

СЗ45Г

В-751

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P-1738



С.Б. Ворожцов, В.П. Дмитриевский,
Б.И. Замолотчиков, Н.Л. Заплатин, В.С. Рыбалко,
Л.А. Саркисян, Чжао Вей-цзян

ТОКОВАЯ СИСТЕМА
РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЦИКЛОТРОНА
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ
НА ЭНЕРГИЮ ПРОТОНОВ 700 МЭВ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1964

P-1738

С.Б. Ворожцов, В.П. Дмитриевский,
Б.И. Замоладчиков, Н.Л. Заплатня, В.С. Рыбалко,
Л.А. Саркисян, Чжао Вей-цзян

ТОКОВАЯ СИСТЕМА
РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЦИКЛОТРОНА
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ
НА ЭНЕРГИЮ ПРОТОНОВ 700 МЭВ

2649/2
4р.

1987

В в е д е н и е

Для разрабатываемого в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ релятивистского циклотрона (РЦ) на энергию протонов 700 Мэв магнитное поле в средней плоскости определяется выражением^{1/1}:

$$H(r, \Phi) = H(r) \left[1 + \epsilon(r) \cos\left(\frac{r}{\kappa} - N\Phi\right) \right], \quad (1)$$

где $2\pi\kappa$ и N - радиальный шаг и периодичность структуры магнитного поля.

Требуемая радиальная зависимость среднего поля $H(r)$ и амплитуды основной гармоники $H_g(r) = \epsilon(r)H(r)$, а также допуски на нее при значениях основных параметров циклотрона ($N = 8$, $\kappa = 7,7$ см) приведены на рис. 1. Допуск на величину среднего поля определяется конечной энергией частиц и составляет $\pm(2-3) \cdot 10^{-4}$ при максимальном приращении энергии за оборот $2eV_0 = 400$ кэв.

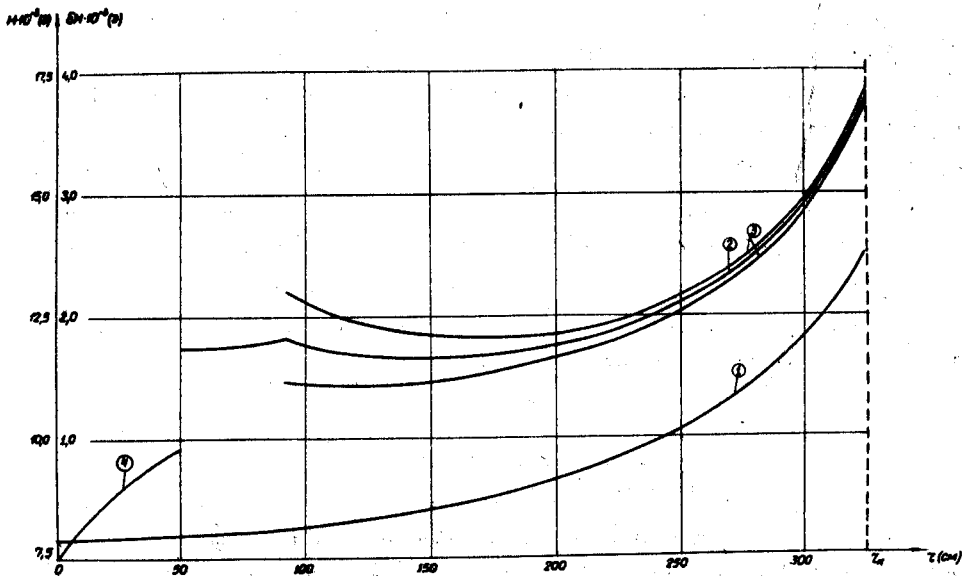


Рис. 1. (1) - (2). Зависимость среднего магнитного поля и вариации от радиуса для релятивистского циклотрона на энергию протонов 700 Мэв. (3) Линии допусков на величину вариации поля при $\Delta Q_n = \pm 0,09$. (4) Кривая $\epsilon_{\min}(r)H(r)$, соответствующая $Q_n = 0$.

Для изучения вопросов, связанных с формированием магнитного поля релятивистского циклотрона, была изготовлена модель магнитной системы в масштабе $K = 1/8,087$.

На рис. 2 приведены результаты последнего этапа формирования среднего поля и вариации поля на модели магнитной системы за счет профилирования системы спиральных шимм и полюсных наконечников электромагнита ^{1/2}.

Вариация поля удовлетворяет заданным требованиям и лежит в пределах допусков, за исключением конечных радиусов.

