богданов П. В., Будтов А. А., Васильченко И. Н., Ворогушин М. Ф., Григоренко С. В., Мудролюбов В. Г., Силаев С. А., Стогов Ю. И., Строкач А. П., Сычевский С. Е., Шилкин Н. Ф.* Медицинский компактный циклотрон МСС-30/15 с регулируемой энергией ускоренных ионов // ВАНТ. Сер. «Электрофиз. аппаратура». СПб., 2010. Вып. 5(31). С. 32–43.
  5. *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-Петербург. ун-та. Сер. 10. 2009. Вып. 2. С. 3–21.