

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

A - 484

9 - 10627

АЛЕНИЦКИЙ
Юрий Григорьевич

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ
ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА У-120М
С ГЛУБОКОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ ЭНЕРГИИ

Специальность 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1977

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук

Н.Л. Заплатин.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук И.А. Шелаев,

кандидат физико-математических наук А.В. Степанов.

Будущее научно-исследовательское учреждение:

Институт ядерных исследований АН УССР, Киев.

Автореферат разослан " " _____ 1977 года.

Защита диссертации состоится " " _____ 1977 года

в " " часов на заседании Специализированного совета Д-047.0103 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований по адресу: г. Дубна, Московской области, Объединенный институт ядерных исследований.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь

Специализированного совета

кандидат физ.-матем. наук

Ю.А. Батусов

Реферлируемая диссертация посвящена вопросам разработки и создания магнитной системы изохронного циклотрона У-120М. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения.

В первой главе приводится краткий обзор теории движения заряженных частиц в ускорителях со стационарным периодическим магнитным полем, которое в плоскости симметрии можно описать функцией:

$$H_z(z, \varphi) = \bar{H}(z) \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon_{Nk} \sin(\alpha_{Nk}(z) - kN\varphi) \right], \quad (1)$$

где N – периодичность структуры, $\bar{H}(z)$ – среднее поле, ε_{Nk} – амплитуда и фаза Nk -ой гармоники магнитного поля.

В изохронном циклотроне, по определению, частота ускоряющего напряжения $\omega_s = \text{const}$. Частицы в процессе ускорения находятся в безразличном равновесии относительно фазы максимума напряжения высокочастотного поля, которая полностью определяется средним магнитным полем на орбите ускоряемой частицы. Требуемый закон изохронного среднего магнитного поля выражается формулой:

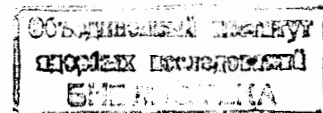
$$\bar{H}(z) = \frac{H_0(1 + \sigma)}{\sqrt{1 - \left[\frac{z}{z_{\infty}}(1 + \sigma) \right]^2}}, \quad (2)$$

где $z_{\infty} = E_0/cH_0$; E_0 – энергия покоя частицы, H_0 – величина магнитного поля в центре ускорителя.

Коэффициент $\sigma(z)$, учитывающий удлинение орбиты за счет волнообразности и изменение её длины, пропорциональное производной амплитуды основной гармоники поля по радиусу, можно представить в виде:

$$\sigma(z) = - \frac{\varepsilon_N^2(z)}{2(N^2 - 1 - n)(1 + n)} \left[2 - \frac{N^2}{2(N^2 - 1 - n)} + n + z \frac{\varepsilon_N'(z)}{\varepsilon_N(z)} \right] + \frac{\varepsilon_N^2(z) N^2}{4(N^2 - 1 - n)^2}, \quad (3)$$

где $n = \frac{z}{H} \frac{dH}{dz}$, $\varepsilon_N(z) = \frac{H_N(z)}{H(z)}$.



Точность сформированного среднего магнитного поля характеризуется фазовым сдвигом пучка, который для У-120М ограничен величиной $|\Delta\psi| < 5^\circ$. Расчет фазового сдвига пучка проводился по формуле:

$$\sin\psi(z) - \sin\psi_0 = -\frac{25E_0}{\Delta W \sin\frac{\psi}{2} H_0 z^2} \int_0^z \Delta H(z) [1 + \sigma(z) + z\sigma'(z)] z dz, \quad (4)$$

где: ΔW - набор энергии частицей за оборот, ψ - азимутальная протяженность дуанта (для У-120М $\psi = 180^\circ$).

Расчет частот свободных колебаний для анализа сформированного магнитного поля на У-120М выполнялся по формулам:

$$Q_x^2(z) = -n + \frac{\epsilon_N^2 N^2}{2(N^2 - 1 - n)} + \frac{2\epsilon_{2N}^2 N^2}{4N^2 - 1 - n} + \frac{\epsilon_N^2 z^2 \alpha_N'^2}{2(N^2 - 1 - n)} +$$

$$+ \frac{\epsilon_{2N}^2 z^2 \alpha_{2N}'^2}{2(4N^2 - 1 - n)} + \frac{\epsilon_N^2 z^2 \alpha'^2}{2N^2} + \frac{\epsilon_{2N}^2 z^2 \alpha_{2N}'^2}{8N^2} +$$

$$+ \frac{(\epsilon_N z)^2}{2N^2} - \frac{\epsilon_N \epsilon_N' z}{(N^2 - 1 - n)(1+n)} (1+n+n^2-d) - \frac{\epsilon_N \epsilon_N' z^2}{2(N^2 - 1 - n)}, \quad (5)$$

