

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ДИНАМИКИ ИОНОВ H^- , H^+ ДЛЯ ЦИКЛОТРОНА Ц-250

*Ю. К. Осина¹, О. В. Ананьева, А. В. Галчук, И. В. Горбунов,
С. В. Григоренко, В. Г. Мудролюбов, К. Е. Смирнов, Ю. И. Стогов*

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены особенности формирования магнитного поля циклотрона Ц-250 на энергию протонов 30–250 МэВ. Для реализации проектных параметров принято нестандартное техническое решение: в диапазоне энергий 30–125 МэВ в качестве ускоряемых частиц использовать отрицательные ионы водорода, а в интервале 125–250 МэВ — протоны. Разработан комплект корректирующих катушек, обеспечивающих изохронный режим ускорения протонов в указанном диапазоне энергий. С помощью траекторного анализа изучены фокусирующие свойства магнитного поля.

The features of the cyclotron C-250 magnetic field for proton energies 30–250 MeV are considered. To implement the design parameters, a nonstandard technical solution was adopted: in the energy range of 30–125 MeV, to use negative hydrogen ions as accelerated particles, and in the range of 125–250 MeV — protons. A set of trim coils has been developed to provide isochronous proton acceleration in the indicated energy range. The focusing properties of the magnetic field were studied by using trajectory analysis.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

АО «НИИЭФА» разрабатывает циклотронный комплекс, включающий в себя протонный циклотрон, разветвленную систему транспортировки пучка, систему облучения образцов, обеспечивающие системы: автоматизированного управления, электропитания, водоохлаждения и вакуумной откачки [1, 2]. Наиболее сложной проблемой проекта является обеспечение широкого диапазона регулирования энергии протонов.

Проектируемый ускоритель уникален по своим параметрам, так как протонных циклотронов с энергией выше 200 МэВ и глубоким регулированием энергии не существует [2]. Причиной этого является необходимость регулировать в широких пределах закон зависимости индукции магнитного поля от радиуса, чтобы сохранить конечный радиус ускорения и выпустить пучок протонов с помощью электростатического дефлектора.

¹E-mail: osina@luts.niiefa.spb.su

По результатам предварительных расчетов принято нестандартное решение: в диапазоне энергий 30–125 МэВ в качестве ускоряемых частиц использовать отрицательные ионы водорода, в интервале 125–250 МэВ — протоны. Такое решение позволяет обеспечить наличие первой части диапазона энергий протонов при фиксированном магнитном поле, соответствующем конечной энергии 125 МэВ, что существенно уменьшает диапазон регулирования магнитного поля и облегчает требования к его формированию.

1. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ЦИКЛОТРОНА Ц-250

Магнитопровод электромагнита имеет Ш-образное исполнение, диаметр полюса составляет 4 м, магнитная структура четырехсекторная с секторами спиральностью 55° . В качестве базового режима, получаемого за счет «железа» (формы секторных накладок, пробок и фасок секторов), выбран режим с магнитной индукцией 1,08 Тл в центре электромагнита и 1,35 Тл на конечном радиусе ускорения, соответствующий конечной энергии 250 МэВ. Для регулирования конечной энергии протонов в диапазоне 250–125 МэВ изохронная зависимость магнитного поля от радиуса обеспечивается за счет уменьшения тока в основной обмотке и включения корректирующих катушек, размещенных на секторах. Выпуск пучка в диапазоне 250–125 МэВ осуществляется с помощью дефлектора и системы магнитных каналов. При меньших конечных энергиях используется магнитное поле, сформированное для энергии 125 МэВ (с изменением полярности). Выпуск пучка требуемой энергии обеспечивается за счет перемещения обдирочного устройства с тонкой углеродной фольгой.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЦИКЛОТРОНА Ц-250

В связи с высокой спиральностью секторов моделирование магнита выполнялось для 1/2-й части магнита. Каждый полюсный наконечник оснащается четырьмя секторами спиральной формы. Расчетная 3D-модель электромагнита с корректирующими катушками, расположенными на секторах, показана на рис. 1.

