

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ВЫВОДА ИОНОВ ИЗ ЦИКЛОТРОНА У-240
МЕТОДОМ ПЕРЕЗАРЯДКИ****А. В. Долинский, А. Е. Вальков, Ю. И. Камышников***Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

Разработана компьютерная программа для расчета траектории ионов, выводимых из изохронного циклотрона У-240 после перезарядки на внутренней мишени. Моделирование траектории вывода ионов дает возможность выбрать оптимальное положение перезарядной мишени во внутреннем объеме изохронного циклотрона У-240, при котором потери выводимых ионов становятся пренебрежительно малыми.

Введение

Для увеличения интенсивности выводимых ионов из циклотрона У-240 можно использовать метод перезарядки. При использовании такого метода достигается практически 100 %-ная эффективность вывода. Суть метода заключается в том, что предварительно ускоряются отрицательные ионы до радиуса, на котором располагается перезарядная мишень. После перезарядки ионы становятся положительно заряженными и, следовательно, кривизна траектории ионов изменяется на противоположный знак и эти ионы будут направляться из внутреннего объема циклотрона под довольно большим углом по отношению к равновесной траектории. Это дает возможность не использовать отклоняющий дефлектор, который обычно используется для вывода ионов с максимального радиуса при нормальном режиме работы циклотрона и при этом происходят большие потери выводимых ионов. Первоначальный дизайн изохронного циклотрона У-240 не предполагал использование метода перезарядки для вывода ионов и поэтому не были предусмотрены технологические каналы для ввода мишени и вывода ионов из медианной плоскости. Поэтому необходимо использовать уже существующие каналы для осуществления данного метода вывода. Для того чтобы данный метод реализовать на изохронном циклотроне У-240, необходимо иметь возможность проводить теоретическое моделирование траектории выводов ионов, что, в свою очередь, даст возможность найти оптимальное положение перезарядной мишени по отношению к точке в канале предполагаемого вывода ионов из циклотрона.

Общий метод расчета

Перед тем, как производить расчет траектории выводимых ионов после перезарядки на внутренней мишени, необходимо определить режим работы изохронного циклотрона. Т.е. надо определить режим работы, при котором возможно ускорять отрицательные ионы. Для этого необходимо использовать специально разработанный для этих целей программный пакет REJIM. После расчета режима работы циклотрона данный пакет создает несколько файлов начальных данных, необходимых для последующих расчетов. Эти данные содержат в себе информацию о токах на основной и концентрических обмотках циклотрона. Используя эти данные и карту экспериментально измеренного магнитного поля, моделируется реальное изохронное магнитное поле в медианной плоскости циклотрона У-240. Зная форму магнитного поля, можно рассчитать равновесную орбиту отрицательного иона на радиусе, где предполагается разместить перезарядную мишень. После расчета равновесной орбиты отрицательного иона для данного радиуса и азимута расположения мишени на этой орбите рассчитывается траектория уже положительно заряженного иона.

Расчет изохронного магнитного поля циклотрона У-240

Движение заряженных частиц в циклотроне определяется формой изохронного магнитного поля $B(r_i, \theta_i)$, которое формируется с помощью основной обмотки и набором дополнительных концентрических обмоток [1, 2]. Расчет равновесной орбиты отрицательных ионов, а затем и траектории выводимых ионов, производится в изохронном магнитном поле $B(r_i, \theta_i)$, определяемом с помощью экспериментально измеренных коэффициентов Фурье $A_n(r_i)$, $B_n(r_i)$ для суммарного поля

$$B(r_i, \theta_j) = B_{iz}(r_i) + \sum_n^{3,6,9,12,15} \{A_n(r_i) \cos(n\theta_j) + B_n(r_i) \sin(n\theta_j)\}, \quad (1)$$

где r_i - радиус (0, 1,68 м); θ - азимут (0, 2π).