$$Q_z^2(z) = (1+n) \left[1 + \frac{3}{2N^2} (\epsilon_N z \alpha_N')^2 \right] + \frac{\epsilon_N^2}{2(N^2 - 4 - 4n)} \times$$

$$\times \left[2 - \frac{N^2}{2(N^2 - 1 - n)} + z \frac{\epsilon_N}{\epsilon_N'} + n \right]^2 + \frac{0.7\epsilon_N^2}{N^2 - 1 - n} + \frac{(\epsilon_N z)^2}{2N^2} + \frac{\epsilon_N \epsilon_N' z^2}{2(N^2 - 1 - n)} \quad (6)$$

$$d = \frac{1}{2} \frac{z^2}{H} \frac{d^2 H}{dz^2}, \quad \alpha' = \frac{d\alpha}{dz}.$$

На основании анализа различных типов магнитных систем изохронных циклотронов показано, что для целей ядерной физики, медицины, техники и др., где требуется интенсивность пучка ускоренных частиц ~ 50 МкА и энергия ускоренных протонов ~ 100 МэВ,

наиболее эффективны циклотроны с Ш - образным электромагнитом.

Выбор параметров элементов магнитной системы и моделирование магнитного поля изохронного циклотрона У-120М описывается во второй главе [2,3].

Заданное магнитное поле формируется в зазоре электромагнита с диаметром полжсов $\phi = 120$ см системой спиральных и секторных шимм, размещенных симметрично относительно медианной плоскости на стальных крышках вакуумной камеры и сдвинутых по углу друг относительно друга на 90° , а также токовыми концентрическими и гармоническими обмотками (рис.1,2). Основные параметры циклотрона У-120М приведены в таблице.

Отличительной чертой изохронного циклотрона У-120М является то, что система спиральных шимм выполняется крутоспиральной. Использование такой структуры магнитного поля позволило исключить необходимость применения обмоток регулировки основной гармоники магнитного поля. В этом случае максимальное значение энергии $E_p = 40$ МэВ ограничено предельно достижимым уровнем среднего магнитного поля на рабочем радиусе. Нижняя граница регулирования энергии ускоренных протонов составляет $E_p = 12,5$ МэВ и обусловлена тем, что частота аксиальных колебаний в области конечных радиусов приближается к значению параметрического резонанса $Q_x = 0,5$, при этом уровень среднего магнитного поля в зазоре составляет ~ 9 кГс.

Предварительно конфигурация спиральных шимм выбиралась расчетным способом, на основе аналитических формул расчета магнитного поля от ферромагнитных элементов в предположении их равномерного намагничивания. Из расчетов следует, что: а) на малых радиусах $\Delta r = (8-12)$ см для обеспечения вертикальной фокусировки зазор между спиральными шиммами выполняется минимальным, компенсация среднего магнитного поля достигается варьированием высоты спиральных шимм; б) в диапазоне средних радиусов $\Delta r = (30-54)$ см зазор между спиральными шиммами увеличен до $2h_1 = 11,2$ см, при сохранении аксиальной фокусировки. Такая конфигурация шимм также позволила в интервале радиусов $\Delta r = (26-54)$ см разместить концентрические обмотки на минимальном расстоянии от медианной плоскости циклотрона.

Результаты первых экспериментов на модели магнитной системы показали, что полученная вариация магнитного поля обеспечивает

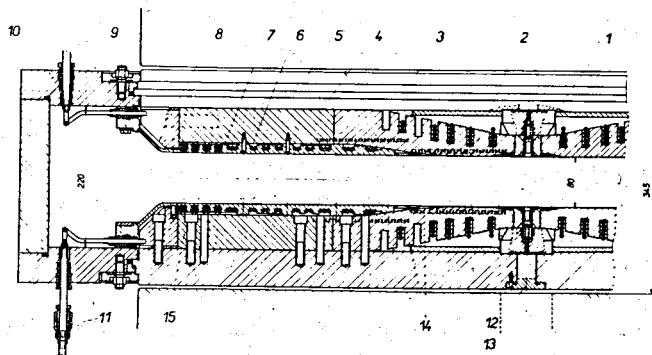


Рис 1. Схематический разрез магнитной системы циклотрона.

