

P11-2007-127

Е. П. Жидков, И. В. Амирханов, И. Н. Киян, Р. Тарашкевич¹

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ
РАБОТЫ МНОГОЦЕЛЕВОГО
ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА

¹Институт ядерной физики Польской академии наук (ИЯФ ПАН),
Краков, Польша

Жидков Е. П. и др.

P11-2007-127

Методы моделирования режимов работы многоцелевого
изохронного циклотрона

Описываются методы моделирования режимов работы многоцелевого изохронного циклотрона. Традиционный метод основан на одновременном нахождении токов во всех концентрических катушках. Новый метод является итерационным и основан на последовательном нахождении токов в каждой из рассматриваемых концентрических катушек. Все расчеты выполняются на определенном уровне тока в главной катушке. При расчете значений токов в концентрических катушках решается некорректная задача (неоднородная система линейных алгебраических уравнений является плохо обусловленной, поскольку ее определитель имеет значение, равное машинному нулю). Решение некорректной задачи является неустойчивым по отношению к ошибке измерения карт магнитных полей, используемых при расчете. Итерационный метод, в отличие от традиционного, дает возможность косвенной оценки качества используемых при расчете исходных данных (измеренных карт магнитных полей) через оценку сходимости решения. В настоящее время ведется работа по регуляризации решения представленной некорректной задачи.

Работа выполнена в Лаборатории информационных технологий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Zhidkov E. P. et al.

P11-2007-127

Methods of Modeling of Operation Modes of Multi-Purpose
Isochronous Cyclotron

The methods of modeling of operation modes of multi-purpose isochronous cyclotron are described. The traditional method is based on a simultaneous finding of currents in all trim coils. The new method is iterative and is based on a consecutive finding of currents in each of the considered trim coils. All accounts are carried out at a certain level of current in the main coil. At account of values of currents in trim coils an incorrect task is solved (non-uniform system of the linear algebraic equations (SLAE) is ill-conditioned, as its determinant has a value equal to machine zero). The solution of the incorrect task is unstable in relation to a mistake of measurement of magnetic field maps used at account. The iterative method, as against the traditional one, enables an indirect estimation of quality of the initial data (measured magnetic field maps) used at account through an estimation of convergence of the solution. The work on the regularization of the solution of the submitted incorrect task is being conducted at present.

The investigation has been performed at the Laboratory of Information Technologies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

ВВЕДЕНИЕ

Многоцелевые изохронные циклотроны в настоящее время находят применение как в области научных исследований, так и в области медицины [1]. В ИЯФ ПАН вводится в эксплуатацию многоцелевой изохронный циклотрон АИС144. В табл. 1 приведены основные параметры этого циклотрона.

Таблица 1. Основные параметры АИС144

Система	Параметр	Величина
Главный магнит	Масса	140 т
	Диаметр полюса	144 см
	Среднее магнитное поле	0,85–1,8 Тл
	Ток главной катушки	100–610 А
	Токи в концентрических катушках коррекции основного магнитного поля	–400 – +400 А
Дуант и ВЧ-генератор	Число дуантов	1 ($\alpha = 180^\circ$)
	Напряжение на дуантах	65 кВ
	Частота ВЧ-генератора	10–27 МГц
Источник ионов	Тип	Внутренний, PIG
Система вывода	Радиус вывода	62 см
Система транспортировки пучков ионов	Число каналов	5
Вакуумная система	Рабочий вакуум	$2 \cdot 10^{-6}$ торр

Азимутальная вариация магнитного поля АИС144 (флаттер) задается с помощью четырех спиральных шимм и используется с целью формирования фокусирующих свойств магнитной системы многоцелевого изохронного циклотрона [2]. Между полюсами главного магнита располагаются двадцать

концентрических катушек коррекции основного магнитного поля, которые имеют вид вложенных друг в друга концентрических окружностей различных диаметров в диапазоне от 110 до 1300 мм с центром, лежащим на вертикальной оси симметрии АИС144. При этом диаметр полюса главного магнита составляет 1440 мм, а нумерация концентрических катушек идет от центра к краю АИС144 [3].

АИС144 является многоцелевым изохронным циклотроном и предназначен для ускорения различных типов частиц с различными значениями отношения числа стандартных единиц массы к числу элементарных зарядов (A/Z). В табл. 2 приведены типы частиц, ускоряемых на АИС144.

Таблица 2. Типы частиц, ускоряемых на АИС144

Тип частиц	A/Z	Кинетическая энергия, МэВ
Протоны	1	20–60
Дейтроны	2	15–30
α -частицы	2	30–60

В настоящее время АИС144 используется для производства радиоизотопов с целью проведения научных исследований в области ядерной спектроскопии. Кроме того, ведутся работы по созданию на его базе медицинского центра для лечения меланомы (раковой опухоли) глаза безоперационным путем. Облучение материалов с целью получения радиоизотопов обычно производится вну-

Таблица 3. Радиоизотопы, производимые на АИС144

Изотоп	Ядерные реакции
^{11}C	$^{11}\text{B}(p, n)^{11}\text{C}$
^{62}Cu	$^{62}\text{Cu}(p, 2n)^{62}\text{Zn}$ (^{62}Zn распадается в ^{62}Cu)
^{204}Bi	$^{206}\text{Pb}(p, 3n)^{204}\text{Bi}$
^{211}At	$^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)^{211}\text{At}$
^{48}V	$^{\text{nat}}\text{Ti}(p, xn)^{48}\text{V}$
^{56}Co	$^{58}\text{Ni}(p, n2p)^{56}\text{Co}$
^{99}Rh	$^n\text{Ru}(p, xn)^{99-102}\text{Rh}$
^{111}In	$^{109}\text{Ag}(\alpha, 2n)^{111}\text{In}$
^{173}Hf	$^n\text{Yb}(\alpha, xn)^{173}\text{Hf}$
^{178}W	$^n\text{Ta}(p, xn)^{178}\text{W}$
^{207}Po	$^{209}\text{Bi}(p, 3n)^{207}\text{Po}$

тренним пучком протонов с кинетической энергией вывода порядка 45 МэВ и током внутреннего пучка протонов до 100 мкА. Для лечения меланомы глаза используется внешний пучок протонов с кинетической энергией вывода порядка 60 МэВ и током внешнего пучка протонов 10 нА. В табл. 3 приведены различные виды радиоизотопов, производимых на АИС144.

