

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ 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 работе описывается оптимизация параметров магнитной системы многоцелевого изохронного циклотрона, которая проводится с целью улучшения разделения двух последних орбит и увеличения коэффициента вывода пучков ионов. При этом регулируются как фаза центра банча ускоренных ионов на радиусе расположения электростатического дефлектора, так и амплитуда и фаза первой гармоники рабочего магнитного поля на радиусе заброса пучка в электростатический дефлектор. Регулировка осуществляется за счет изменения токов в концентрических и в двух парах гармонических катушек коррекции первой гармоники результирующего магнитного поля. Также рассматривается неоднородная система нелинейных алгебраических уравнений. Данная система позволяет по заданным значениям амплитуды и фазы первой гармоники рабочего магнитного поля при определенном значении радиуса решить обратную задачу расчета токов в двух парах гармонических катушек. В работе приводятся результаты физических экспериментов, выполненных в апреле 2011 г. на многоцелевом изохронном циклотроне АИЦ-144.

In this work the optimization of the magnetic system parameters of the multi-purpose isochronous cyclotron is described. The adjustment is carried out for the purpose of improvement of separation of two last orbits and increase in the factor of ion beam extraction. The phase of accelerated ion bunch center in the radius of arrangement of the electrostatic deflector is adjusted. The first harmonic amplitude and the first harmonic phase of the working magnetic field are also adjusted in the radius of throwing beam into the electrostatic deflector. The adjustment is carried out by changing currents in trim coils and two pairs of harmonious coils of correction of the first harmonic of the resulting magnetic field. In this article the nonuniform system of nonlinear algebraic equations is described. The system allows finding the solution of the inverse task of calculation of currents in two pairs of harmonic coils. The calculation is carried out with using preset values of amplitude and phase of the first harmonic taken in a certain radius of the working magnetic field. The results of physical experiments executed in April 2011 on the multi-purpose isochronous cyclotron AIC-144 are also given.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изохронные циклотроны находят применение как в области научных исследований, так и в области медицины. В данной работе рассматривается изохронный циклотрон АИЦ-144, расположенный в Институте ядерной физики Польской академии наук (ИЯФ ПАН) в Кракове. Основные параметры данного ускорителя приведены в табл. 1 (http://www.ifj.edu.pl/str/dc/pages/eng_index.html).

Таблица 1. Основные параметры АИЦ-144

Вес, т	140
Диаметр полюса магнита, см	144
Магнитная структура	4 сектора с углом спиральности от 45 до 54° (спиральные шиммы крепятся изнутри к верхней и нижней крышкам вакуумной камеры)
Магнитное поле, Тл	0,85–1,8
Ток главной катушки, А	0–650
Число концентрических катушек	20
Число гармонических катушек	4
Токи в концентрических и гармонических катушках, А	±400
Число дуантов	1 ($\alpha = 180^\circ$)
Частота ВЧ-генератора, МГц	10–27
Мощность ВЧ-генератора, кВт	120
Напряжение на дуантах, кВ	65
Система вывода пучков ионов на основе метода прецессии центра орбит	4 гармонических катушки, трех-секционный электростатический дефлектор, два пассивных и один активный магнитный канал
Источник ионов	Внутренний, РИГ
Давление в вакуумной камере, мбар	$6 \cdot 10^{-6}$

АИЦ-144 — многоцелевой изохронный циклотрон, что позволяет использовать его для ускорения частиц трех типов с различными отношениями числа стандартных единиц атомной массы к числу элементарных зарядов (A/Z). В табл. 2 приведены типы частиц, ускоряемых на АИЦ-144.

Таблица 2. Типы частиц, ускоряемых на АИЦ-144

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

АИЦ-144 разработан прежде всего с целью ускорения пучка протонов с кинетической энергией вывода $E_{\text{kin}} \sim 60$ МэВ, который в настоящее время применяется для протонной терапии меланомы глаза (основной режим работы циклотрона). АИЦ-144 также используется для производства различных видов радиоизотопов (http://www.ifj.edu.pl/str/dc/pages/eng_index.html).

Режим работы многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144 характеризуется в основном следующими параметрами: типом ускоряемых частиц, значением ускоряющего

напряжения на дуантах, значением частоты ВЧ-генератора, значениями токов в катушках ускорителя, радиусом расположения электростатического дефлектора.