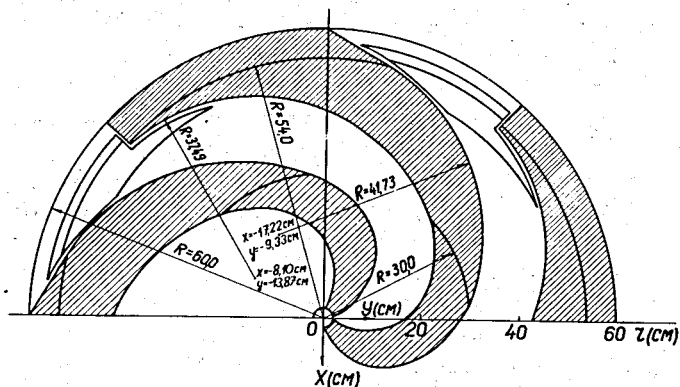


Рис 2. Конфигурация спиральных шимм (вид сверху).

ТАБЛИЦА

Основные параметры изохронного циклотрона У-120М

Периодичность структуры магнитного поля $N=4$;
 зазор между ферромагнитными элементами минимальный 8,2 см,
 максимальный 22 см ;
 средний параметр спиральности шимм $\lambda = 4,5$ см ;
 число дуантов $1 \times 180^\circ$;
 апертура дуанта 18 мм ;
 диапазон частот свободных колебаний аксиальных $0 < Q_z < 0,5$,
 радиальных $1 < Q_r$;
 эмиттансы (мм·град) : радиальный $8\mathcal{F}$, вертикальный $7,2\mathcal{F}$;
 мощность высокочастотного генератора - 180 кВт ;
 мощность питания магнитной системы - 180 кВт ;
 число концентрических обмоток - 18 шт ;
 число обмоток коррекции первой гармоники - 2 пары ;

	протоны		дейтоны и α -частицы		$^3\text{He}^{+2}$	
	мин	макс	мин	макс	мин	макс
E (МэВ)	12,5	40,0	8,4 17	20,0 41,0	17,0	54,4
N_0 (Гц)	9912	17352	11546	17898	9984	17745
$N(R_*)$ (Гц)	10044	18091	11598	18091	10044	18091
f (КГц)	15136	26497	8816	13665	10256	18229

фокусировку частиц на необходимом интервале радиусов и в заданном диапазоне изменения уровня магнитного поля. Однако, анализируя полученные зависимости среднего магнитного поля от радиуса, необходимо отметить следующее : а) в центральной области ($r < 16$ см), где резонансное поле слабо изменяется вдоль радиуса, наблюдается относительный провал поля на высоком уровне индукции и рост на низком ; б) значительный отрицательный градиент среднего магнитного поля $\partial H / \partial r = -120$ Э/см на радиусе вывода $R_* = 51$ см при высоком уровне индукции ; в) относительный рост поля на радиусе вывода при низком уровне индукции.

Основная задача моделирования магнитного поля циклотрона состояла в том, чтобы выбрать конфигурацию ферромагнитных и токовых элементов системы, магнитное поле которых удовлетворяло бы требованиям пространственной устойчивости и фазовый сдвиг не превышал бы заданной величины в широком диапазоне изменения индукции при минимальной мощности, потребляемой токовыми корректирующими обмотками.

Относительное увеличение поля в центральной области с уменьшением уровня индукции частично связано с тем, что поперечное сечение спиральных шимм резко меняется по длине, при этом кривые намагничивания объемов шимм в различных сечениях не одинаковы.

Уменьшение зазора между спиральными шиммами с радиусом приводит к появлению горизонтальной составляющей магнитного потока вдоль спиральных шимм к центру, величина которого зависит от магнитного сопротивления различных участков шимм.

Для экспериментального изучения этих эффектов была проведена серия экспериментов и расчетов, в результате которых конфигурация центральной области спиральных шимм была выбрана таким образом, что изменение формы среднего магнитного поля при изменении уровня индукции в заданном диапазоне уменьшилось в 10 раз. Это достигнуто, в основном, за счет специальных пазов, выполненных в спиральных шиммах в области уменьшения зазора между ними. Показано, что эти пазы играют роль переменных сопротивлений для горизонтальной составляющей магнитного потока, причем максимальное их воздействие проявляется при низкой индукции.

В области конечных радиусов для увеличения градиента среднего магнитного поля на радиусе вывода при высокой индукции, зазор между спиральными шиммами сделан минимальным и введены секторные шиммы, расположенные в пазах между спиралями. Конечная часть спиральных шимм $\Delta r = (54-60)$ см и секторные шиммы установлены на расстоянии 3, и 10 мм соответственно от стальной крышки камеры ускорителя. Влияние этих пазов на градиент магнитного поля при высоком уровне индукции незначительно. При низком уровне индукции зазоры представляют собой заметное сопротивление для магнитного потока и тем самым уменьшают относительный рост поля на конечных радиусах.

Новая версия системы программ расчета нелинейного уравнения в частных производных эллиптического типа, решение которого ищется на нерегулярной треугольной сетке, описана в третьей главе.

