

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ МНОГОЦЕЛЕВОГО ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА АИЦ-144

И. В. Амирханов^а, Г. А. Карамышева^а, И. Н. Киян^а, Я. Суликовский^б

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт ядерной физики Польской академии наук, Краков, Польша

В этой работе рассматривается математическая модель для расчета токов в главной, двадцати концентрических катушках и двух парах гармонических катушек многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144 (ИЯФ ПАН (Краков)). В статье также приводятся результаты численных расчетов динамики пучка ускоряемых ионов в приближении замкнутых равновесных орбит для основного режима работы ускорителя. На основе результатов компьютерного моделирования основного режима работы АИЦ-144, проведенного с помощью Cyclotron Operator Help Program Complex 2009, в июне 2009 г. был успешно ускорен и выведен пучок протонов с кинетической энергией вывода $E_k \sim 60$ МэВ. Полученный пучок ускоренных ионов был использован для успешной протонной терапии меланомы глаза у первых девяти пациентов, которая была проведена в ИЯФ ПАН в феврале – апреле 2011 г.

The mathematical model for calculation of currents in main, twenty trim coils and two pairs of harmonic coils of multi-purpose isochronous cyclotron AIC-144 (INP of PAS (Krakow)) is considered. The results of numerical calculations of dynamics of the accelerated ion beam in approximation of the closed equilibrium orbits for the AIC-144 main operation mode are also given. On the basis of the results of computer modeling executed by means of Cyclotron Operator Help Program Complex 2009 for the AIC-144 main operation mode, in June 2009 the beam of protons with kinetic energy of extraction $E_k \sim 60$ MeV has been successfully accelerated and extracted. The extracted beam of the accelerated ions has been used for the successful proton therapy of melanoma of eye at first nine patients which has been executed in the INP of PAS in February – April 2011.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование новых режимов работы многоцелевых изохронных циклотронов позволяет переходить на работу с этими режимами без остановки и разборки ускорителей для проведения дополнительных магнитных измерений. Это особенно актуально, когда ставится задача оценить принципиальную возможность ускорения пучка ионов с заданными параметрами в новом режиме работы и подтвердить правильность оценки экспериментальным путем. Поскольку задача перехода на новые режимы работы возникает регулярно в связи с необходимостью увеличения кинетической энергии вывода ускоренных ионов, изменением технических условий ускорения частиц и т.п., задача математического моделирования новых режимов работы изохронных циклотронов имеет большую практическую значимость. Для решения поставленной задачи была разработана

методика математического моделирования новых режимов работы в применении к многоцелевому изохронному циклотрону АИЦ-144, расположенному в ИЯФ ПАН (Краков) и предназначенному как для производства радиоизотопов, так и для протонной терапии меланомы глаза пациентов (основной режим работы: протоны, кинетическая энергия вывода $E_k \sim 60$ МэВ, частота ВЧ-генератора $F_{\text{ГЧ}} = 26,155$ МГц). Основные параметры АИЦ-144 приведены на сайте ИЯФ ПАН: http://www.ifj.edu.pl/str/dc/pages/eng_index.html.

Режим работы многоцелевого изохронного циклотрона представляет собой набор следующих основных параметров: тип ускоряемых частиц, значение напряжения на дуантах, значение частоты ВЧ-генератора и значения токов в катушках ускорителя. Методика расчета токов в главной катушке, предназначенной для возбуждения главного магнита, и двадцати концентрических катушках коррекции основного магнитного поля АИЦ-144 подробно изложена в работе [1]. Обратная задача расчета токов в концентрических катушках изохронного циклотрона является некорректной. В связи с этим большое значение для качества расчета имеют как точность исходных данных (измеренных и рассчитанных карт магнитных полей), так и устойчивость получаемого вектора решения. Вектор решения находится для определенного уровня тока в главной катушке, поскольку амплитуды средних магнитных полей вкладов концентрических катушек в основное магнитное поле (с усреднением по азимуту в зависимости от радиуса) зависят от степени насыщения железа главного магнита изохронного циклотрона. Ввод вектора решения в границы области допустимых значений осуществляется покомпонентно в направлении, определяемом расположением зон влияния концентрических катушек на основное магнитное поле изохронного циклотрона, а именно — при движении от центра к краю ускорителя. Алгоритм улучшения устойчивости вектора решения, основанный на новом критерии исключения из расчета части задействованных концентрических катушек, приведен в работе [2]. Расчет токов в двух парах гармонических катушек коррекции первой гармоники результирующего магнитного поля изохронного циклотрона производится с целью улучшения разделения двух последних орбит и увеличения коэффициента вывода пучка ускоренных ионов через трехсекционный электростатический дефлектор. Методика расчета токов в двух парах гармонических катушек АИЦ-144 представлена в работе [3]. На языке программирования C++ в среде программирования MS Visual Studio.NET был разработан комплекс программ Cyclotron Operator Help Program Complex (2004–2011), который был установлен на сервере АИЦ-144. Описание комплекса программ приведено в работе [4]. На основе результатов компьютерного моделирования основного режима работы АИЦ-144, проведенного с помощью Cyclotron Operator Help Program Complex 2009, в июне 2009 г. был успешно ускорен и выведен пучок протонов с кинетической энергией вывода $E_k \sim 60$ МэВ при частоте ВЧ-генератора $F_{\text{ГЧ}} = 26,155$ МГц [5]. Полученный пучок ускоренных ионов был использован для успешной протонной терапии меланомы глаза у первых девяти пациентов, которая была проведена в ИЯФ ПАН в феврале–апреле 2011 г.

1. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

При моделировании ряда новых режимов работы АИЦ-144 расчет изохронных магнитных полей производился с помощью Cyclotron Operator Help Program Complex (2004–2011) по аналитическим формулам, предложенным М. М. Гордоном [6]. С целью кон-

троля качества расчета изохронного магнитного поля, рассчитанного для основного режима работы АИЦ-144, в цилиндрической системе координат были выведены уравнения движения ионов в электромагнитном поле многоцелевого изохронного циклотрона. При этом была использована правая тройка попарно перпендикулярных базисных векторов e_r, e_φ, e_z , а проекция вектора магнитной индукции \mathbf{B} на ось OZ имела отрицательные значения. Уравнения движения были представлены в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с дифференцированием по времени (при замене переменной дифференцирования — с дифференцированием по азимутальному углу). Полученная система отличается от аналогичных систем, опубликованных ранее другими авторами, полнотой представления или знаками [7, 8]. Уравнения движения ионов в электромагнитном поле многоцелевого изохронного циклотрона с дифференцированием по времени в безразмерном представлении выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \ddot{r}^* - \left[\dot{\varphi}^{*2} + \frac{K_1}{E} \dot{\varphi}^* B_z^* \right] r^* &= -\frac{K_1}{E} z^* B_\varphi^* + \\ &+ \frac{1}{E} \left[(K_2 - K_3 \dot{r}^{*2}) E_r^* - K_3 \dot{\varphi}^* r^* E_\varphi^* - K_3 \dot{z}^* r^* E_z^* \right], \\ \ddot{\varphi}^* + 2 \frac{\dot{r}^*}{r^*} \dot{\varphi}^* &= \frac{K_1}{E} \left(\frac{\dot{z}^*}{r^*} B_r^* - \frac{\dot{r}^*}{r^*} B_z^* \right) + \\ &+ \frac{1}{E} \left[-K_3 \dot{r}^* \dot{\varphi}^* E_r^* + \left(\frac{K_2}{r^*} - K_3 r^* \dot{\varphi}^{*2} \right) E_\varphi^* - K_3 \dot{z}^* \dot{\varphi}^* E_z^* \right], \quad (1) \\ \ddot{z}^* &= \frac{K_1}{E} (\dot{r}^* B_\varphi^* - r^* \dot{\varphi}^* B_r^*) + \frac{1}{E} \left[-K_3 \dot{r}^* z^* E_r^* - K_3 r^* \dot{\varphi}^* \dot{z}^* E_\varphi^* + (K_2 - K_3 \dot{z}^{*2}) E_z^* \right], \\ K_1 &= qc^2 \hat{T}_0 \hat{B}_0, \quad K_2 = qc^2 \hat{T}_0^2 \frac{\hat{E}_0}{\hat{L}_0}, \quad K_3 = q \hat{E}_0 \hat{L}_0, \end{aligned}$$

где r^*, φ^*, z^* — это цилиндрические координаты ускоряемой частицы; $B_r^*, B_\varphi^*, B_z^*$ и $E_r^*, E_\varphi^*, E_z^*$ — проекции вектора магнитной индукции и вектора напряженности электрического поля на соответствующие координатные оси; E — полная энергия частицы, которая используется в качестве свободного параметра; q — заряд частицы; c — скорость света.