Основными задачами моделирования нового режима работы многоцелевого изохронного циклотрона являются расчет самого режима работы, построение его компьютерной модели и ее аналитическая оценка. В качестве компьютерной модели может быть использована интерполированная карта результирующего магнитного поля, соответствующего рассчитанному режиму работы. Анализ полученного режима работы включает в себя расчет изохронного магнитного поля с учетом флаттера, расчет частот свободных колебаний и расчет фазового движения ускоряемых частиц [4–6].

Режим работы многоцелевого изохронного циклотрона состоит из значения тока в главной катушке I_{mc} , значений токов в концентрических катушках коррекции основного магнитного поля $I_{tc0}, I_{tc1}, \dots, I_{tcm}$, значений частоты ВЧ-генератора F_{ff} и напряжения на дуантах U_d . К исходным данным, используемым при расчете режимов работы, относятся: тип ускоряемых частиц, радиус вывода R_{out} , расчетная кинетическая энергия на радиусе вывода E_{out} , кратность ускорения H (отношение частоты ВЧ-генератора F_{ff} к частоте обращения частицы F_0), периодичность магнитной структуры N , диапазон формирования требуемого магнитного поля от источника ионов до радиуса конца диапазона изохронизации магнитного поля R_{end} , радиус рабочей точки R_w , маршрут файла маски изохронного магнитного поля, задающей профиль бампа, а также маршруты к файлам карт измеренных основных и дополнительных магнитных полей. Использующиеся карты магнитных полей позволяют рассчитать изохронное магнитное поле с учетом флаттера.

Основные магнитные поля промеряются для определенного набора токов в главной катушке. Дополнительные магнитные поля промеряются для максимальных значений токов в концентрических катушках, взятых по очереди, на соответствующих уровнях тока в главной катушке. Карты магнитных полей измеряются с определенными шагами по радиусу и по азимуту с точностью до $\varepsilon_{ms} = e - 4$ на уровне порядка 1,8 Тл. Максимальный вклад отдельно взятой концентрической катушки в основное магнитное поле зависит от уровня тока в главной катушке. С увеличением тока в главной катушке величина максимального вклада отдельно взятой концентрической катушки в основное магнитное поле уменьшается.

К граничным условиям, накладываемым на рассчитываемые параметры, относятся нижнее и верхнее предельные значения частоты ВЧ-генератора, нижнее и верхнее предельные значения для тока в главной катушке, нижнее и верхнее предельные значения для тока в отдельно взятой концентрической катушке. Амплитуда и протяженность бампа выбираются исходя из условий

оптимального захвата и ускорения ионов на начальных оборотах. Значение радиуса конца диапазона изохронизации магнитного поля R_{end} выбирается с таким расчетом, чтобы отрицательный фазовый сдвиг ускоряемых ионов на бампе компенсировался их положительным фазовым сдвигом в краевом магнитном поле. При этом значение фазового сдвига на радиусе вывода R_{out} должно быть равным $\Delta\varphi_{\text{out}} = (0 \pm 0, 2)$ рад. Радиус вывода R_{out} является радиусом заброса пучка ускоренных частиц в дефлектор. Заброс осуществляется за счет раскачки пучка, как правило, за один оборот. Значение радиуса рабочей точки R_w , являющейся точкой пересечения среднего требуемого магнитного поля (суммы изохронного магнитного поля и его маски) и среднего основного магнитного поля, выбирается и уточняется в процессе моделирования требуемого режима работы исходя из оценки значения наиболее критичного циклотронного параметра. При этом циклотронные параметры оцениваются в диапазоне рабочих радиусов ускорения частиц от источника ионов до радиуса вывода R_{out} , а значение радиуса рабочей точки выбирается внутри диапазона формирования требуемого магнитного поля. При моделировании новых режимов работы многоцелевых изохронных циклотронов со спирально-секторной магнитной структурой и малой величиной флаттера обычно принимаются три допущения:

- величина вклада концентрической катушки в основное магнитное поле берется в прямо пропорциональной зависимости от величины ее тока на определенном уровне тока в главной катушке;
- не учитывается взаимное влияние концентрических катушек друг на друга;
- не учитывается влияние вкладов концентрических катушек в основное магнитное поле на фазу основной гармоники этого поля.

В целом смоделированный режим работы должен обеспечивать изохронное, т. е. одновременное, ускорение частиц в диапазоне изохронизации магнитного поля от радиуса конца бампа R_{bump} до радиуса конца диапазона изохронизации R_{end} при прохождении частиц через ускоряющий зазор. При этом частота ВЧ-генератора остается неизменной, а радиус динамической орбиты ускоряемой частицы растет в процессе ускорения.

Расчет значений токов в концентрических катушках производится на определенном уровне тока в главной катушке. В качестве исходных для расчета данных используются измеренные карты магнитных полей. При этом решается некорректная задача, когда неоднородная система линейных алгебраических уравнений является плохо обусловленной, поскольку ее определитель имеет значение, равное машинному нулю. Решение некорректной задачи неустойчиво по отношению к ошибке измерения карт магнитных полей,