В АИЦ-144 имеется три вида катушек:

- главная катушка, предназначенная для возбуждения главного магнита, формирующего основное магнитное поле $B_{\text{main}}(r, \theta)$;
- двадцать вложенных друг в друга концентрических катушек, предназначенных для формирования результирующего магнитного поля $B_{\text{res}}(r, \theta)$ как суммы основного магнитного поля $B_{\text{main}}(r, \theta)$ и вкладов от 20 концентрических катушек $B_{\text{add}, i}(r, \theta)$, $i = 1-20$;
- две пары гармонических катушек, предназначенных для коррекции первой гармоники результирующего магнитного поля $B_{\text{res}}(r, \theta)$, возникающей из-за неточностей сборки магнитной системы и установки вакуумной камеры.

Оптимизация параметров магнитной системы многоцелевого изохронного циклотрона проводится с целью улучшения разделения двух последних орбит и увеличения коэффициента вывода пучка ионов. Вначале регулируется фаза центра банча ускоренных протонов на радиусе расположения электростатического дефлектора (на входе в трехсекционный электростатический дефлектор). Указанная фаза отсчитывается от центра дуанта, когда ускоряющее напряжение на дуанте равно нулю, и начинает возрастать. Регулировка осуществляется за счет изменения тока во второй концентрической катушке, вклад от которой влияет на амплитуду центрального бампа. Регулировка фазы центра банча позволяет достичь лучшего разделения двух последних орбит. Затем оптимизируются амплитуда и фаза первой гармоники рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$, в котором и производится ускорение ионов. Оптимизация осуществляется за счет изменения токов в двух парах гармонических катушек коррекции первой гармоники результирующего магнитного поля $B_{\text{res}}(r, \theta)$. Корректировка первой гармоники производится с целью создания прецессии центров орбит ускоряемых ионов (когерентных колебаний ускоряемых ионов) на конечных радиусах ускорения. Это позволяет достичь как лучшего разделения двух последних орбит, так и нужного угла входа пучка ускоренных ионов в электростатический дефлектор. Гармонические катушки, входящие в первую пару, имеют номера: № 21 и № 23, во вторую — № 22 и № 24. В каждой паре гармонические катушки соединены таким образом, что когда одна из катушек дает положительный вклад в результирующее магнитное поле $B_{\text{res}}(r, \theta)$, то другая — отрицательный. При этом ток в катушке № 23 имеет то же самое абсолютное значение, что и ток в катушке с № 21, но взятое с противоположным знаком. Аналогично рассматриваются токи в катушках с номерами: № 24 и № 22. Далее, для удобства, будут указываться только те токи, которые задаются в гармонических катушках с номерами: № 21 и № 22. При этом индексация токов будет соответствовать индексации указанных гармонических катушек.

Методика математического моделирования новых режимов работы многоцелевых изохронных циклотронов с описанием математической модели, предназначенной для расчета токов в основной и концентрических катушках, приведена авторами в работе [1]. Алгоритм улучшения устойчивости решений, получаемых при моделировании новых режимов работы, описан авторами в работе [2]. Описание комплекса программ Cyclotron Operator Help Program Complex (2004–2011), установленного на сервере АИЦ-144, приведено в [3]. Алгоритм оптимизации амплитуды и фазы первой гармоники рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$ представлен в [4].

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТОКОВ В ДВУХ ПАРАХ ГАРМОНИЧЕСКИХ КАТУШЕК

Для расчета токов в двух парах гармонических катушек при определенном уровне тока в главной катушке авторами выполнен гармонический анализ рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$:

$$B_{\text{work}}(r, \theta) = B_{\text{res}}(r, \theta) + \sum_{k=21}^{22} (B_{k,\text{max}}(r, \theta) I_k^*), \quad I_k^* = \frac{I_k}{I_{k,\text{max}}}, \quad I_{k,\text{max}} > 0, \quad (1)$$

здесь $B_{\text{res}}(r, \theta)$ — это результирующее магнитное поле; $I_k(I_{k,\text{max}})$ — ток (максимальный ток) в соответствующей паре гармонических катушек; $B_{k,\text{max}}(r, \theta)$ — максимальный вклад в результирующее магнитное поле $B_{\text{res}}(r, \theta)$ от соответствующей пары гармонических катушек, в которой задан максимальный ток $I_{k,\text{max}}$. Разложение в ряд Фурье рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$ представляется следующим образом:

$$B_{\text{work}}(r, \theta) = \overline{B}(r) + \sum [H_n(r) \cos(\theta n) + G_n(r) \sin(\theta n)], \quad (2)$$

$$B_{\text{work}}(r, \theta) = \overline{B}^n(r) + \sum_n [B_n(r) \cos(n(\theta - \varphi_n(r)))], \quad (3)$$

$$H_n(r) = \frac{B_0}{\pi} \int_{\frac{\theta_0}{2\pi+\theta_0}}^{2\pi+\theta_0} [B_{\text{work}}^*(r, \theta) \cos(\theta n)] d\theta, \quad (4)$$

$$G_n(r) = \frac{B_0}{\pi} \int_{\theta_0}^{\theta_0} [B_{\text{work}}^*(r, \theta) \sin(\theta n)] d\theta,$$

$$B_{\text{work}}^*(r, \theta) = \frac{B_{\text{work}}(r, \theta)}{B_0}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (5)$$