Максимальное отклонение среднего поля от резонансного закона в интервале радиусов $\Delta r = (25,0-53,4)$ см не превышает ± 50 э. В центральной области оно достигает ± 800 э. Исследования на модели показали, что шиммирование среднего поля в этой области за счет профиля полюсного наконечника является малоэффективным. Нецелесообразным является также дальнейшее изменение зазора $2h_1(r)$ между спиральными шиммами, так как это вызывает ухудшение характера радиальной зависимости вариации в центральной области. Поэтому формирование среднего поля в этой области должно быть в основном проведено за счет использования токовых обмоток.

Настоящая работа посвящена исследованию токовых обмоток релятивистского циклотрона. Токовая система РЦ состоит из обмоток грубой и тонкой коррекции для шиммирования среднего поля и медианной поверхности и гармонических обмоток - для коррекции низших (1,2,3) и основной гармоник поля. Расположение токовых обмоток в камере релятивистского циклотрона изображено на рис. 3.

На основании проведенных исследований с токовыми обмотками можно считать, что моделирование магнитной системы релятивистского циклотрона на энергию протонов 700 Мэв закончено.

В приложении I приведено приближенное выражение для расчета поля прямолинейного проводника прямоугольного сечения, расположенного между плоскопараллельными поверхностями железа.

Магнитное поле проводника (прямолинейный ток, виток) при наличии ферромагнитного экрана конечной высоты рассмотрено в приложении II.

Токовая система РЦ

1. Обмотки грубой коррекции поля

Обмотки грубой коррекции включают 22 concentрические кольцевые катушки, расположенные между полюсами электромагнита и системой спиральных шимм (рис. 3).

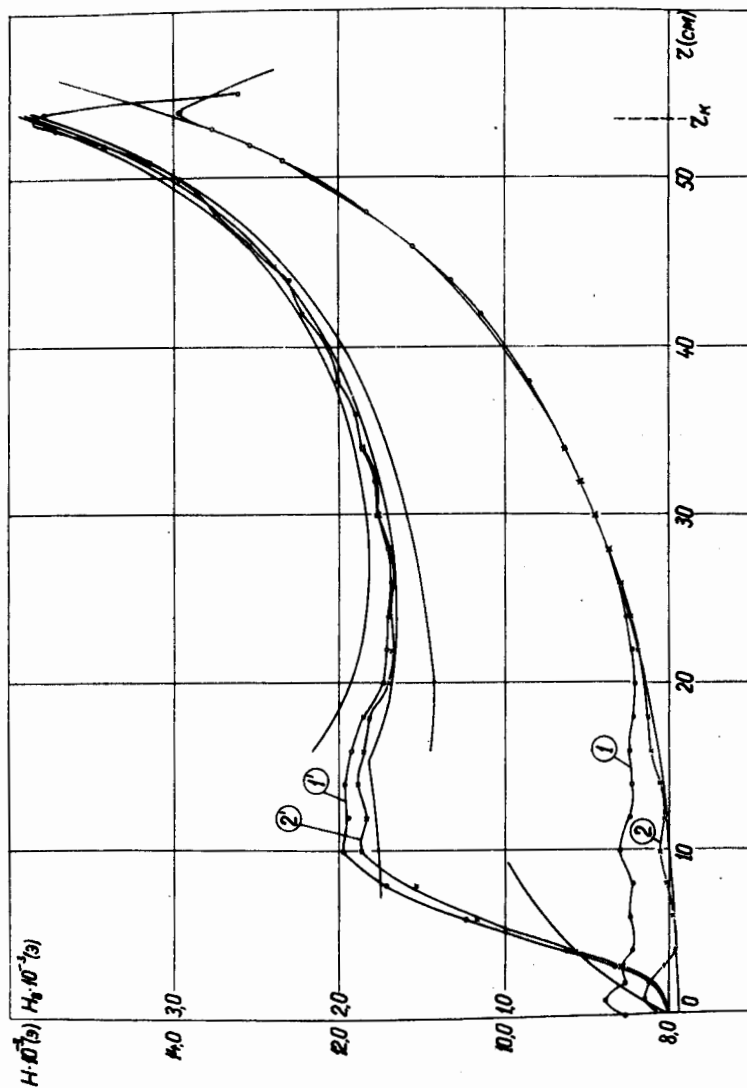


Рис. 2. Радиальная зависимость среднего поля и вариации на модели магнитной системы. (1), (1') - среднее поле и вариация для последнего этапа формирования магнитного поля с помощью спиральных шимм и полюсных наконечников электромагнита. (2), (2') - среднее поле и вариация при включении обмоток грубой коррекции.