Высота сектора составляет 200 мм, на внешней границе сектора сделана фаска 50×50 мм. Зазор в долине/холме — 500/100 мм соответственно. Над каждым сектором необходимо разместить по 14 катушек и одну общую в центре полюса. Первая катушка концентрическая, находится ниже горизонтальной поверхности сектора. Вторая и третья катушки имеют трапециевидальную форму (не выходят за границы сектора) и вложены друг в друга. Двенадцать катушек, расположенных дальше от центра, имеют форму кривой трапеции. Их контур повторяет форму сектора, они вложены одна в другую. Один край всех катушек будет находиться за сектором. Система охлаждения корректирующих катушек водяная, для них выбран полый проводник 7×7 , $\varnothing 4$ мм.

Все корректирующие катушки будут находиться в вакуумплотном корпусе, примененные при изготовлении катушек материалы должны обеспечить получение рабочего вакуума ($5 \cdot 10^{-7}$ Торр). Всего в циклотроне восемь таких блоков с секторными катушками в вакуумплотных корпусах. Высота корпуса с катушками не превышает 35 мм. Из корпуса будет организована форвакуумная откачка.

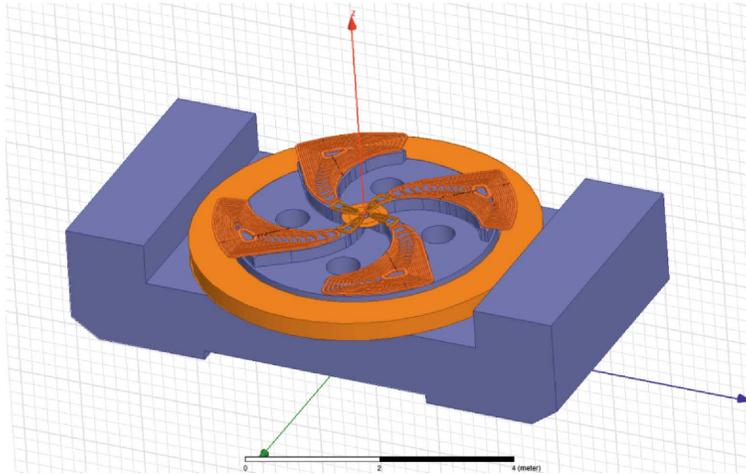


Рис. 1. Расчетная 3D-модель 1/2-й электромагнита циклотрона Ц-250 с корректирующими катушками

Тонкая коррекция азимутальных неоднородностей магнитного поля, типа первой гармоники, будет осуществляться путем разбалансировки токов в корректирующих катушках и создания требуемой конфигурации магнитного поля.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ И ДИНАМИКИ ИОНОВ H^- , H^+ ЦИКЛОТРОНА Ц-250

Выполнен комплекс расчетов по формированию изохронного магнитного поля, определены параметры корректирующих катушек, обеспечивающих изохронное движение протонов для заданного диапазона энергий. На рис.2 представлены вклады корректирующих катушек при минимальной, 125 МэВ, и максимальной, 250 МэВ, конечной энергии протонов.

Определены токи для подстройки изохронного поля для разных уровней индукции магнитного поля. Расчет токов производился как методом случайного поиска, так и методом наименьших квадратов [3].

Распределение индукции магнитного поля по радиусу для конечной энергии 125 и 250 МэВ протонного циклотрона показано на рис.3. Кривая F_{Fe} соответствует магнитному полю, получаемому за счет «железа», кривая Res — суммарное поле «железа» и корректирующих катушек, Iso — необходимая изохронная зависимость.

Для получения информации о фокусирующих свойствах магнитного поля был сделан расчет равновесных орбит. График частот бетатронных колебаний представлен на рис. 4.