использующихся при расчете. Традиционный метод моделирования режимов работы основан на одновременном нахождении токов во всех концентрических катушках. Новый метод моделирования режимов работы является итерационным и основан на последовательном нахождении токов в каждой из рассматриваемых концентрических катушек. Метод получил свое название от введения в алгоритм моделирования режимов работы двух итерационных циклов — внешнего, для расчета кинетической энергии вывода, и внутреннего, для расчета токов в концентрических катушках. При использовании традиционного метода независимо от качества исходных данных всегда имеется определенное решение. В итерационном методе, в отличие от традиционного, от качества исходных данных зависит сходимость решения. Следовательно, итерационный метод дает возможность косвенной оценки качества исходных данных через оценку сходимости решения. Встроенный в итерационный метод механизм интерполяции карты результирующего магнитного поля позволяет выполнить дополнительную калибровку используемых при расчете исходных данных. Кроме того, внутри итерационного цикла расчета токов в концентрических катушках производится учет влияния вкладов на флаттер основного магнитного поля, что приводит к уточнению расчета изохронного магнитного поля в пределах ± 3 Гс (для режимов работы АИС144). Как правило, при использовании традиционного метода необходимо произвести от двух до пяти расчетно-экспериментальных итераций для формирования требуемого режима работы. С помощью итерационного метода пучок частиц с требуемыми параметрами ускоряется в диапазоне рабочих радиусов без эмпирической подстройки токов в концентрических катушках и частоты ВЧ-генератора. Очевидно, при использовании одних и тех же качественных исходных данных и расчете требуемого режима работы без учета влияния вкладов на флаттер основного магнитного поля оба метода дают одинаковые результаты. В целом, в силу приведенных выше причин, итерационный метод позволяет получить на компьютере (без проведения дополнительных измерений карт магнитных полей) более точное решение, чем традиционный (в рамках одной расчетной итерации). В настоящее время ведется работа по регуляризации решения представленной некорректной задачи.

При расчете токов в концентрических катушках традиционным методом обычно используется стандартная программа DFUMIL, входящая в программный комплекс FUMIL. DFUMIL разработана на Fortran и хранится в библиотеке программ ОИЯИ JINRLIB (<http://www.jinr.ru/programs/jinrlib/jinrovr.htm>). При расчете токов в концентрических катушках итерационным методом используется программа CYCMODE, разработанная на C++ с использованием Visual C++ 7.0. Она позволяет рассчитать требуемый режим работы и произвести интерполяцию соответствующей ему карты магнитного поля. Анализ рассчитанного режима работы производится на интерполированной карте результирующего магнитного поля с помощью программы CAMP, разработан-

ной на C++ с использованием Visual C++ 7.0. Программы CYCMODE и CAMP написаны в стандарте SDI и работают под управлением OS MS Windows32.

1. АЛГОРИТМЫ

К методам моделирования режимов работы многоцелевого изохронного циклотрона предъявляются следующие требования.

- Минимизация фазовых потерь тока пучка ускоренных частиц в диапазоне изохронизации магнитного поля.
- Электробезопасность системы питания концентрических катушек коррекции основного магнитного поля, связанная как с уменьшением числа задействованных концентрических катушек, так и с уменьшением мощности, потребляемой ими на определенном уровне тока в главной катушке.
- Удобство перехода на вновь формируемые режимы работы без остановки эксплуатации циклотрона.

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма традиционного метода моделирования режимов работы многоцелевого изохронного циклотрона.

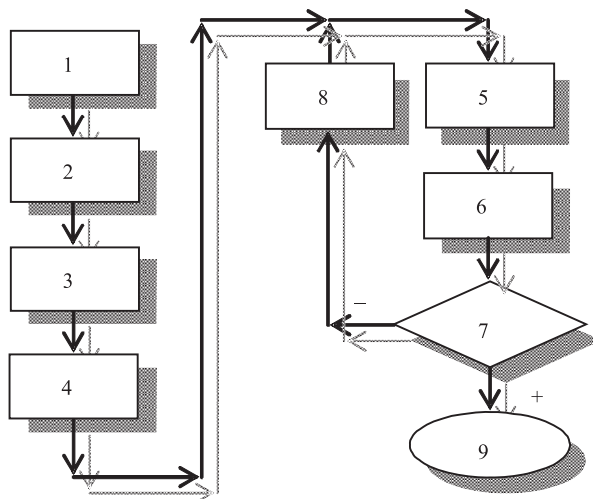


Рис. 1. Блок-схема алгоритма традиционного метода моделирования режимов работы

1. Ввод исходных данных и граничных условий.
2. Расчет значения частоты ВЧ-генератора.
3. Выбор значения тока в главной катушке.
4. Одновременный расчет значений токов во всех концентрических катушках на определенном уровне тока в главной катушке с помощью многопараметрового метода наименьших квадратов.
5. Установка токов в катушках изохронного циклотрона и измерение соответствующей карты сформированного магнитного поля.
6. Расчет $\Delta \bar{B}$ — отклонения среднего измеренного магнитного поля от среднего требуемого магнитного поля в заданном диапазоне его формирования.
7. Критерий оценки точности приближения среднего измеренного магнитного поля к среднему требуемому магнитному полю в заданном диапазоне формирования $|\Delta \bar{B}|_{\max} < \varepsilon \bar{B}$.
8. Расчет поправок к значениям токов в концентрических катушках на определенном уровне тока в главной катушке с помощью многопараметрового метода наименьших квадратов и коррекция предыдущего решения.
9. Выход.

На практике в зависимости от формируемого режима работы используется от двух до пяти расчетно-экспериментальных итераций, представленных в виде алгоритма на рис. 1 [7]. Таким образом, традиционный метод моделирования режимов работы является расчетно-экспериментальным.

На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма итерационного метода моделирования режимов работы многоцелевого изохронного циклотрона.

1. Ввод исходных данных, граничных условий и параметров численного расчета (точности и числа итераций).
2. Расчет частоты обращения частицы как функции расчетной кинетической энергии вывода.
3. Расчет тока в главной катушке на основе использования значения радиуса рабочей точки.
4. Критерий оценки точности расчета тока в главной катушке $\left| \frac{\Delta I_{mc}}{I_{mc}} \right| < \varepsilon I_{mc}$.