Равновесная орбита

Чтобы моделировать траектории выводимых ионов, необходимо определить их начальные координаты и углы в точке расположения перезарядной мишени. Обычно толщина перезарядной мишени настолько мала, что координаты и углы образованных ионов не изменяются после перезарядки соответствующих им отрицательных ионов в месте расположения мишени. Траектории отрицательных ионов, как известно, проходят вблизи равновесной орбиты для некоторого определенного радиуса в медианной плоскости циклотрона. Равновесная орбита определяется как замкнутая орбита в медианной плоскости с n -симметричным магнитным полем. В магнитном поле, не зависящим от азимута равновесной орбиты, частица с импульсом $p = e r_o B(r_o)$ будет описывать окружность радиусом $r_p = r_o$. В азимутально-переменном магнитном поле общая форма равновесной орбиты для частицы с тем же значением импульса определяется выражением [3]

$$r_e = \gamma + \sum_n \alpha_n \cos n\theta + \beta_n \sin n\theta, \quad (2)$$

где γ , α , β - некоторые коэффициенты, которые определяются из формы изохронного магнитного поля.

Расчет необходимой равновесной орбиты в изохронном циклотроне производится с помощью системы интегральных уравнений движения [1]

$$\begin{cases} \frac{dr}{d\theta} = \frac{r}{q} p_r; \\ \frac{dp_r}{d\theta} = q - rB(r, \theta), \end{cases} \quad (3)$$

где

$$q = \sqrt{p_i^2 - p_r^2},$$

p_i - импульс частицы, p_r - радиальная составляющая импульса. Система (3) должна удовлетворять условиям периодичности: $r(0) = r(360^\circ)$, $p_r(0) = p_r(360^\circ)$. Интегрирование системы (3) осуществляется численным методом Рунге - Кутты [4] четвертого порядка с шагом $1,5^\circ$. Необходимые значения магнитного $B(r, \theta)$ находятся интерполяцией значений магнитного поля в узловых точках (r_i, θ_j) с помощью четырехточечной формулы Лагранжа с постоянным шагом [5].

Траектории положительно заряженных ионов после перезарядки

Расчет траектории движения иона после перезарядки удобно проводить с помощью уравнений движения, где независимой переменной является время [3]

$$\begin{cases} \frac{d^2r}{dt^2} - r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 = \frac{e}{\gamma m_0 c} \left[r \frac{d\theta}{dt} B_z(r, \theta) - \frac{z}{r} \frac{dz}{dt} \frac{\partial B_z(r, \theta)}{\partial \theta} \right]; \\ \frac{d^2\theta}{dt^2} r + 2 \frac{d\theta}{dt} \frac{dr}{dt} = - \frac{e}{\gamma m_0 c} \left[\frac{dr}{dt} B_z(r, \theta) - \frac{dz}{dt} z \frac{\partial B_z(r, \theta)}{\partial r} \right]; \\ \frac{d^2z}{dt^2} = - \frac{e}{\gamma m_0 c} \left[r z \frac{d\theta}{dt} \frac{\partial B_z(r, \theta)}{\partial r} - \frac{z}{r} \frac{dr}{dt} \frac{\partial B_z(r, \theta)}{\partial \theta} \right]. \end{cases} \quad (4)$$

Интегрирование системы (4) осуществляется численным методом Рунге - Кутты четвертого порядка с шагом 1 мм [4]. Необходимые значения магнитного $B(r, \theta)$ находятся таким же образом, как и в случае расчета равновесной орбиты. Начальные значения $r_0, \theta_0, z_0, (dr/dt)_0, (d\theta/dt)_0, (dz/dt)_0$ определяются в точке на равновесной орбите, где предполагается установить перезарядную мишень, при этом учитываются соотношения

$$p_\theta = \gamma m_0 r d\theta/dt, \quad p_r = -\gamma m_0 dr/dt, \quad p_z = \gamma m_0 dz/dt.$$

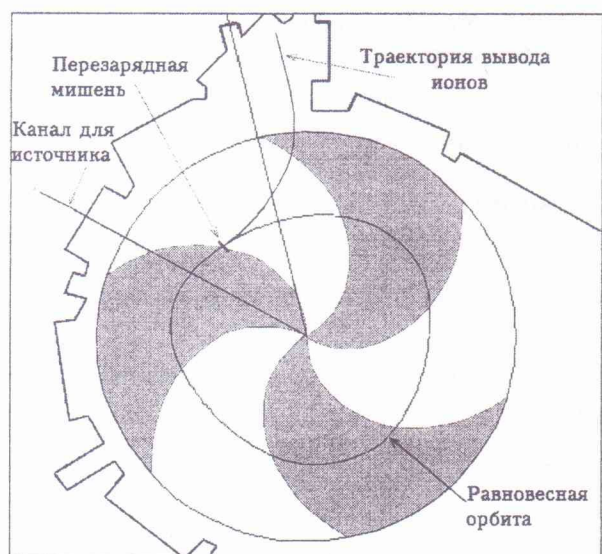


Схема медианной плоскости циклотрона У-240 и траектории ионов до (равновесная орбита) и после (траектория вывода ионов) перезарядки.