С целью определения начальных условий были выведены следующие аналитические выражения:

$$r_0^* = \frac{K_4}{1 + \sigma_N} \frac{\sqrt{K_6}}{E_0 + E_k}, \quad (2)$$

$$\dot{r}_0^* = A \frac{K_4}{E_0 + E_k} \sqrt{\frac{K_6}{A^2 + r_0^{*2}}}, \quad (3)$$

$$\varphi_0^* = \varphi_N^* + \frac{3\pi}{2N}, \quad (4)$$

$$\dot{\varphi}_0^* = \frac{\dot{r}_0^*}{A}, \quad (5)$$

$$A = r_0^* \frac{\varepsilon_N N}{N^2 - 1}, \quad \varepsilon_N = \frac{B_N^*}{\overline{B}^*}, \quad K_4 = \frac{c \hat{T}_0}{\hat{L}_0},$$

$$K_6 = 2E_0 E_k + E_k^2, \quad E = E_0 + E_k, \quad E_0 = m_0 c^2,$$

где σ_N — это коэффициент удлинения замкнутой равновесной орбиты [9]; B_N^* — амплитуда основной гармоники; φ_N^* — фаза основной гармоники; \overline{B}^* — среднее магнитное поле; N — периодичность магнитной структуры; E_k — кинетическая энергия ускоряемой частицы; m_0 — масса покоя ускоряемой частицы. Символ «*» означает безразмерность соответствующего параметра, а коэффициенты перехода к безразмерным величинам имеют следующие значения:

$$\hat{B}_0 = 1(T), \quad \hat{E}_0 = 1\left(\frac{V}{m}\right), \quad \hat{L}_0 = 1(m), \quad \hat{\varphi}_0 = 1(\text{рад}), \quad \hat{T}_0 = \frac{H}{2\pi F_{\text{rf}}}(s),$$

где H — это гармоническое число, а F_{rf} — частота ВЧ-генератора.

2. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Приведенные выше уравнения движения были решены численным способом — методом Рунге–Кутты с шагом $h = 1E-4$, в приближении замкнутых равновесных орбит (без учета электрического поля). Ускорение ионов производилось в медианной плоскости магнитного поля с возрастанием азимутального угла против часовой стрелки в соответствии с видом сверху. При этом бралась карта результирующего магнитного поля, полученная для основного режима работы АИЦ-144 расчетным путем. Модуль разности конечного и стартового значений радиуса замкнутой равновесной орбиты для всех орбит во всем диапазоне изохронизации магнитного поля (от радиуса конца центрального бампа $R_{\text{bump}} = 0,155$ м до радиуса начала краевого магнитного поля $R_{\text{edge}} = 0,595$ м) составил $\Delta < 9E-4$ м. Относительная ошибка среднего магнитного поля, рассчитываемая в

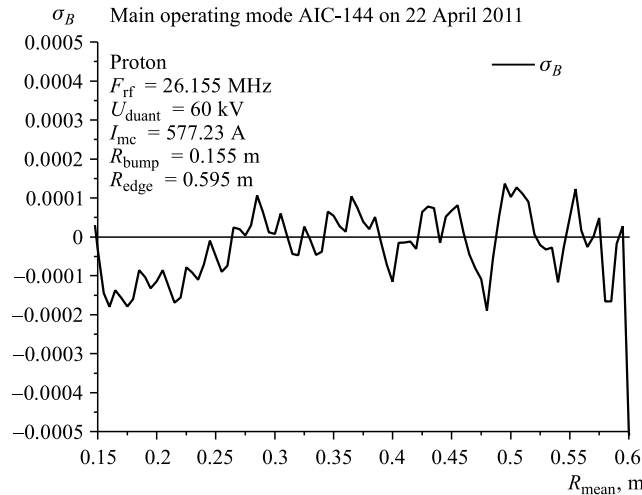


Рис. 1. Относительная ошибка среднего магнитного поля

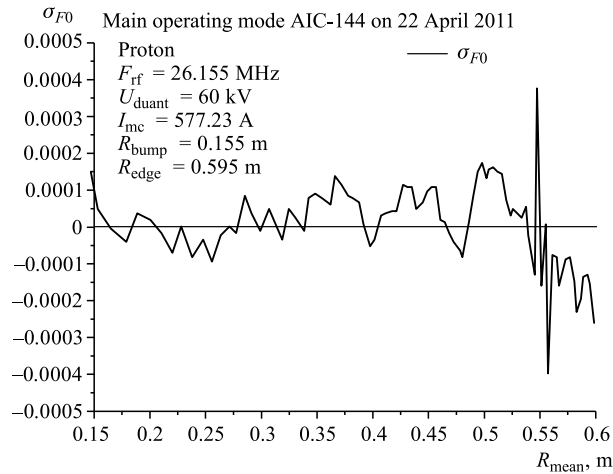


Рис. 2. Относительная ошибка частоты обращения ускоряемых ионов

диапазоне изохронизации магнитного поля как отношение разности между средним и изохронным к изохронному магнитному полю в зависимости от радиуса, представлена на рис. 1. Относительная ошибка частоты обращения ускоряемых ионов, рассчитываемая в том же диапазоне как отношение разности между рассчитанной и изохронной к изохронной частоте обращения ускоряемых ионов в зависимости от радиуса, представлена на рис. 2.