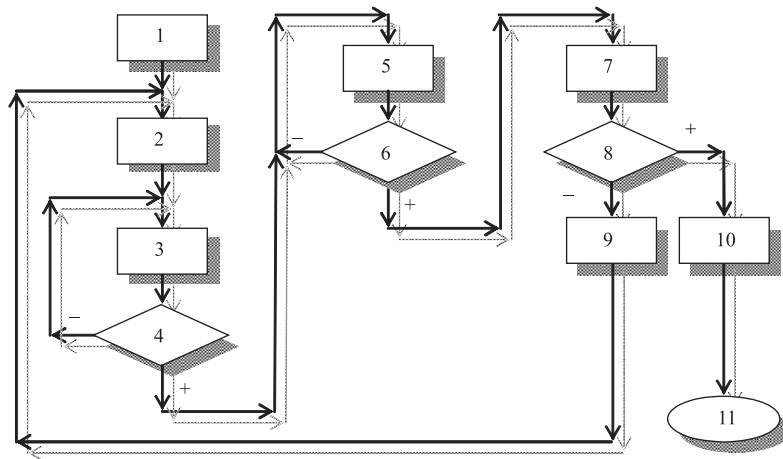


Рис. 2. Блок-схема алгоритма итерационного метода моделирования режимов работы

5. Последовательный расчет значений токов в концентрических катушках на определенном уровне тока в главной катушке с помощью однопараметрового метода наименьших квадратов.
6. Критерий оценки точности расчета набора токов в m концентрических катушках $\left| \frac{\Delta I_{tc, i}}{I_i} \right|_{\max} < \varepsilon_{I_{tc}}, (i = 1 \sim m)$.
7. Расчет кинетической энергии на заданном радиусе вывода.
8. Критерий оценки точности расчета кинетической энергии на заданном радиусе вывода $\left| \frac{\Delta E_{out}}{E_{out}} \right| < \varepsilon_E$.
9. Коррекция расчетной кинетической энергии на заданном радиусе вывода.
10. Интерполяция карты магнитного поля, соответствующего рассчитанному режиму работы, и ее анализ.
11. Выход.

На практике в силу калибровки значений измеренных карт магнитных полей, используемых при расчете режимов работы, а также в силу учета влияния вкладов концентрических катушек на флаттер основного магнитного

поля не требуется проведение дополнительных измерений карт магнитных полей [8, 9]. Таким образом, итерационный метод является только расчетным.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Как при использовании традиционного, так и при использовании итерационного метода моделирования режимов работы многоцелевого изохронного циклотрона все расчеты токов в концентрических катушках коррекции основного магнитного поля выполняются на определенном уровне тока в главной катушке I_{mc} с целью формирования требуемого магнитного поля. При этом функционал выглядит следующим образом:

$$S(I_{tc,1}, I_{tc,2}, \dots, I_{tc,m}) = \sum_{r=1}^n \left(\sum_{i=1}^m \alpha_{i,r} I_{tc,i} - (\overline{B}_{task,r} - \overline{B}_{mc,r}) \right)^2,$$

где $\alpha_{i,r} = \frac{\overline{B}_{tc,i,r,max}}{I_{tc,i,max}}$ — отношение максимального значения среднего магнитного поля вклада i -й концентрической катушки в основное магнитное поле на r -м радиусе к соответствующему максимальному значению ее тока; $\overline{B}_{task,r}$ — среднее требуемое магнитное поле на r -м радиусе, являющееся суммой изохронного магнитного поля и его маски, задающей профиль бампа; $\overline{B}_{mc,r}$ — среднее основное магнитное поле на r -м радиусе.

При использовании традиционного метода моделирования режимов работы минимизация функционала осуществляется с помощью многопараметрового метода наименьших квадратов. При этом получается неоднородная СЛАУ, которая может быть представлена в матричной форме следующим образом:

$$A \cdot Y = B,$$

где

$$A = \left\| \begin{array}{c} a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1m} \\ a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2m} \\ \dots \\ a_{m1}, a_{m2}, \dots, a_{mm} \end{array} \right\|, \quad Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T, \quad B = (b_1, b_2, \dots, b_m)^T.$$

Здесь

$$a_{i,j} = \sum_{r=1}^n \alpha_{i,r} \alpha_{r,j}, \quad y_i = I_{tc,i}, \quad b_i = \sum_{r=1}^n \alpha_{i,r} (\overline{B}_{task,r} - \overline{B}_{mc,r}),$$

$$i = 1 \sim m, \quad j = 1 \sim m, \quad \overline{B}_{task,r} = \overline{B}_{is,r} + \overline{B}_{mask,r},$$

где $\overline{B}_{is,r}$ — изохронное магнитное поле на r -м радиусе, а $\overline{B}_{mask,r}$ — среднее магнитное поле его маски на r -м радиусе. Решение неоднородной СЛАУ обычно находится с помощью прямого метода Гаусса:

$$I_{tc,i}, \quad i = 1 \sim m.$$

При использовании итерационного метода моделирования режимов работы минимизация функционала осуществляется с помощью однопараметрового метода наименьших квадратов. При этом ток в очередной концентрической катушке находится по нижеприведенной формуле:

$$I_{tc,i}^k = -\frac{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m a_{i,j} I_{tc,j} - b_i^k}{a_{i,i}}, \quad i = 1 \sim m,$$

где

$$b_i^k = \sum_{r=1}^n \alpha_{i,r} \left(\overline{B}_{task,r}^k - \overline{B}_{mc,r} \right), \quad \overline{B}_{task,r}^k = \overline{B}_{is,r}^k + \overline{B}_{mask,r},$$

а k — индекс очередной итерации, учитывающей влияние вкладов на флаттер основного магнитного поля. Токи в концентрических катушках рассчитываются с точностью $\varepsilon_{I_{tc}}$. При этом концентрические катушки перебираются в направлении от края к центру многоцелевого изохронного циклотрона в соответствии с зонами их влияния на его основное магнитное поле.