После подстановки (1) в (5) выражение для рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}^*(r, \theta)$ в безразмерном виде выглядит так:

$$B_{\text{work}}^*(r, \theta) = B_{\text{res}}^*(r, \theta) + \sum_{k=21}^{22} (B_{k,\text{max}}^*(r, \theta) I_k^*), \quad (6)$$

$$B_{\text{res}}^*(r, \theta) = \frac{B_{\text{res}}(r, \theta)}{B_0}, \quad B_{k,\text{max}}^*(r, \theta) = \frac{B_{k,\text{max}}(r, \theta)}{B_0}, \quad n = 1, 2, \dots$$

В формулах (1)–(6) $\overline{B}(r)$ — это среднее магнитное поле; $H_n(r)$, $G_n(r)$ — коэффициенты Фурье для n -й гармоники; $B_n(r)$, $\varphi_n(r)$ — амплитуда и фаза n -й гармоники; B_0 — коэффициент для приведения значений магнитного поля к безразмерному виду; θ_0 — стартовый азимутальный угол начала измерений карт магнитных полей. Сопоставляя выражения (2) и (3), коэффициенты Фурье можно записать в следующем виде:

$$H_n(r) = B_0 B_n^*(r) \cos(\varphi_n(r) n),$$

$$G_n(r) = B_0 B_n^*(r) \sin(\varphi_n(r) n), \quad (7)$$

$$B_n^*(r) = \frac{B_n(r)}{B_0}, \quad n = 1, 2, \dots$$

После подстановки (6) в правые части уравнений (4) и приравнивания друг другу соответствующих правых частей формул (4) и (7) получается неоднородная система нелинейных алгебраических уравнений, которая рассматривается для значения $n = 1$:

$$\|a_{i,j}(r)\| \cdot \|I_k^*\| = \|b_i(r, I_k^*)\|, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} a_{1,1}(r) &= \int_{\theta_0}^{2\pi+\theta_0} [B_{21,\max}^*(r, \theta) \cos(\theta \cdot n)] d\theta, & a_{1,2}(r) &= \int_{\theta_0}^{2\pi+\theta_0} [B_{22,\max}^*(r, \theta) \cos(\theta \cdot n)] d\theta, \\ a_{2,1}(r) &= \int_{\theta_0}^{2\pi+\theta_0} [B_{21,\max}^*(r, \theta) \sin(\theta \cdot n)] d\theta, & a_{2,2}(r) &= \int_{\theta_0}^{2\pi+\theta_0} [B_{22,\max}^*(r, \theta) \sin(\theta \cdot n)] d\theta, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} b_1(r, I_k^*) &= \pi B_n^*(r, I_k^*) \cos(\varphi_n(r, I_k^*) n) - \int_{\theta_0}^{2\pi+\theta_0} [B_{\text{res}}^*(r, \theta) \cos(\theta \cdot n)] d\theta, \\ b_2(r, I_k^*) &= \pi B_n^*(r, I_k^*) \sin(\varphi_n(r, I_k^*) n) - \int_{\theta_0}^{2\pi+\theta_0} [B_{\text{res}}^*(r, \theta) \sin(\theta \cdot n)] d\theta, \end{aligned} \quad (10)$$

$$i, j = 1, 2, \quad k = 21, 22, \quad n = 1.$$

Интегрирование подынтегральных выражений (9) и (10) по азимутальному углу выполняется с помощью квадратурных формул Симпсона. При фиксированных значениях амплитуды и фазы первой гармоники неоднородная система нелинейных алгебраических уравнений (8)–(10) превращается в неоднородную систему линейных алгебраических уравнений. При этом элементы матрицы коэффициентов (9) и вектора свободных членов (10) $a_{i,j}, b_i, i, j = 1, 2$, находятся при определенном значении радиуса. Алгоритм оптимизации амплитуды и фазы первой гармоники рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$ на основе использования решений неоднородной системы нелинейных алгебраических уравнений (8)–(10) представлен в [4].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В июне 2009 г. для многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144 проведено моделирование основного режима его работы (исходные данные: протоны, частота ВЧ-генератора $F_{\text{rf}} = 26,155$ МГц, напряжение на дуантах $U_{\text{duant}} = 56$ кВ, радиус расположения электростатического дефлектора $R_{\text{def}} = 63,5$ см). Моделирование осуществлено с помощью комплекса программ Cyclotron Operator HELP 2009, разработанного на языке C++ с использованием MS Visual C++ .NET. Результаты запуска и эксплуатации АИЦ-144 в основном режиме работы представлены в [1]. По результатам ряда физических экспериментов, проведенных 04.06.2009 г., рассчитаны как коэффициент заброса и прохождения пучка ускоренных ионов через трехсекционный электростатический дефлектор, так и коэффициент вывода пучка из ускорителя:

1) коэффициент заброса и прохождения — отношение тока внутреннего пучка на радиусе конца плато его значений ($I_{\text{beam, internal}} = 120$ нА на радиусе $R = 62$ см для $R_{\text{def}} = 63,5$ см) к току выведенного пучка за трехсекционным электростатическим дефлектором;

2) коэффициент вывода — отношение тока внутреннего пучка на радиусе конца плато его значений ($I_{\text{beam, internal}} = 120$ нА на радиусе $R = 62$ см для $R_{\text{def}} = 63,5$ см) к току выведенного пучка за первым корректирующим магнитом ионопровода.

Расчеты производились при значении тока в главной катушке $I_{\text{main coil}} = 576,14$ А, когда выведенный пучок имел форму правильного круга в своем поперечном сечении. При этом коэффициент заброса и прохождения составил $K_{\text{pas}} = 2,5\%$, а коэффициент вывода — $K_{\text{ext}} = 2,4\%$. При значении тока в главной катушке $I_{\text{main coil}} = 576,3$ А ток выведенного пучка имел наибольшее значение. При этом коэффициент вывода составил $K_{\text{ext}} = 2,8\%$. В дальнейшем расчет коэффициента вывода всегда производился для наибольшего значения тока выведенного пучка с учетом регулировки тока в главной катушке.

За два года эксплуатации АИЦ-144 в указанном режиме, с целью улучшения разделения двух последних орбит ускоряемых ионов, условия работы циклотрона были изменены следующим образом:

- напряжение на дуантах увеличено с $U_{\text{duant}} = 56$ кВ до $U_{\text{duant}} = 60$ кВ;
- электростатический дефлектор перенесен с радиуса $R_{\text{def}} = 63,5$ см на радиус $R_{\text{def}} = 62,8$ см;
- токи в гармонических катушках изменены для I_{21} с -119 до -150 ; для I_{22} с 373 А до 390 А.

В период с февраля по апрель 2011 г. на АИЦ-144, запущенном в основном режиме работы в 2009 г., успешно проведена протонная терапия меланомы глаза первых девяти пациентов. При максимальном токе пучка из источника ионов максимальный ток пучка выведенных протонов в камере облучения пациентов составил $I_{\text{beam, extr. largest}} = 30$ нА. С целью улучшения надежности работы циклотрона перед циклотронным отделом Циклотронного центра в Броневице дирекцией ИЯФ ПАН была поставлена задача увеличения коэффициента вывода пучка ускоренных ионов (увеличения максимального тока пучка выведенных протонов до $I_{\text{beam, extr. largest}} = 100$ нА). В связи с этим в конце апреля 2011 г. на АИЦ-144 проведен ряд физических экспериментов, связанных с регулировкой фазы центра банча ускоренных протонов на радиусе расположения электростатического дефлектора, с последующей оптимизацией амплитуды и фазы первой гармоники рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$.

В табл. 3 представлены значения токов в главной и концентрических катушках, рассчитанные в 2009 г. с помощью комплекса программ Cyclotron Operator HELP 2009 для основного режима работы АИЦ-144. В этой же таблице приведены токи в двух парах гармонических катушек, значения которых рассчитаны с помощью комплекса программ Cyclotron Operator HELP 2011. Новая версия комплекса программ позволяет формировать не только среднее магнитное поле в зависимости от радиуса, но и рассчитывать токи в двух парах гармонических катушек по заданным значениям амплитуды и фазы первой гармоники рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$, взятым для определенного радиуса. Установленные значения: ток в главной катушке $I_{\text{main coil}} = (577 \pm 1)$ А, токи в двух парах гармонических катушек $I_{21} = -117$ А, $I_{22} = 364$ А.

Таблица 3. Токи в концентрических катушках АИЦ-144 (2009 г.)