При сопоставлении двух кривых в области изохронизации магнитного поля видно хорошее соответствие между ними. Значительная величина амплитуды колебания относительной ошибки частоты обращения ускоряемых ионов, полученная на радиусе $R = 0,55$ м, скорее всего, связана с изменением азимутальной протяженности секторной спирали от $\varphi = 45^\circ$ до $\varphi = 54^\circ$ в области конечных радиусов ускорения с резким изломом на данном радиусе. В целом, во всей области изохронизации магнитного поля (за исключением радиуса $R = 0,55$ м) относительная ошибка среднего магнитного поля $\sigma_B \sim \pm 2E-4$ по своей величине соответствует относительной ошибке частоты обращения ускоряемых ионов $\sigma_{F0} \sim \pm 3E-4$, что соответствует точности измерения карт исходных магнитных полей $\sigma_{ms} \sim \pm 2E-4$, измеренных на АИЦ-144 в 2006 г. с помощью датчика Холла.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В период с февраля по апрель 2011 г. на АИЦ-144, запущенном в основном режиме работы в 2009 г. (протоны, кинетическая энергия вывода $E_k \sim 60$ МэВ, частота ВЧ-генератора $F_{rf} = 26,155$ МГц), была успешно проведена протонная терапия меланомы глаза первых девяти пациентов (письмо дирекции ИЯФ ПАН к дирекции ЛЯП ОИЯИ ВД/48/2011 от 27 апреля 2011 г.). Согласно требованиям, предъявленным подразделением протонной терапии ИЯФ ПАН к величине тока пучка выведенных протонов $I_{beam,extract.} = 20-40$ нА, максимальный ток пучка выведенных протонов в камере облучения пациентов составил $I_{beam,extract.,max} = 30$ нА. В апреле 2011 г. на АИЦ-144 была проведена оптимизация параметров магнитной системы ускорителя. Оптимиза-

ция была проведена на основе расчетов, выполненных с помощью Cyclotron Operator Help Program Complex 2011. При этом было установлено наличие чрезмерно большой по амплитуде величины первой гармоники на радиусе заброса пучка в трехсекционный электростатический дефлектор (на $R_{\text{ext}} = 0,62$ м) [5]. С целью увеличения коэффициента вывода и соответствующего увеличения тока пучка выведенных протонов как минимум до $I_{\text{beam,extract.,max}} = 100$ нА были даны рекомендации по устранению механических причин, приведших к появлению указанной первой гармоники. В результате в сентябре 2011 г. на АИЦ-144 были проведены измерения карт рабочего магнитного поля (от токов в главной, концентрических и двух парах гармонических катушек) и результирующего магнитного поля (от токов в главной и концентрических катушках). Анализ первой гармоники результирующего магнитного поля подтвердил расчеты, сделанные с помощью комплекса программ Cyclotron Operator Help Program Complex 2011 в апреле 2011 г. В итоге вакуумная камера была сдвинута на 0,4 мм в направлении резонатора и, затем, на 0,075 мм в направлении первой секции трехсекционного электростатического дефлектора. В результате величина амплитуды первой гармоники на радиусе заброса пучка в трехсекционный электростатический дефлектор $R_{\text{ext}} = 0,62$ м была уменьшена от $B_1 \approx 12$ Гс до $B_1 \approx 4$ Гс. Таким образом, были созданы условия для дальнейшего увеличения коэффициента вывода пучка ускоренных ионов. По результатам магнитных измерений был также установлен уход начала краевого магнитного поля с расчетного радиуса $R_{\text{edge}} = 0,595$ м к радиусу $R_{\text{edge}} = 0,545$ м. Ошибка среднего магнитного поля, рассчитанная на измеренной карте результирующего магнитного поля, составила $\delta_B = \pm 3,5$ Гс в диапазоне рабочих радиусов ускорения ионов от $R_{\text{bump}} = 0,155$ м до $R_{\text{edge}} = 0,545$ м. Поскольку соответствующие магнитные измерения с последующим расчетом средних магнитных полей вкладов концентрических катушек в основное магнитное поле проводились в 1998–1999 гг., а уход основного магнитного поля за последние двенадцать лет оказался очень значительным, были даны рекомендации по проведению измерений карт дополнительных магнитных полей для четырех наиболее удаленных от центра циклотрона концентрических катушек (No 17, No 18, No 19, No 20) на уровне тока в главной катушке $I_{\text{mc}} = 570$ А. Кроме того, были даны рекомендации по проведению соответствующих магнитных измерений в центре циклотрона. Эти магнитные измерения были проведены на АИЦ-144 в начале октября 2011 г. В результате для основного режима работы АИЦ-144 была сделана вторая расчетно-экспериментальная итерация без измерения конечного результирующего магнитного поля. При этом суммарная ошибка среднего магнитного поля, полученная как сумма ошибок среднего магнитного поля на заново рассчитанной и измеренной картах результирующих магнитных полей, составила $\delta_B = \pm 3,8$ Гс от начала диапазона коррекции ошибки среднего магнитного поля $R = 0,39$ м до начала краевого магнитного поля $R_{\text{edge}} = 0,59$ м. Рассчитанные параметры основного режима работы АИЦ-144 были переданы в Циклотронный отдел ИЯФ ПАН для установки на циклотроне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенного выше анализа видно, что изохронное магнитное поле для многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144, запущенного в основном режиме работы (протоны, кинетическая энергия вывода $E_k \sim 60$ МэВ, частота ВЧ-генератора $F_{\text{rf}} = 26,155$ МГц), было сформировано с достаточно хорошей точностью, соответ-