Система программ TRIMA решает уравнение, которое можно записать в виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial A(x, y)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial A(x, y)}{\partial y} \right] = -0,4 j_z(x, y) \quad (7)$$

для декартовой системы координат, или

$$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{1}{\mu r} \frac{\partial [r A(r, z)]}{\partial z} \right\} + \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{\mu r} \frac{\partial [r A(r, z)]}{\partial r} \right\} = -0,4 j_z(r, z) \quad (8)$$

для цилиндрической системы координат, где j_z или j_r — заданное распределение плотности тока, A_z или A_r — компонента векторного потенциала, перпендикулярная плоскости задачи, μ — магнитная проницаемость ферромагнетика. Эта система программ написана на языке ФОРТРАН, работает на ЭВМ БЭСМ-6/6,7,8/. С использованием указанных программ проведен анализ влияния пазов в центральной области спиральных шимм на распределение среднего магнитного поля в медианной плоскости при двух уровнях индукции. Результаты расчета показаны на рис 3а и 3б, где приведены распределения магнитных силовых линий и величины магнитной проницаемости внутри ферромагнетика при двух уровнях индукции для шимм с пазами и без них. Расчет проводился в цилиндрической системе координат.

Начальное приближение значения векторного потенциала в узлах сетки задано в виде $A = B_0 r$, что соответствует однородному полю. Исходное значение магнитной проницаемости для области ферромагнетика взято $\mu = 500$. Граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} A &= 0 \text{ при } r = 0, \\ A &= B_0 r_0 \text{ при } r = r_0, \\ \partial A / \partial r &= 0 \text{ при } z = 0, \\ A &= B_0 r \text{ при } z = z_0, \end{aligned} \quad (9)$$

где B_0 — уровень магнитной индукции; r_0 — максимальный радиус области расчета; z_0 — максимальное значение координаты z . Расчет проводился при $r_0 = 35$ см, $z_0 = 19$ см, $B_0 = 10$ кГс и $B_0 = 22$ кГс.

Сравнивая рис.3 С и Д, можно заметить значительное увеличение горизонтальной составляющей потока на низком уровне индукции, что приводит к всплеску поля в медианной плоскости на малых радиусах. Из рис.3 А и С видно, что введение вертикальных пазов способствует уменьшению доли потока, попадающего в центр с больших радиусов при низких индукциях. Таким образом, в случае шимм с

пазами наблюдается менее резкое изменение картины силовых линий при переходе от низкого уровня индукции к высокому.

Анализируя распределение магнитной проницаемости, можно отметить, что для шимм без пазов (рис.3 С и Д) при $B_0=10$ кГс наблюдается резкое увеличение проницаемости с уменьшением радиуса, поэтому силовые линии идут в центр. На высоком уровне индукции происходит насыщение ферромагнетика, и значения μ в большей части шиммы не превышают 10.

Для шимм с пазами (рис.3 А и В) при $B_0=10$ кГс видно, что центральная часть и зубцы не насыщены, но аксиальные пазы препятствуют прохождению горизонтальной составляющей потока в области зубцов. Наличие таких ненасыщенных зубцов способствует равномерному прохождению магнитного потока через зазор полюс - спиральная шимма, а не через область соприкосновения шиммы с полюсом. Общее состояние части шиммы, расположенной под пазами, характеризуется пониженным средним значением проницаемости (~ 15), что затрудняет отклонение силовых линий в горизонтальном направлении.

Для высокого уровня индукции магнитное состояние шимм как с пазами, так и без них (рис.3 В и Д), примерно одинаково.

Расчетные и экспериментальные результаты распределения магнитного поля в максимуме показаны на рис.4. На рисунке также показан профиль аксиально-симметричной расчетной конфигурации. Граничные условия брались в виде (9) при $r_0=76$ см, $z_0=56$ см, $B_0=10$ кГс и $B_0=20$ кГс, за исключением верхней границы ($z=56$ см) для $r > 60$ см и правой границы $r=76$ см, где векторный потенциал задавался в виде потенциала магнитного диполя, расположенного в точке $r=0$, $z=0$. Экспериментальные кривые 3 и 6 соответствуют максимальному полю в магнитной системе У-120М при токах в основной обмотке электромагнита $I_0=400$ А и $I_0=140$ А.

При высокой индукции в центре несовпадение расчета и эксперимента составляет величину $\sim 15\%$ (кривые 2 и 3). При $B_0=10$ кГс точность расчета в центральной области $\sim 5\%$ (кривые 5 и 6). Результат расчета магнитного поля конфигурации, показанной на рис.4 без учета пазов в спиральных шиммах, изображен кривыми 1 и 4. Отметим, что хотя основной объем железа пазов в области радиусов $\sim (10 - 20)$ см, максимальное увеличение поля, при расчете без пазов, наблюдается в центральной области $\sim (2 - 10)$ см, что обусловлено наличием горизонтальной составляющей потока значительной величины в спиральных шиммах без пазов.