Итерационный метод моделирования режимов работы, по сравнению с традиционным, имеет ряд особенностей. Он включает в себя итерационный расчет значения тока в главной катушке и итерационный расчет кинетической энергии вывода. При использовании итерационного метода порядок расчета режима работы выглядит следующим образом. Сначала производится расчет частоты обращения частицы по приближенной формуле

$$F_0 = \frac{c}{2\pi \cdot R_{mn,out}} \cdot \sqrt{1 - \frac{E_0^2}{(E_0 + E_{start,out})^2}}, \quad E_0 = m_0 \cdot c^2,$$

где m_0 — масса покоя частицы; c — скорость света; E_0 — энергия покоя частицы; $R_{mn,out}$ — средний радиус замкнутой равновесной орбиты, соответствующий радиусу вывода R_{out} ; $E_{start,out}$ — расчетная кинетическая энергия вывода. В начале итерационного цикла значение $E_{start,out}$ устанавливается равным значению требуемой кинетической энергии вывода E_{out} . Расчет теоретической зависимости изохронного магнитного поля от среднего радиуса замкнутой равновесной орбиты без учета флаттера производится по приближенной формуле

$$\bar{B}_{\text{is}}(\bar{r}) = \frac{m_0 \cdot w_0}{|q|} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\bar{r}w_0}{c}\right)^2}}, \quad w_0 = 2\pi F_0,$$

где \bar{r} — средний радиус замкнутой равновесной орбиты; q — заряд частицы; w_0 — циклическая частота обращения частицы. Далее рассчитывается среднее требуемое магнитное поле и выбирается значение радиуса рабочей точки R_w . В соответствии с последним определяется конкретное значение среднего требуемого магнитного поля. Составляется зависимость среднего основного магнитного поля от тока в главной катушке для выбранного значения радиуса рабочей точки. Исходя из полученной зависимости находится значение тока в главной катушке для конкретного значения среднего требуемого магнитного поля. Как правило, рассчитанный ток в главной катушке не соответствует по своему значению набору токов, при которых производились измерения карт основных магнитных полей. Поэтому для расчета изохронного магнитного поля с учетом флаттера по итерационной процедуре, описанной М. М. Гордоном в [4], и последующего пересчета значения тока в главной катушке производится интерполяция карты основного магнитного поля для рассчитанного уровня тока в главной катушке. Эта интерполяция основывается на использовании интерполяционного полинома Лагранжа второй степени. Ток в главной катушке рассчитывается с заданной точностью $\varepsilon_{I_{\text{mc}}}$. После расчета тока в главной катушке производится интерполяция максимальных вкладов всех концентрических катушек в основное магнитное поле для рассчитанного уровня тока в главной катушке. Эта интерполяция также основывается на использовании интерполяционного полинома Лагранжа второй степени. Далее осуществляется последовательный расчет значений токов в концентрических катушках $I_{\text{tc},i}$, $i = 1 \sim m$, с точностью $\varepsilon_{I_{\text{tc}}}$. Расчет конечной кинетической энергии вывода производится по следующей приближенной формуле:

$$E_{\text{end,out}} = \sqrt{(\bar{B}_{\text{mn,out}} R_{\text{ev,out}} |q| c)^2 + E_0^2} - E_0, \quad E_0 = m_0 c^2,$$

$$R_{\text{ev,out}} = r_{\text{ev}}(R_{\text{mn,out}}),$$

где $R_{\text{ev,out}}$ — радиус эквивалентной орбиты, которая соответствует замкнутой равновесной орбите со средним радиусом $R_{\text{mn,out}}$, равным радиусу вывода R_{out} ; $\bar{B}_{\text{mn,out}}$ — среднее магнитное поле на среднем радиусе замкнутой равновесной орбиты $R_{\text{mn,out}}$; q — заряд частицы. Расчет радиуса эквивалентной

орбиты производится по приближенной формуле [10]

$$r_{\text{ev}}(\bar{r}) = \bar{r} \left\{ 1 + \frac{\varepsilon_N^2}{2(N^2 - k - 1)(k + 1)} \left(2 - \frac{N^2}{2(N^2 - k - 1)} + k + \bar{r} \frac{\varepsilon'_N}{\varepsilon_N} \right) + \frac{\varepsilon_N^2 N^2}{4(N^2 - k - 1)^2} \right\},$$

$$\varepsilon_N = \frac{B_N}{\bar{B}_{\text{mn}}}, \quad \varepsilon'_N = \frac{d\varepsilon_N}{d\bar{r}}, \quad k = \bar{r} \frac{\bar{B}_{\text{mn}'}}{\bar{B}_{\text{mn}}}, \quad \bar{B}_{\text{mn}'} = \frac{d\bar{B}_{\text{mn}}}{d\bar{r}},$$

где \bar{r} — средний радиус замкнутой равновесной орбиты; N — периодичность магнитной структуры; B_N — амплитуда основной гармоники результирующего магнитного поля; \bar{B}_{mn} — среднее магнитное поле; ε_N — нормированная средним магнитным полем амплитуда основной гармоники результирующего магнитного поля; k — индекс магнитного поля. При необходимости расчетная кинетическая энергия вывода $E_{\text{start,out}}$, используемая в аналитической формуле расчета частоты обращения частицы, пересчитывается:

$$\Delta E_{\text{out}} = E_{\text{end,out}} - E_{\text{out}}, \quad E_{\text{start,out}}^* = E_{\text{start,out}} - \Delta E_{\text{out}},$$

$$E_{\text{start,out}} = E_{\text{start,out}}^*.$$

Приближение конечной кинетической энергии вывода $E_{\text{end,out}}$ к требуемой кинетической энергии вывода E_{out} оценивается с точностью ε_E . Итерационный метод моделирования режимов работы многоцелевого изохронного циклотрона позволяет производить расчет как для заданной частоты обращения частицы, так и для заданной кинетической энергии вывода.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Основной режим работы многоцелевого изохронного циклотрона АИС144 предназначен для облучения меланомы глаза пациента пучком протонов с кинетической энергией в камере облучения около 60 МэВ и током 10 нА. Потери кинетической энергии ускоренных протонов в тракте транспортировки пучка от системы вывода до глаза пациента составляют около 1,5 МэВ. Параметры формирования основного режима работы АИС144 и соответствующего внутреннего пучка ускоренных протонов приведены в табл. 4.

19 февраля 2007 г. на АИС144 был проведен физический эксперимент по проверке результатов моделирования основного режима работы этого циклотрона. Моделирование осуществлялось итерационным методом с помощью программ SYCMODE и CAMP.