ствующей точности измерения карт исходных магнитных полей. В дальнейшем расчет динамики пучков ускоренных ионов может быть использован с целью уточнения расчета изохронных магнитных полей для циклотронов с большой азимутальной вариацией магнитного поля, где аналитические формулы М. М. Гордона уже не дают таких хороших результатов. Основным режим работы АИЦ-144 был смоделирован с помощью комплекса программ Cyclotron Operator Help Program Complex (2004–2011), установленного на сервере АИЦ-144. Ввиду жестких временных рамок, установленных дирекцией ИЯФ ПАН, этот режим работы был получен расчетным путем без проведения каких-либо дополнительных магнитных измерений, без проведения ряда расчетно-экспериментальных итераций, а также без эмпирической подстройки токов в концентрических катушках и без эмпирической подстройки частоты ВЧ-генератора. В период с февраля по апрель 2011 г. на АИЦ-144, запущенном в основном режиме работы в 2009 г., была успешно проведена протонная терапия меланомы глаза первых девяти пациентов (письмо дирекции ИЯФ ПАН к дирекции ЛЯП ОИЯИ ВД/48/2011 от 27 апреля 2011 г.).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 10-01-00467-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Амирханов И. В. и др.* Методика математического моделирования режимов работы многоцелевых изохронных циклотронов // Вестн. Тверского гос. ун-та. Сер. «Прикл. математика». 2010. № 9, вып. 1(16). С. 55–68.
2. *Амирханов И. В. и др.* Моделирование требуемых режимов работы и анализ их устойчивости для многоцелевых изохронных циклотронов // Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т. 6, № 6(155). С. 805–813.
3. *Амирханов И. В. и др.* Решение обратной задачи расчета токов в гармонических катушках многоцелевого изохронного циклотрона // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: Тез. докл. Всерос. конф. с междунар. участием, 18–22 апр. 2011 г. М.: РУДН, 2011. С. 253–255.
4. *Amirhanov I. V. et al.* Mathematical Aspects of Modeling of Required Operation Modes of Multi Purpose Isochronous Cyclotrons // Bull. of PFU of Russia. Ser. Math. Information Sci. Physics. 2010. No. 2(2). P. 99–103.
5. *Амирханов И. В. и др.* Оптимизация параметров магнитной системы многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144 // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 2(172). С. 235–246.
6. *Gordon M. M.* Calculation of Isochronous Fields for Sector-Focused Cyclotrons // Part. Accel. 1983. V. 13. P. 67–84.
7. *Басаргин Ю. Г., Белов В. П.* Вопросы динамики движения частиц в циклотроне с пространственной вариацией магнитного поля. Техн. отчет № 271-О. Гос. ком. по использованию атом. энергии СССР. НИИ электрофиз. аппаратуры им. Д. В. Ефремова. Отдел научно-техн. информации, 1963.
8. *Onischenko L. M., Samsonov E. V.* Code PHASCOL for Computation of Space Charge Effects in the Cyclotrons and SynchroCyclotrons // Вопр. атомной науки и техники. 2001. № 5. Сер. «Ядерно-физ. иссл.» (39). С. 163–165.
9. *Аносов В. Н. и др.* Исследование движения и коррекции фазы сгустка в изохронном циклотроне. Препринт ОИЯИ Р9-8496. Дубна, 1974.