Концентрическая катушка	$I_{\text{trim coil}}$, А	Концентрическая катушка	$I_{\text{trim coil}}$, А	Концентрическая катушка	$I_{\text{trim coil}}$, А
1	0	8	27	15	-358
2	335	9	-87	16	-388
3	0	10	-154	17	0
4	0	11	-243	18	-265
5	154	12	-203	19	-116
6	0	13	-133	20	0
7	92	14	-126		

Токи в гармонических катушках определяют следующие значения амплитуды и фазы первой гармоники рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$, рассчитанные на радиусе заброса пучка в электростатический дефлектор $R_{\text{ext}} = 0,62$ м: $B_1 = 18,2$ Гс; $\Phi_1 = 133^\circ$.

Фаза центра банча ускоренных протонов на радиусе расположения септума электростатического дефлектора была улучшена за счет регулировки амплитуды центрального бампа рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$. При малом токе пучка из источника ионов для каждого значения тока во второй концентрической катушке, при соответствующей подстройке тока в главной катушке, определялся наибольший ток пучка выведенных протонов. Ток пучка выведенных протонов измерялся за циклотроном, внутри ионопровода, после прохождения пучком двух корректирующих магнитов и двух квадруполей. Регулировка производилась с целью приблизить сдвиг фазы центра банча ускоренных протонов, берущийся на радиусе расположения септума электростатического дефлектора $R_{\text{def}} = 0,628$ м, к значению $\Delta\varphi_p = 0^\circ$. При выполнении указанного условия и определенных значениях амплитуды и фазы первой гармоники рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$ достигается наилучшее разделение двух последних орбит. При этом создаются наилучшие условия для заброса пучка ускоренных ионов в электростатический дефлектор. На рис. 1 показана зависимость наибольшего тока пучка выведенных протонов от тока во второй концентрической катушке.

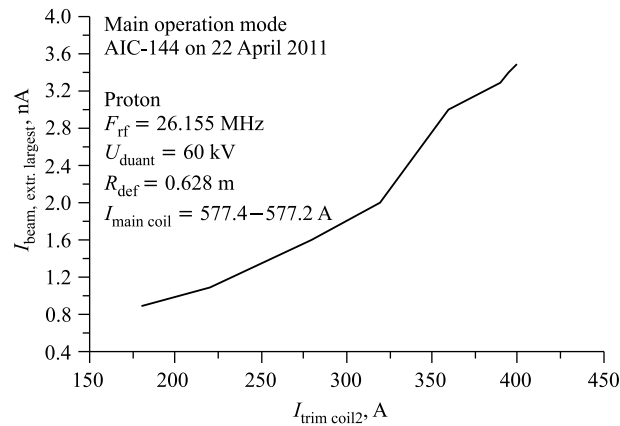


Рис. 1. Наибольший ток пучка выведенных протонов в зависимости от тока во второй концентрической катушке

Ток во второй концентрической катушке ограничен максимальным значением тока соответствующего источника питания — 400 А. Для последующей оптимизации амплитуды и фазы первой гармоники рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$ выбрано следующее значение тока во второй концентрической катушке: $I_{\text{trim coil}2} = 395$ А. В табл. 4 представлены значения амплитуды и фазы первой гармоники, заданные на радиусе заброса пучка в электростатический дефлектор $R_{\text{ext}} = 0,62$ м, а также соответствующие им значения токов в двух парах гармонических катушек, рассчитанные с помощью комплекса программ Cyclotron Operator HELP 2011. В таблице также приведены наибольшие измеренные значения тока пучка выведенных протонов, полученные при соответствующей подстройке тока в главной катушке.

Таблица 4. Зависимость тока выведенного пучка от расчетных значений амплитуды и фазы первой гармоники

Номер измерения	B_1 , Гс (62 см)	Φ_1 , ° (62 см)	$I_{\text{HC}21}$, А	$I_{\text{HC}22}$, А	$I_{\text{beam extr.largest}}$, нА	$I_{\text{main coil}}$, А
1	17	139	-146	332	2,2	577,2
2	19	139	-157	366	3,4	577,2
3	20	139	-163	383	2,4	577,3
4	18,5	139	-154	357	3,6	577,3
5	18,5	138	-149	359	3,6	577,2
6	18,5	136	-137	364	3,1	577,2
7	18,5	141	-166	352	3,1	577,2
Оптимальный вариант	18,5	139	-154	357	3,6	577,3

Точность расчета токов в двух парах гармонических катушек зависит от выбранных диапазонов и шагов по амплитуде и фазе первой гармоники рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$ и находится в пределах точности установки полученных значений на источниках питания: $\delta_I = \pm 1$ А. Исходя из результатов ряда физических экспериментов были определены оптимальные значения шагов по амплитуде и фазе первой гармоники, которые использованы в последующих расчетах. Эти значения составили: $H_{B1, \text{opt}} = 0,1$ Гс; $H_{\Phi1, \text{opt}} = 0,5^\circ$.