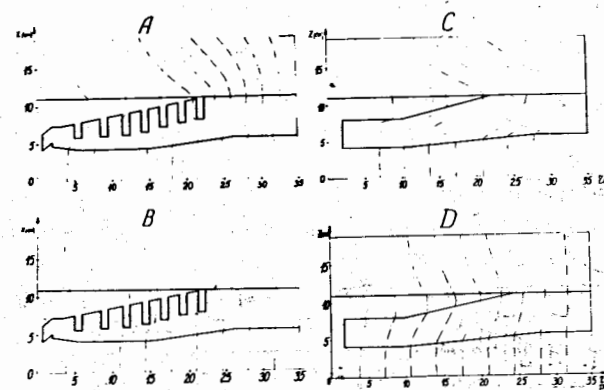


Рис 3а. Распределение магнитных силовых линий ;

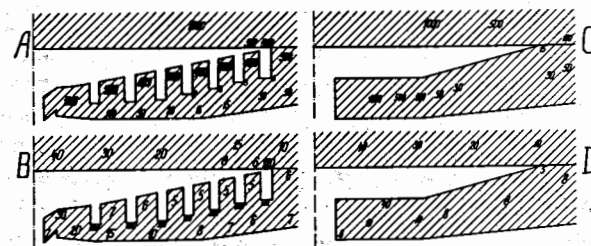


рис 3б. распределение магнитной проницаемости

А,С - $B_0 = 10$ кГс ; В,Д - $B_0 = 22$ кГс .

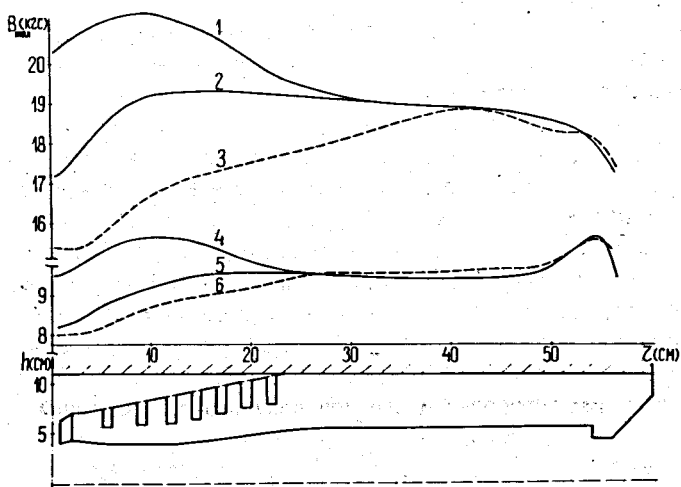


Рис 4. Расчетные и измеренные на У-120М зависимости поля в холме от радиуса : 1,2,4,5 - расчет; 3,6 - эксперимент при $J_0=400$ А и 140 А ; 1,4 - без пазов ; 2,5 -с пазами; 1,2 - $B_0=20$ кГс ; 4,5 - $B_0=10$ кГс .

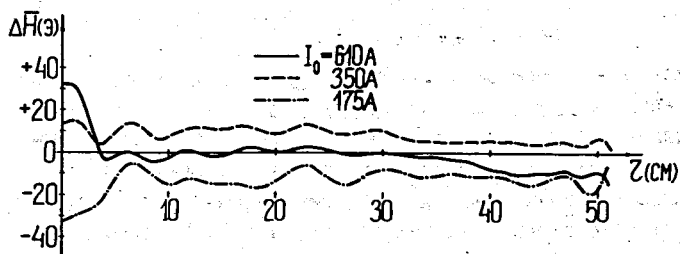


Рис 5. Отклонение сформированного среднего магнитного поля от изохронного.

Расчеты выделенных областей магнитной системы, выполненные с помощью программы TRIMA, требуют небольшого времени счета и, следовательно, в настоящее время эта методика может быть оперативно и широко использована в процессе моделирования сложных магнитных систем. Такие расчеты являются единственным методом (исключая эксперимент), позволяющим анализировать магнитное состояние ферромагнетика при изменении его конфигурации и уровня магнитного поля.

В четвертой главе сформулирована программа измерений магнитного поля от ферромагнитных и токовых элементов магнитной системы изохронного циклотрона. Полученные результаты используются для определения значений токов в концентрических и гармонических обмотках ускорителя при формировании требуемого поля.