Таблица 4. Параметры формирования основного режима работы

Параметр	Обозначение	Значение
Тип частиц	p	Протоны
Требуемая кинетическая энергия вывода, МэВ	E_{out}	$59,5 \pm 0,5$
Кратность ускорения	H	1
Периодичность магнитной структуры	N	4
Диапазон формирования требуемого магнитного поля, м	R_{beg}	0
	R_{end}	0,595
Радиус рабочей точки, м	R_w	0,57
Диапазон формирования бампа, м	R_0	0
	R_{bump}	0,16
Радиус вывода, м	R_{out}	0,62
Радиус расположения первого ножа дефлектора, м	R_{def}	0,629
	R_{def}	0,629
Предельно допустимые значения тока в главной катушке, А	$I_{mc,min} \sim I_{mc,max}$	100 ~ 610 (600)
Предельно допустимые значения токов в концентрических катушках, А	$I_{tc01,min}, \dots, I_{tc20,min}$	-400 (-385)
	$I_{tc01,max}, \dots, I_{tc20,max}$	+400 (+385)
Минимально допустимое значение частоты вертикальных свободных колебаний в диапазоне рабочих радиусов	$Q_{z,min}$	0,05
Минимальное значение фазового сдвига ускоряемых частиц в диапазоне рабочих радиусов, рад	$\Delta\varphi_{min}$	-0,5
Фазовый сдвиг ускоряемых частиц на радиусе вывода, рад	$\Delta\varphi_{out}$	$0 \pm 0,2$
Значение тока пучка ускоренных протонов в диапазоне его закалки, нА	I_{beam}	30 ± 5

В табл. 5 приведены конечные результаты расчета основного режима работы АИС144*.

*Впоследствии режим работы был пересчитан с помощью последней версии SYCMODE с незначительным уточнением решения.

Таблица 5. Основной режим работы АИС144

Параметр	F_{rf} , МГц	U_d , кВ	I_{mc} , А	I_{tc01} , А	I_{tc02} , А	I_{tc03} , А	I_{tc04} , А	I_{tc05} , А	I_{tc06} , А	I_{tc07} , А	I_{tc08} , А
Величина	26,25	65	593,519	0	167	0	6	137	-7	104	0

Параметр	I_{tc09} , А	I_{tc10} , А	I_{tc11} , А	I_{tc12} , А	I_{tc13} , А	I_{tc14} , А	I_{tc15} , А	I_{tc16} , А	I_{tc17} , А	I_{tc18} , А	I_{tc19} , А	I_{tc20} , А
Величина	-80	-178	-243	-267	-75	-230	-330	-385	-122	-156	-123	-166

Расчет был выполнен с точностью $\varepsilon_{I_{tc}} = 2e - 3$ для определенной частоты ВЧ-генератора. Граничные условия, накладываемые на рассчитываемые значения токов в концентрических катушках, были установлены на уровне ± 385 А для всех концентрических катушек за исключением пятнадцатой. По техническим причинам для пятнадцатой концентрической катушки граничные условия были установлены на уровне ± 330 А. Ток в главной катушке реально составил $I_{mc} = 590$ А, а напряжение на дуантах $U_d = 46$ кВ. В соответствии с рассчитанным режимом работы была проведена интерполяция карты результирующего магнитного поля. Последняя была использована для аналитической оценки смоделированного основного режима работы АИС144.

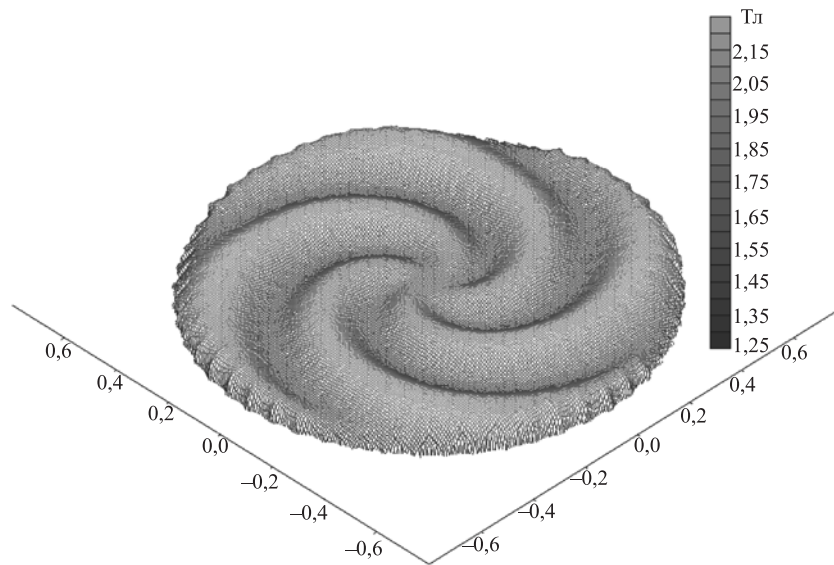


Рис. 3. Результирующее магнитное поле

На рис. 3 представлена визуализация интерполированной карты результирующего магнитного поля основного режима работы АИС144. На рис. 4 показаны среднее требуемое и среднее основное магнитные поля.

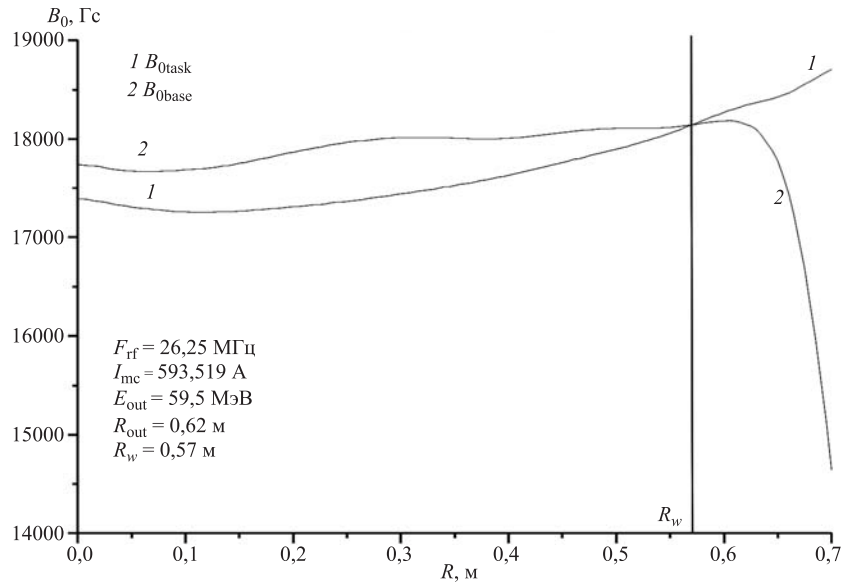


Рис. 4. Среднее требуемое и среднее основное магнитные поля

Здесь $B_{0\text{task}}$ — среднее требуемое магнитное поле, а $B_{0\text{base}}$ — среднее основное магнитное поле. На рис. 5 приведена ошибка среднего магнитного поля (за исключением бампа). Она рассчитывается как разность между средним магнитным полем и изохронным магнитным полем в заданном диапазоне формирования требуемого магнитного поля от R_{beg} до R_{end} .