После проведенных операций основной режим работы АИЦ-144 был заново смоделирован с помощью комплекса программ Cyclotron Operator HELP 2011. При этом расчетное значение тока во второй концентрической катушке составило $I_{\text{trim coil}2} = 390$ А.

Таблица 5. Токи в концентрических катушках АИЦ-144 (2011 г.)

Концентрическая катушка	$I_{\text{trim coil}}$, А	Концентрическая катушка	$I_{\text{trim coil}}$, А	Концентрическая катушка	$I_{\text{trim coil}}$, А
1	0	8	28	15	-357
2	390	9	-87	16	-388
3	0	10	-154	17	0
4	0	11	-243	18	-268
5	152	12	-204	19	-111
6	0	13	-132	20	0
7	93	14	-127		

Затем оптимизация амплитуды и фазы первой гармоники рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$ была проделана заново. В табл. 5 представлены полученные значения токов в главной, концентрических и в двух парах гармонических катушек. Установленные значения: ток в главной катушке $I_{\text{main coil}} = (577 \pm 1)$ А, токи в двух парах гармонических катушек $I_{21} = -170$ А, $I_{22} = 343$ А.

Указанные значения токов в двух парах гармонических катушек соответствуют следующим значениям амплитуды и фазы первой гармоники рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$, рассчитанным на радиусе заброса пучка в электростатический дефлектор $R_{\text{ext}} = 0,62$ м: $B_1 = 18,1$ Гс; $\Phi_1 = 142^\circ$. Все расчеты сделаны на основе последних имеющихся в наличии карт магнитных полей, измеренных в 2006 г. С учетом результатов расчетов динамики пучка протонов, выполненных в НЭОНУ ЛЯП ОИЯИ в 2007 г. для похожего основного режима работы АИЦ-144 [5], амплитуда и фаза первой гармоники рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$, рассчитанные на радиусе заброса пучка в электростатический дефлектор $R_{\text{ext}} = 0,62$ м, должны быть порядка $B_1 \sim 2$ Гс; $\Phi_1 \sim 200^\circ$. Разница между двумя указанными значениями амплитуды первой гармоники без учета значения фазы первой гармоники составляет $\Delta B_1 \approx 16$ Гс. Столь значительная разница указывает, скорее всего, на сдвиг вакуумной камеры, который должен быть устранен. Полученный основной режим работы АИЦ-144 был установлен на циклотроне. В итоге пучок протонов успешно ускорен и выведен из АИЦ-144. На рис. 2 и 3 представлен ток внутреннего пучка ускоряемых протонов в зависимости от радиуса и ток пучка выведенных ионов после трехсекционного электростатического дефлектора.

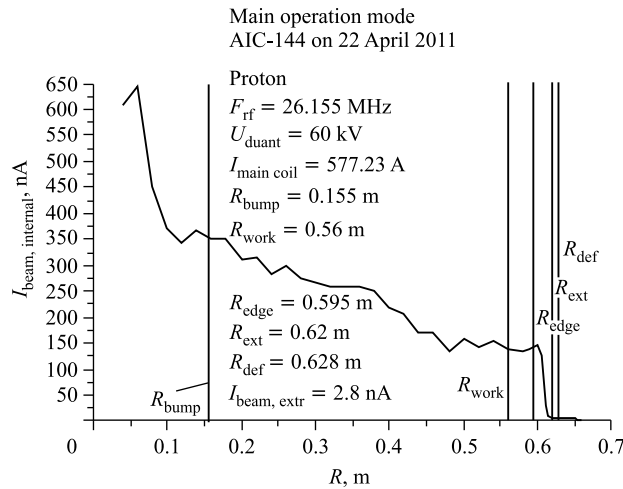


Рис. 2. Ток внутреннего пучка ускоряемых ионов в зависимости от радиуса. F_{rf} — частота ВЧ-генератора; U_{duant} — напряжение на дуантах; $I_{\text{main coil}}$ — ток в главной катушке; R_{bump} — радиус конца центрального бампа; R_{work} — радиус рабочей точки (радиус пересечения среднего основного $\bar{B}_{\text{main}}(r)$ и изохронного $\bar{B}_{\text{is}}(r)$ магнитных полей, взятый в области конечных радиусов ускорения и определяющий значение тока в главной катушке); R_{edge} — радиус начала краевого магнитного поля; R_{ext} — радиус заброса пучка в трехсекционный электростатический дефлектор; R_{def} — радиус расположения септума трехсекционного электростатического дефлектора; $I_{\text{beam, extr}}$ — ток выведенного пучка