Система программ обработки и анализа результатов измерений магнитного поля циклотрона, описанная в этой главе, включает в себя : а) программы обработки результатов измерений, сглаживания экспериментальных зависимостей, расчета требуемого поля и распределений токов в обмотках для получения изохронного поля ; б) программы расчета магнитных полей от ферромагнитных элементов, выбора параметров шимм тонкой коррекции и интегрирования уравнений движения частиц; в) служебные программы ^{4,5/} Измерения магнитного поля проводились специальным автоматизированным стендом. Для выделения поля восемнадцати пар концентрических обмоток на одном уровне возбуждения электромагнита необходимо 22 часа измерений.

Далее описана конструкция и конфигурация элементов магнитной системы изохронного циклотрона У-120М. Для обеспечения требуемого закона изменения вариации и среднего поля от радиуса во всем диапазоне полей азимутальная протяженность спиральных шимм, зазор между ними и высота меняются с радиусом. Выбранная конфигурация элементов магнитной системы показана на рис. 1 и 2. На рис.2 видно, что спиральная шимма состоит из трёх частей :

- 1) центральная часть (3)^{*}, границы которой - дуги окружности и кривые, близкие к спирали Архимеда $\tau = 18\psi$;
- 2) средняя часть (4) - границы контура описываются дугами окружностей ;

* ссылки в круглых скобках даются на номера рис.1.

3) конечная часть (8) - границы которой - дуги окружности и прямые линии.

В области конечных радиусов $\Delta r = (48 - 56)$ см в пазах между спиралями расположены секторные шиммы (15). В центре $\Delta z = (0,7 - 2,0)$ см магнитное поле формируется с помощью стального кольца (1). На рис. 1 показана развертка по осевой линии спирали вакуумной камеры ускорителя. Токовые концентрические обмотки (6), выполненные из медной трубки $\varnothing 6 \times 1$ мм, изолированной стеклоэпоксидной смолой, расположены в пазах центральной части спиральных шимм (№ 1-5) и на поверхности средней части спиральных шимм (№ 6-18), крепятся на плакировку (7).

Анализ допусков на точность изготовления элементов магнитной системы циклотрона и монтажа камеры ускорителя в зазоре электромагнита проведен с учетом требований к точности формирования магнитного поля циклотрона [9]. Допустимые ограничения на возмущения магнитного поля циклотрона сводятся к следующему:

1. Среднее магнитное поле $\Delta H_z / H_z = (2-5) \cdot 10^{-4}$.
2. Градиент среднего магнитного поля $\Delta(dH_z/dz) = (2-10)$ Э/см
3. Амплитуда первой гармоники $H_{z1} = (2-10)$ Э.
4. Средняя составляющая радиальной компоненты поля $H_r = (2-8)$ Э.

Эти требования к точности формирования поля определяют допуски на элементы магнитной системы циклотрона, которые были найдены как расчетным, так и экспериментальным путем. Полученные допуски можно выразить следующим образом:

1. Ошибка в изготовлении профиля спиральных шимм $\Delta h_i(\varphi) = 0,1$ мм.
2. Разница в изготовлении отдельных спиральных шимм по высоте $\Delta h_i < 0,05$ мм; по угловой протяженности - $\Delta \alpha = 0,05^\circ$; относительная точность установки спиральных шимм $\Delta \alpha = \pm 0,05$ мм.
3. Эксцентricность верхнего и нижнего дисков вакуумной камеры $\sim 0,2$ мм и непараллельность их $\sim 0,1$ мм/м.
4. Точность выставления камеры по высоте в зазоре электромагнита $\sim \pm 0,2$ мм.
5. Центровка камеры относительно полюсов электромагнита определяется из минимума первой гармоники в вертикальной компоненте магнитного поля.

На схематическом разрезе магнитной системы (рис. 1) цифрами 1, 8, 12, 13, 14, отмечены новые элементы или элементы, параметры которых изменены в процессе тонкого шиммирования поля. Эти изменения позволили обеспечить:

1. Возможность аксиальной инжекции через отверстие $\varnothing 30$ мм в крышке камеры и $\varnothing 70$ мм в полке и ярме электромагнита. Возмущения среднего поля в центре ускорителя при этом составляют ~ 30 Э на высоком и 15 Э на низком уровнях поля.

2. Снижение потребляемой мощности концентрических обмоток за счет изменения конфигурации поля, уменьшение амплитуды четвертой гармоники, а следовательно, и значения частоты свободных аксиальных колебаний Q_z для низкого уровня поля путем изменения параметров h_1 и h_2 конечной части спиральных шимм.

3. Изменение формы среднего магнитного поля в центральной области так, что при последующем формировании изохронного поля с помощью концентрических обмоток были получены меньшие отклонения поля от требуемых зависимостей.