Из рисунка видно, что ошибка среднего магнитного поля распределена симметрично относительно 0 Гс. На рис. 6 представлены частоты горизонтальных и вертикальных свободных колебаний Q_r и Q_z соответственно. Расчетные формулы приведены в [5].

Видно, что значение частоты вертикальных свободных колебаний Q_z не ниже предельно допустимого значения 0,05 во всем диапазоне рабочих радиусов ускорения частиц от R_{beg} до R_{out} . На рис. 7 представлено фазовое движение ускоряемых протонов $\Delta\varphi$. Расчетную формулу см. в [6].

Из рисунка видно, что фазовый сдвиг ускоряемых частиц $\Delta\varphi_{\text{out}}$ на радиусе вывода R_{out} примерно соответствует 0 град. На рис. 8 представлен измеренный ток пучка ускоренных протонов. Фазовые потери тока пучка ускорен-

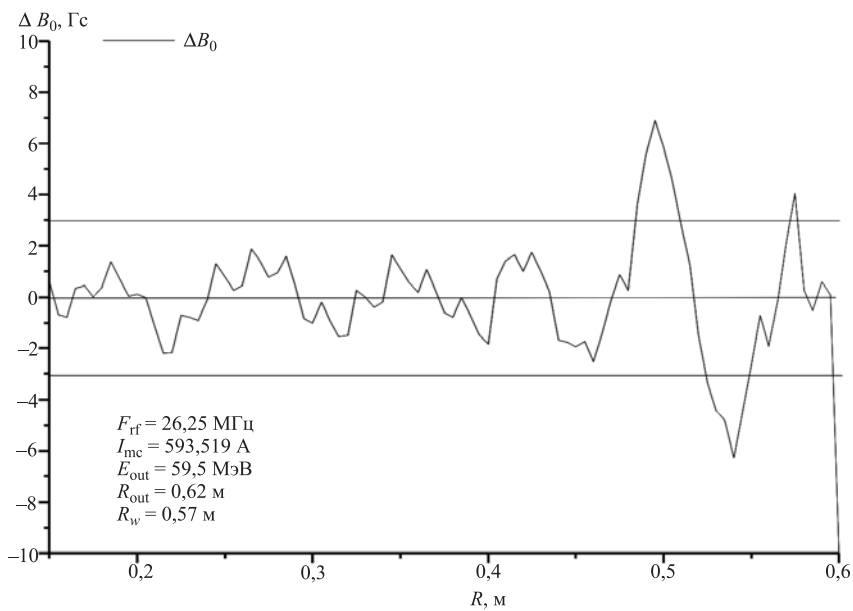


Рис. 5. Ошибка среднего магнитного поля

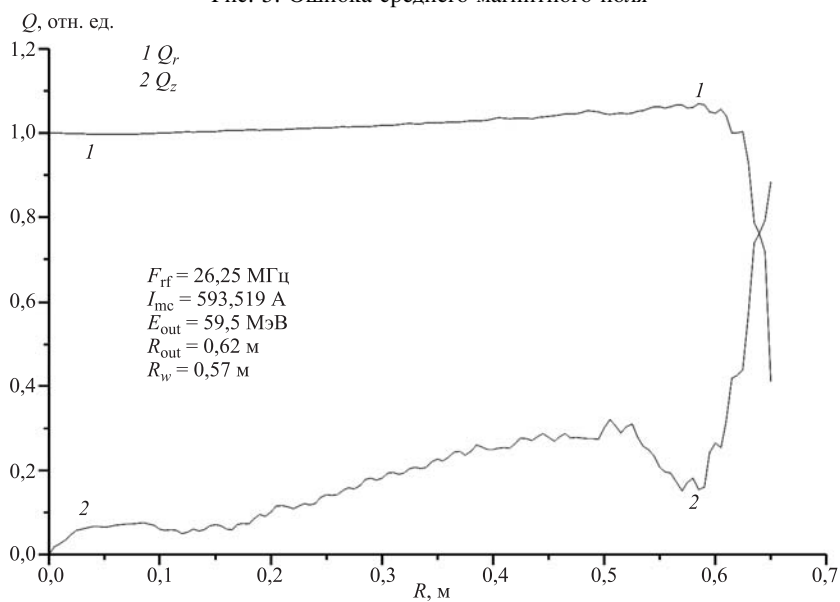


Рис. 6. Частоты горизонтальных и вертикальных свободных колебаний

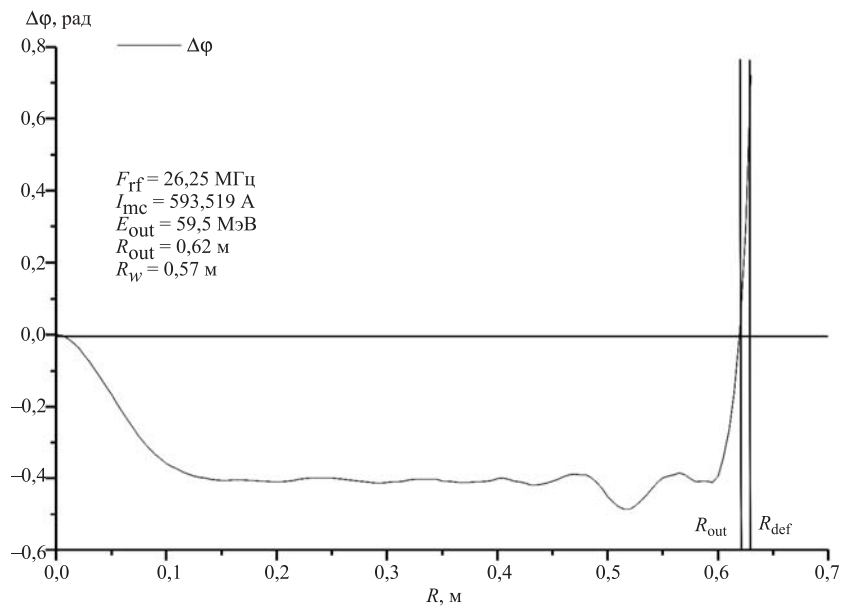


Рис. 7. Фазовое движение ускоряемых протонов

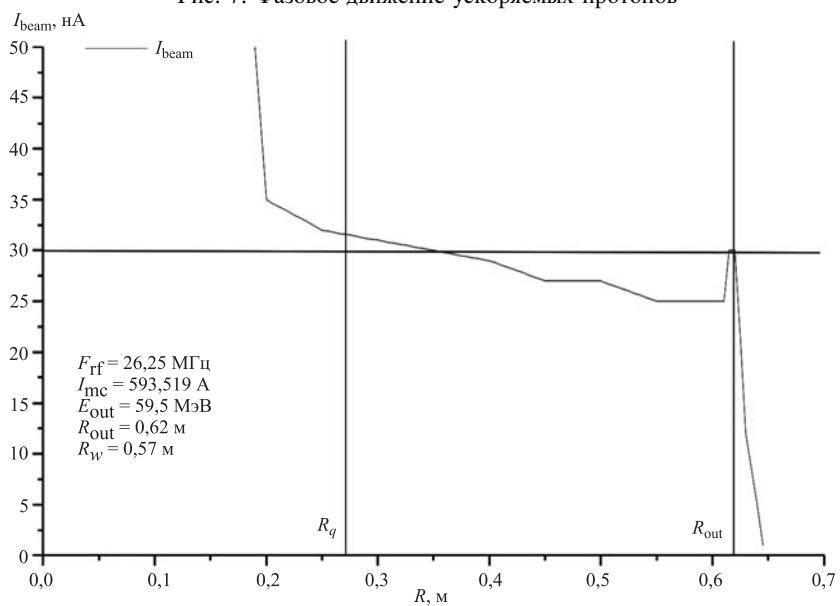


Рис. 8. Измеренный ток пучка ускоренных протонов

ных протонов в диапазоне его закали от R_q до R_{out} ($Q_z > 0, 15$) составляют $\sim 1, 5$ нА ($\sim 5\%$), что находится в пределах точности измерения тока пучка $\Delta I = \pm 5$ нА.

Пучок ускоренных протонов основного режима работы АИС144, полученный в эксперименте, проведенном 19 февраля 2007 г. на основе использования итерационного метода (без эмпирической подстройки токов в концентрических катушках), проходит без существенных фазовых потерь на конечных радиусах ускорения на 2 см дальше, чем аналогичный пучок, полученный в эксперименте, проведенном 5 февраля 2007 г. на основе использования традиционного метода с двумя расчетно-экспериментальными итерациями и с последующей эмпирической подстройкой токов в концентрических катушках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показал ряд физических экспериментов по ускорению внутренних пучков протонов с энергией вывода в диапазоне от 30 до 60 МэВ [4, 5], выполненных на многоцелевом изохронном циклотроне АИС144, при использовании нового итерационного метода моделирования режимов работы, в отличие от традиционного, для получения внутреннего пучка ускоренных ионов с заданными параметрами не нужно производить дополнительные измерения карт магнитных полей. Кроме того, время проводки внутреннего пучка ускоренных ионов после установки смоделированного режима работы на циклотроне