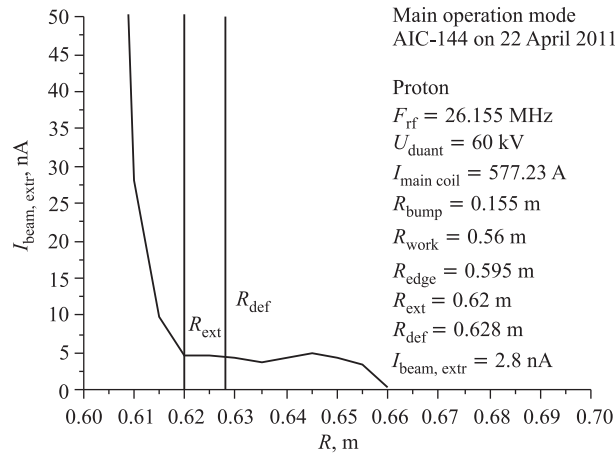


Рис. 3. Ток пучка выведенных ионов после трехсекционного электростатического дефлектора в зависимости от радиуса (см. полную зависимость на рис. 2). Обозначения приведены в подписи к рис. 2

По результатам ряда физических экспериментов, проведенных 22.04.2011, рассчитаны как коэффициент заброса и прохождения пучка ускоренных ионов через трехсекционный электростатический дефлектор, так и коэффициент вывода пучка из ускорителя:

1) коэффициент заброса и прохождения — отношение тока внутреннего пучка на радиусе конца плато его значений ($I_{\text{beam, internal}} = 146$ нА на радиусе $R = 60$ см для $R_{\text{def}} = 62,8$ см) к току выведенного пучка за трехсекционным электростатическим дефлектором;

2) коэффициент вывода — отношение тока внутреннего пучка на радиусе конца плато его значений ($I_{\text{beam, internal}} = 146$ нА на радиусе $R = 60$ см для $R_{\text{def}} = 62,8$ см) к току выведенного пучка за двумя корректирующими магнитами и двумя квадрупольями ионопровода.

Протонная терапия первых девяти пациентов прошла при значении коэффициента заброса и прохождения пучка ускоренных ионов через трехсекционный электростатический дефлектор $K_{\text{pas}} < 2\%$. Из приведенных выше результатов физических экспериментов коэффициент заброса и прохождения пучка ускоренных ионов через трехсекционный электростатический дефлектор составил $K_{\text{pas}} = 3,4\%$, а коэффициент вывода пучка из ускорителя изменился в течение одной рабочей смены от $K_{\text{ext}} = 3,3\%$ до $K_{\text{ext}} = 1,9\%$. Потери тока пучка выведенных протонов от трехсекционного электростатического дефлектора до указанного выше места его измерения в ионопроводе в конце рабочей смены составили $\sigma I_{\text{beam, extr, losses}} \approx 43\%$, что говорит о необходимости настройки элементов тракта пучков выведенных ионов.

На завершающем этапе настройки параметров магнитной системы АИЦ-144 на выходе из циклотрона по семи точкам был измерен ток пучка выведенных протонов в зависимости от тока в главной катушке. Результаты измерений, проводившихся в указанном выше месте ионопровода, представлены на рис. 4.

Таким образом, после проведенной оптимизации при изменении тока пучка выведенных протонов от 90 % до 90 % от его наибольшего значения $I_{\text{beam, extr, largest}} = 2$ нА,