Конечные энергии в последних точках равны 124,6 и 252,7 МэВ для магнитодвижущей силы (МДС) основной обмотки 70 и 160 кА-витков соответственно. Пересечение резонанса $Q_r = 1$ происходит в спадающем среднем магнитном поле для более качественного вывода пучка с помощью дефлектора. Пересечение рабочей точки ре-

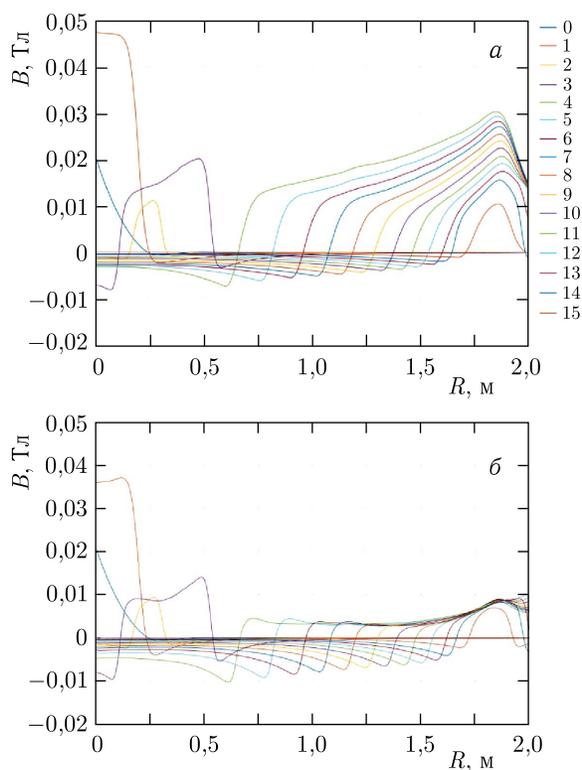


Рис. 2. Радиальное распределение полей корректирующих катушек на нижнем (70 кА-витков, а) и верхнем (160 кА-витков, б) уровнях регулирования магнитного поля протонного циклотрона (0 — изменение индукции магнитного поля при перемещении пробки на 1 см)

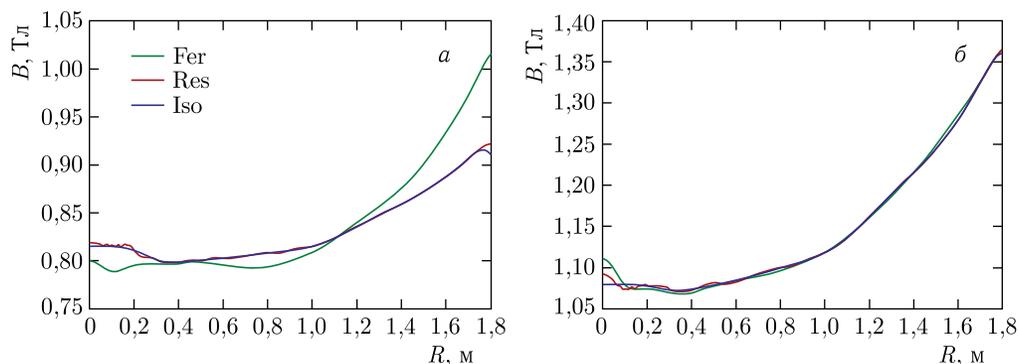


Рис. 3. а) Зависимость среднего магнитного поля от радиуса для энергии 125 МэВ; б) зависимость среднего магнитного поля от радиуса для энергии 250 МэВ

зонанса Уолкиншоу [4] ($Q_r - 2Q_z = 0$) и полуполого резонанса $2Q_z = 1$ наблюдается в начале ускорения на радиусе 0,4–0,6 м в зависимости от значения МДС основной обмотки и на радиусе 1,4 и 1,6 м для конечной энергии пучка 250 МэВ.