значительно сокращается и составляет порядка 10 мин, так как внутренний пучок ускоряется без эмпирической подстройки токов в концентрических катушках коррекции основного магнитного поля, а также без эмпирической подстройки частоты ВЧ-генератора. При этом фазовые потери тока пучка ускоренных ионов в диапазоне его закали значительно сокращаются за счет более качественного формирования требуемого магнитного поля. Итерационный метод дает возможность косвенной оценки качества исходных данных через оценку сходимости решения. В целом использование итерационного метода позволяет сэкономить рабочее время и облегчить работу как оператора, так и всего обслуживающего персонала многоцелевого изохронного циклотрона.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 07-01-00738.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аленицкий Ю. Г. и др. Циклотрон с регулируемой энергией для протонной терапии // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, № 1(124). С. 84–95.
2. Ливингуд Дж. Принципы работы циклических ускорителей. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.

3. *Schwabé E. и др.* Магнитная система автоматического изохронного циклотрона АИС144 // Intern. Seminar on Isochronous Cyclotron Technique. 1978. P. 237–256.
4. *Gordon M. M.* Calculation of isochronous fields for sector-focused cyclotrons // Part. Accel. 1983. V. 13. P. 67–84.
5. *Киян И. Н., Тарашкевич Р.* Анализ области применения аналитических формул для расчета частот свободных колебаний в изохронных циклотронах. Сообщение ОИЯИ Р9-2005-114. Дубна, 2005.
6. *Stammbach T.* Cyclotrons // Joint Universities Accelerator School, Archamps, France, 1997.
7. *Ворожцов С. Б. и др.* Формирование рабочих магнитных полей изохронного циклотрона АИЦ-144. Сообщение ОИЯИ Р9-2000-38. Дубна, 2000.
8. *Киян И. Н.* Новый метод моделирования режимов работы многоцелевого изохронного циклотрона // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3, № 7(136). С. 47–52.
9. *Taraszkiewicz R. et al.* Simulation of operation modes of isochronous cyclotron by a new iterative method // Nukleonika. 2007. V. 52(1). P. 29–34.
10. *Аносов В. Н. и др.* Исследование движения и коррекции фазы сгустка в изохронном циклотроне. Сообщение ОИЯИ 9-8496. Дубна, 1974.

Получено 24 августа 2007 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 22.11.2007.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,37. Уч.-изд. л. 1,68. Тираж 310 экз. Заказ № 55973.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/