Поскольку импульс частицы рассчитывается в относительной величине, то начальные значения координаты и угла определяются как $r_0 = r, \theta_0 = \theta, z_0 = z$, а их производные как

$$\begin{cases} \left(\frac{dr}{dt} \right)_0 = - \frac{c}{\gamma} p_r; \\ \left(\frac{d\theta}{dt} \right)_0 = - \frac{c}{\gamma r_0} \sqrt{p_i^2 - p_r^2}; \\ \left(\frac{dz}{dt} \right)_0 = - \frac{c}{\gamma} p_z. \end{cases} \quad (5)$$

На рисунке схематично показаны границы вакуумной камеры циклотрона У-240 и пример траекторий ионов в медианной плоскости. Магнитные полюса изображены в форме секторов спиральной конфигурации.

Компьютерная программа для расчета

Программа расчета равновесной орбиты и траектории вывода ионов из циклотрона У-240 написана на языке Фортран-77 в графическом режиме с удобным пользовательским интерфейсом, что дает возможность проводить расчеты в диалоговом режиме и визуально наблюдать рассчитываемые траектории на экране по отношению к центру циклотрона. После запуска программы на экране компьютера появляется схема циклотрона в медианной плоскости с очертаниями вакуумной камеры, как это показано на рисунке, и программа переходит в режим ожидания. Положение маркера на экране соответствует предполагаемому

положению перезарядной мишени. Выбрав нужное положение маркера, сначала необходимо выполнить команду для расчета равновесной орбиты. Траектория равновесной орбиты появится на экране. После этого можно выполнить команду для расчета траектории вывода. Если полученные результаты не удовлетворительны, расчет можно повторить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вальков А.Е., Папаш Ф.И. Особенности формирования магнитных полей циклотрона У-240 для ускорения тяжелых ионов. - Киев, 1983. - 16 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-83-8).
2. Линева А.Ф., Олейник Е.Е., Вальков А.Е. Расчет параметров магнитного поля изохронного циклотрона У-240. - Киев: Наук думка, 1972.
3. Hagedoorn H.L., Verster N.F. Orbits in AVF Cyclotron // Nuclear Instruments and Methods in Research. - 1962. - Vol. A18-19. - P. 201 - 228.
4. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ для языков Бейсик, Фортран, Паскаль. - Томск: Раско, 1991.
5. Турчак В.Р. Основы численных методов. - М.: Наука, 1985.

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ ВИВЕДЕННЯ ІОНІВ ІЗ ЦИКЛОТРОНА У-240 МЕТОДОМ ПЕРЕЗАРЯДКИ

О. В. Долінський, О. Є. Вальков, Ю. І. Камишніков

Розроблено комп'ютерну програму для розрахунків траєкторії іонів, що виводяться з ізохронного циклотрона У-240 після перезарядки на внутрішній мішені. Моделювання траєкторії виведення іонів дає змогу вибирати оптимальне положення перезарядної мішені у внутрішньому об'ємі ізохронного циклотрона У-240, при якому втрати виведених іонів стають досить малими.

MODELLING OF TRAJECTORY FOR IONS EXTRACTION FROM U-240 CYCLOTRON BY CHARGE-STRIPINGS METHOD

A. V. Dolinskii, A. E. Valkov, Y. I. Kamyshnikov

The computer program for a trajectory calculation of ions, which are extracted from U-240 isochronous cyclotron after charge striping on an internal target is developed. The trajectory calculation of extracted ions enables to choose an optimum position of a target in the internal volume of U-240 isochronous cyclotron. This gives us the possibility to minimize the ion losses during the extraction process.

Поступила в редакцію 21.11.03,
после доработки – 07.04.04.