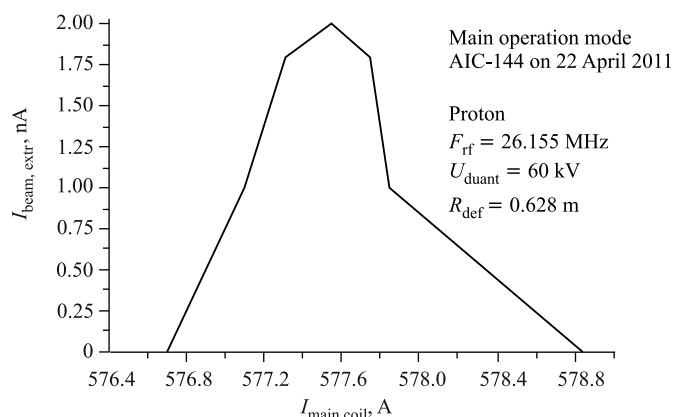


Рис. 4. Ток пучка выведенных протонов в зависимости от тока в главной катушке

установленного за счет регулировки источника ионов, диапазон изменения тока в главной катушке составил $\Delta I_{main\ coil} = 0,44$ А, что говорит о хорошей стабильности основного режима работы АИЦ-144.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной режим работы многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144 предназначен для ускорения пучка протонов с кинетической энергией вывода $E_{kin} \sim 60$ МэВ, применяющегося в настоящее время для протонной терапии меланомы глаза пациентов. АИЦ-144 также используется для производства различных видов радиоизотопов (http://www.ifj.edu.pl/str/dc/pages/eng_index.html). Благодаря точности расчетов, сделанных с помощью комплекса программ Cyclotron Operator HELP 2009, основной режим работы АИЦ-144 получен без проведения каких-либо дополнительных магнитных измерений, приводящих к остановке, разборке циклотрона и потерям рабочего времени. Этот режим был успешно запущен на циклотроне в 2009 г. без эмпирической подстройки токов в концентрических катушках и без коррекции частоты ВЧ-генератора. Ввиду жестких временных рамок, установленных дирекцией ИЯФ ПАН, расчетно-экспериментальные итерации для основного режима работы АИЦ-144 не проводились. При этом ток пучка выведенных протонов был измерен за первым корректирующим магнитом ионопровода. В период с февраля по апрель 2011 г. на АИЦ-144 успешно проведена протонная терапия меланомы глаза первых девяти пациентов (письмо дирекции ИЯФ ПАН к дирекции ЛЯП ОИЯИ от 27 апреля 2011 г. ВД/48/2011). После проведения протонной терапии оптимизирован основной режим работы АИЦ-144. При этом значение коэффициента вывода пучка ускоренных ионов увеличено по сравнению с величиной, имевшей место при проведении протонной терапии, в среднем в $K = 2,2$ раза. Поскольку вакуумная камера содержит магнитные элементы (спиральные шиммы, которые крепятся внутри вакуумной камеры), ее положение относительно центральной оси, проходящей через полюса главного магнита, влияет на величину первой гармоники рабочего магнитного поля $B_{work}(r, \theta)$. Очевидно, с целью значительного увеличения коэффициента вывода необходимо установить вакуумную камеру в такое положение, при котором амплитуда первой гармоники B_1 не будет превышать (3 ± 1) Гс на радиусе заброса пучка ускоренных ионов

в электростатический дефлектор $R_{\text{ext}} = 0,62$ м. После фиксации вакуумной камеры в выбранном положении необходимо измерить карты основных магнитных полей при трех уровнях тока в главной катушке $I_{\text{main coil}} = 570; 585; 600$ А (токи в концентрических и в двух парах гармонических катушек равны нулю), а также карты дополнительных магнитных полей при уровне тока в главной катушке $I_{\text{main coil}} = 570$ А (токи в берущихся по очереди концентрических и в двух парах гармонических катушек имеют максимальные значения). Кроме того, с целью первичной калибровки средних магнитных полей вкладов концентрических катушек в основное магнитное поле $B_{\text{main}}(r, \theta)$ необходимо провести соответствующие магнитные измерения в центре циклотрона в течение одного сеанса работы ускорителя. Первичная калибровка средних магнитных полей вкладов требуется для того, чтобы устранить влияние остаточной намагниченности железа главного магнита на результаты измерений карт дополнительных магнитных полей, проводящихся в течение ряда сеансов работы ускорителя. Затем необходимо пересчитать исходные данные. С целью увеличения кинетической энергии протонов в камере облучения пациентов на $\Delta E_{\text{kin}} \approx 0,5$ МэВ основной режим работы АИЦ-144 должен быть рассчитан для частоты ВЧ-генератора $F_{\text{rf}} = 26,25$ МГц [2]. Для уменьшения фазовых потерь протонов в области изохронизации магнитного поля необходимо провести одну расчетно-экспериментальную итерацию, которая включает в себя следующие операции: расчет основного режима работы для выбранной частоты ВЧ-генератора; измерение карты рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$; пересчет основного режима работы АИЦ-144; запуск полученного режима работы на циклотроне; проведение регулировки фазы центра банча ускоренных протонов на входе в электростатический дефлектор с последующей оптимизацией амплитуды и фазы первой гармоники рабочего магнитного поля $B_{\text{work}}(r, \theta)$.

В итоге принятые меры должны привести к уменьшению фазовых потерь протонов в области рабочих радиусов ускорения и увеличению коэффициента вывода пучка ускоренных ионов из многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144.

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. Тверск. 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. 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. Inform. Sci. Physics. 2010. No. 2 (2). P. 99–103.
4. 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.: Рос. ун-т дружбы народов, 2011. С. 253–255.
5. Самсонов Е. В. Расчет динамики пучка протонов в магнитном поле карты 26p25Ms циклотрона АИЦ-144. Внутренний отчет. Краков, 2007. С. 1–7.

Получено 15 июня 2011 г.