4. Получение меньшего изменения среднего магнитного поля на радиусах (10 - 25) см за счет использования шиммирующих элементов в виде прутков $\varnothing 2$ мм, которые могут быть размещены в пазах между спиральными шиммами в два слоя по высоте и с шагом по радиусу 5 мм. Такая система позволила снизить токи в обмотках №3 и №5 с величин $|I_{max}| = 700$ А до $|I_{max}| = 600$ А для получения среднего магнитного поля в заданных допусках.

Расчет требуемых токов в концентрических обмотках для формирования изохронного поля выполнялся на ЭВМ с использованием метода наименьших квадратов. При этом в качестве исходных данных брались: а) результаты измерения поля ферромагнитных элементов; б) изохронное поле считается по (2), где константа H_0 выбирается из условия равенства поля до коррекции - изохронному на радиусе $R_k = 51$ см; в) выделенные величины полей обмоток.

Для $U = 120$ МВ учет коэффициента $\sigma(\tau)$ по (3) дает поправку к среднему полю ~ 20 Э, причем изменение знака $\Delta \bar{H} = \bar{H}(\sigma \neq 0) - \bar{H}(\sigma = 0)$ в зоне конечных радиусов обусловлено характером зависимости производной вариации $\mathcal{E}_4'(\tau)$ от радиуса.

Результаты формирования изохронного среднего поля с помощью токовых обмоток представлены на рис. 5. Максимальные отклонения поля от требуемых зависимостей в центральной области $\tau < 4$ см

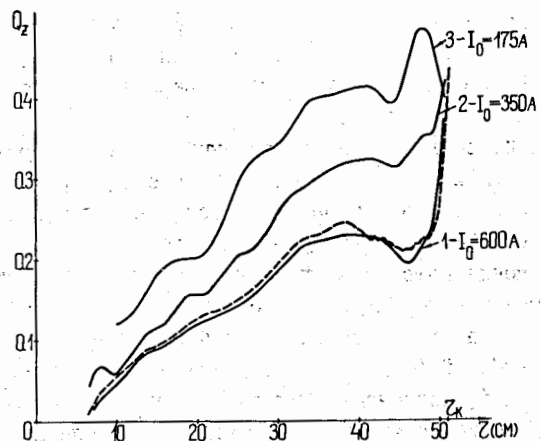


Рис 6. Частота аксиальных колебаний $Q_z(z)$.

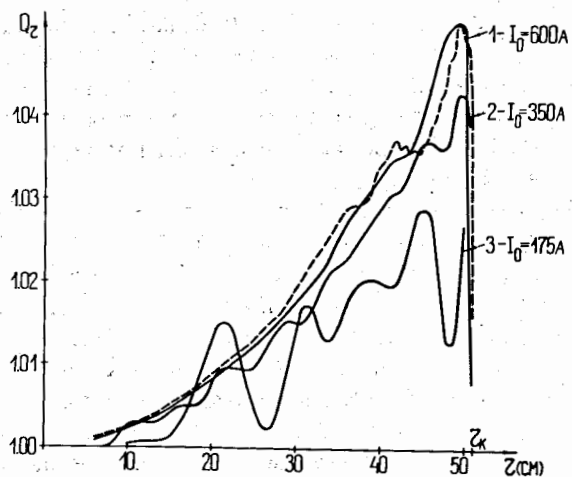


Рис 7. Частота радиальных колебаний $Q_r(z)$.

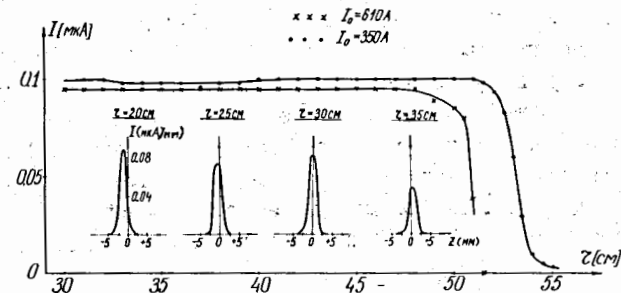


Рис 8. Зависимость тока пучка протонов от радиуса и распределение интенсивности сгустка по высоте для $I_0 = 600 \text{ A}$.

составляют $\sim \pm 30 \text{ Э}$, а в диапазоне радиусов $\Delta z = (4-51) \text{ см}$ не превышают $\sim \pm 6 \text{ Э}$. Постоянные составляющие отклонений вызваны изменением уровня поля ($\Delta H \sim 10 \text{ Э}$) при проведении двух серий измерений по выделению топографий магнитного поля.