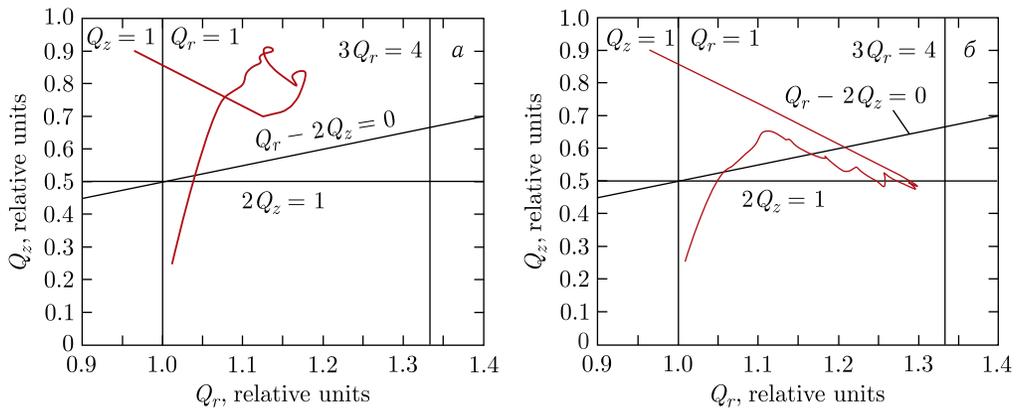


Рис. 4. График частот бетатронных колебаний при МДС в основной обмотке 70 и 160 кА-витков

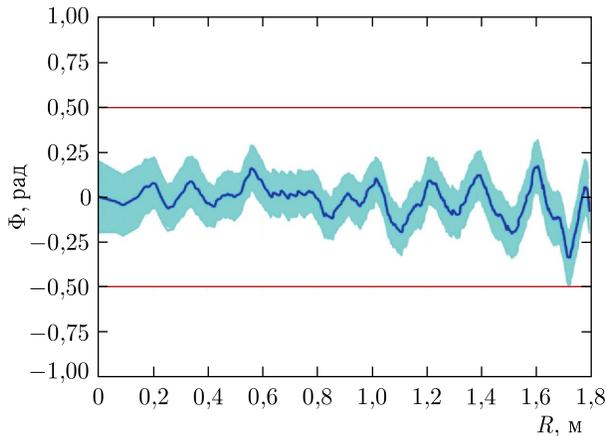


Рис. 5. Фазовое движение протонов до энергии 250 МэВ

Сделаны расчеты по ускорению ионов в магнитном поле с включенными корректирующими обмотками. На рис.5 показано фазовое движение протонов до энергии 250 МэВ в пределах $\pm 0,5$ рад.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численного моделирования определены параметры магнитной системы циклотрона, рассчитаны токи в корректирующих катушках для трех значений токов основной обмотки, а также положение пробки и величина, на которую необходимо изменить среднее магнитное поле для изохронного ускорения. Из полученных результатов фазового движения можно сделать вывод, что при рассчитанных токах можно добиться достаточного изохронизма на данных уровнях основной обмотки.

Сформированное магнитное поле удовлетворяет требованиям устойчивости движения частиц. Построены рабочие фазовые диаграммы для магнитных полей, сформированных для ускорения протонов на разных уровнях индукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавриш Ю. Н., Галчук А. В., Григоренко С. В., Григорьев В. И., Клопенков Р. М., Королев Л. Е., Кравчук К. А., Кужлев А. Н., Межов И. И., Мудролюбков В. Г., Осина Ю. К., Смирнов К. Е., Стогов Ю. И., Усанова М. В. Циклотронный комплекс многозарядных ионов Ц-250 // Ядерные и электрофизические установки — источники мощных ионизирующих излучений: Сб. тез. докл. научно-техн. конф., РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Россия, 15–18 июня 2021 г. С. 29.
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 // Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC2021), Alushta, Russia, Sept. 27–Oct. 1, 2021. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRA05. P. 105–107.
3. Kamakura K. Design of a High Temperature Superconducting Magnet for Next Generation Cyclotrons: Doctoral Dis. Graduate School of Science, Osaka University, 2019.
4. Lee S. Y., Ng K. Y., Liu H., Chao H. C. Evolution of Beam Distribution in Crossing a Walkinshaw Resonance // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 094801; doi:10.1103/PhysRevLett.110.094801.

Получено 18 ноября 2022 г.