Анализ сформированных магнитных полей циклотрона проводился на основании расчетов динамических характеристик ускоряемых частиц. Расчет фазового сдвига пучка по формуле (4) показал, что смещение фазы пучка относительно ускоряющего напряжения не превышает $\pm 5^\circ$. На рис. 6 и 7 представлены графики зависимости частот свободных колебаний от радиуса, рассчитанные по формулам (5,6). На этом же рисунке приведены результаты расчета частот с использованием программы интегрирования уравнений движения в реальном магнитном поле. Отклонение проведенных расчетов не превышает $\sim 5\%$. Следует отметить, что для полученных характеристик магнитного поля $U = 120 \text{ М}$ значительный вклад в величины Q_z ($\sim 40\%$) и Q_r ($\sim 15\%$) на конечных радиусах, рассчитываемые по аналитическим формулам, дают члены с ε_N'' . Из полученных величин Q_z и Q_r видно, что пространственная устойчивость ускоряемых протонов будет обеспечена во всем диапазоне рабочих радиусов за исключением центральной зоны $z < 5 \text{ см}$.

Монтаж циклотрона и комплексные стендовые испытания проводились в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в июле-августе 1976 г.

Впервые пучок на конечном радиусе при максимальном уровне поля был получен 7 июля 1976г. На рис.8 показаны зависимости тока пучка от радиуса для двух уровней поля ($J_0 = 610$ А и 350 А), на которых был проведен пробный запуск ускорителя /10,11/. Отсутствие потерь пучка по радиусу говорит о том, что среднее магнитное поле сформировано с хорошей точностью. На этом же рисунке показано измеренное распределение интенсивности частиц по высоте (z) на различных радиусах, полученное с помощью девятиламельного пробника с шагом между ламелями 1,2 мм. Из этих измерений видно, что высота пучка составляет ~ 5 мм, и смещение центра тяжести пучка относительно центральной ламели не превышает ~ 2 мм.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, сводятся к следующему:

1. Разработана методика, позволяющая выбрать специальную форму ферромагнитных шимм, с помощью которых было сформировано заданное магнитное поле в широком диапазоне индукций без использования обмоток регулировки амплитуды основной гармоники магнитного поля.

2. Предложено использовать азимутальные проточки в спиральных шиммах центральной области и специальные зазоры в конечной части шимм, что позволило существенно уменьшить изменение формы среднего магнитного поля от радиуса в заданном диапазоне полей.

3. Написана новая версия программы расчета нелинейного дифференциального уравнения в частных производных эллиптического типа на нерегулярной треугольной сетке (TRIMA) с различными граничными условиями, время счета в которой уменьшено в ~ 4 раза, и максимальное число узлов сетки увеличено с 1200 до 1600, без использования внешней памяти на ЭВМ БЭСМ-6.

4. Проведен цикл расчетных исследований характеристик поля электромагнита Ш - образного типа при различных формах полжсов. Данные исследования показали, что электромагнит с цилиндрическим полжсом характеризуется максимально достижимой величиной $B \cdot r$. Используя электромагнит с полжсом, профиль которого описывается гиперболическим косинусом, можно получить более однородное поле при изменении индукции в широком диапазоне.

5. Исследовано расчетным способом влияние азимутальных проточек на магнитное состояние спиральных шимм, что позволило подтвердить оптимальность выбранной конфигурации. Результаты получены путем расчета выделенных областей магнитной системы методом сеток.

6. Сформулированы требования на точность изготовления элементов магнитной системы и монтажа камеры ускорителя в зазоре электромагнита.

7. Успешный запуск ускорителя и изучение характеристик пучка на двух режимах работы показали, что полученное магнитное поле обеспечивает высокое качество пучка ускоренных протонов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Г.Аленицкий, А.А.Глазов и др. ОИЯИ, 9-5292, Дубна, 1970.
2. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин. ОИЯИ, Р9-5498, 33-43, Дубна, 1971, и ОИЯИ, Р9-6241, 15-25, Дубна, 1972.
3. Ю.Г.Аленицкий, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин, Н.А.Морозов. ОИЯИ, Р9-7339, 48-61, Дубна, 1973.
4. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин ОИЯИ, Р9-6241, 26-33, Дубна, 1972.
5. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, Н.А.Морозов. ОИЯИ, Р9-7339, 82-92, Дубна, 1973.
6. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин. ОИЯИ, Р9-7412, Дубна, 1973.
7. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин. ОИЯИ, 9-9034, Дубна, 1975.
8. Ju.G.Alenitskiy, S.B.Voroshtsov, N.L.Zaplating, Proceeding of the Conf. of the computation of Magnetic field, Oxford, 1976.
9. Ю.Г.Аленицкий, Н.Л.Заплатин, Н.А.Морозов. ОИЯИ, Р9-10090, Дубна, 1976.
10. Ю.Г.Аленицкий, Н.Л.Заплатин и др. ОИЯИ, Р9-10091, Дубна, 1976.
11. Ю.Г.Аленицкий и др. ОИЯИ, Р9-10382, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 апреля 1977 года.