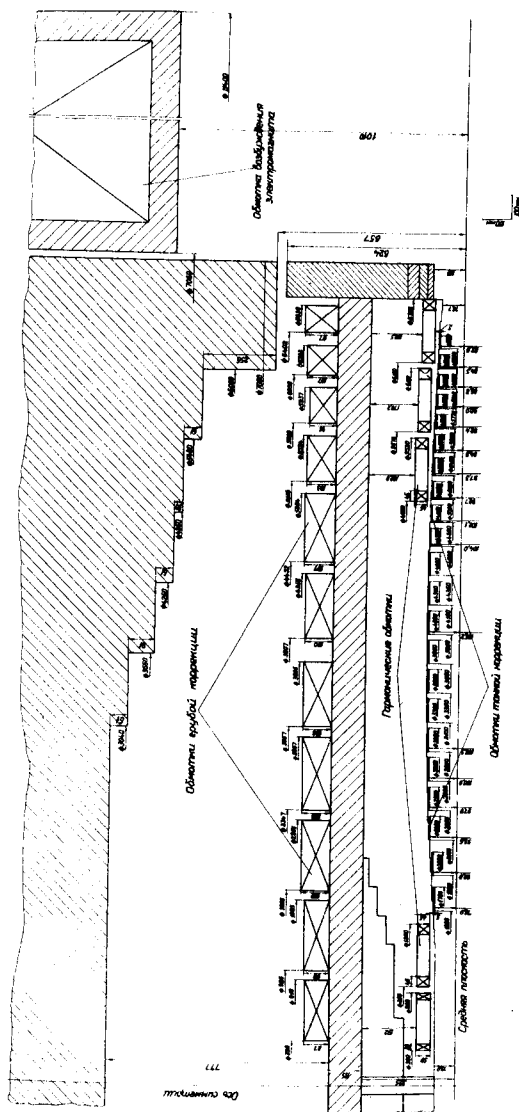


Рис. 3. Токовая система релятивистского циклотрона.

Расчет поля обмотки в такой сложной магнитной системе не представляется возможным^{х)}, поэтому был избран экспериментальный путь исследования каждой обмотки на модели магнитной системы циклотрона.

С этой целью было изготовлено одиннадцать токовых обмоток, геометрические размеры и расположение которых достаточно близко моделировали обмотки грубой коррекции РЦ. Размещение этих обмоток на крышке камеры модели магнитной системы показано на рис. 4. Катушки помещались в пазах, проточенных в дюралевых дисках. В качестве проводника использовалась медная трубка δ (0,7x0,15) см, обернутая в два слоя киперной лентой толщиной 0,02 см. Вся катушка пропитывалась бакелитовым лаком.

Система водяного охлаждения обмоток позволяла работать при плотностях тока $= 2000 \text{ а/см}^2$ ($I = 500 \text{ а}$).

Каждая катушка могла независимо подключаться к источнику питания, точность стабилизации которого по току составляла $\pm 1 \cdot 10^{-3}$. Измерение магнитного поля производилось магнитометром Холла, точность которого составляла $\pm 5 \cdot 10^{-4}$. Датчик магнитометра располагался на измерительной штанге, которая обеспечивала его установку с точностью $\pm 0,01 \text{ см}$ по радиусу, $\pm 0,01^\circ$ по азимуту и $\pm 0,05 \text{ см}$ по высоте. Стабилизация магнитного поля в зазоре электромагнита осуществлялась по току с точностью $\pm 5 \cdot 10^{-4}$.

Выделение магнитного поля обмотки осуществлялось путем азимутальных измерений на одном периоде структуры магнитной системы при включенной и выключенной обмотке. Экспериментально было установлено, что при коррекции среднего поля, имеющего величину $\pm 1000 \text{ э}$, магнитное поле обмотки (в пределах точности эксперимента) является линейной функцией тока, и имеет место принцип суперпозиции полей отдельных обмоток.

На рис. 5 приведены радиальные распределения магнитного поля обмоток, выделенные на модели.

Характер экранирования поля обмоток системой спиральных шимм определялся экспериментально. Были также проведены расчеты поля этих обмоток в зазоре электромагнита по формуле витка (5) (рис. 8). Из рис. 5 и 8 видно, что экранирующее действие спиралей растет с уменьшением отношения h/R , где R — средний радиус обмотки, h — расстояние от плоскости $z=0$ до середины катушки. С другой стороны, экранирование распространяется по радиусу от центра до $r=R-h$ и слабо влияет на характер кривой в области максимального градиента (от $r=R-h$ до $r=R+h$). Это позволяет с достаточной точностью использовать для определения магнитного

х) Магнитное состояние системы спиральных шимм не доведено до состояния насыщения.

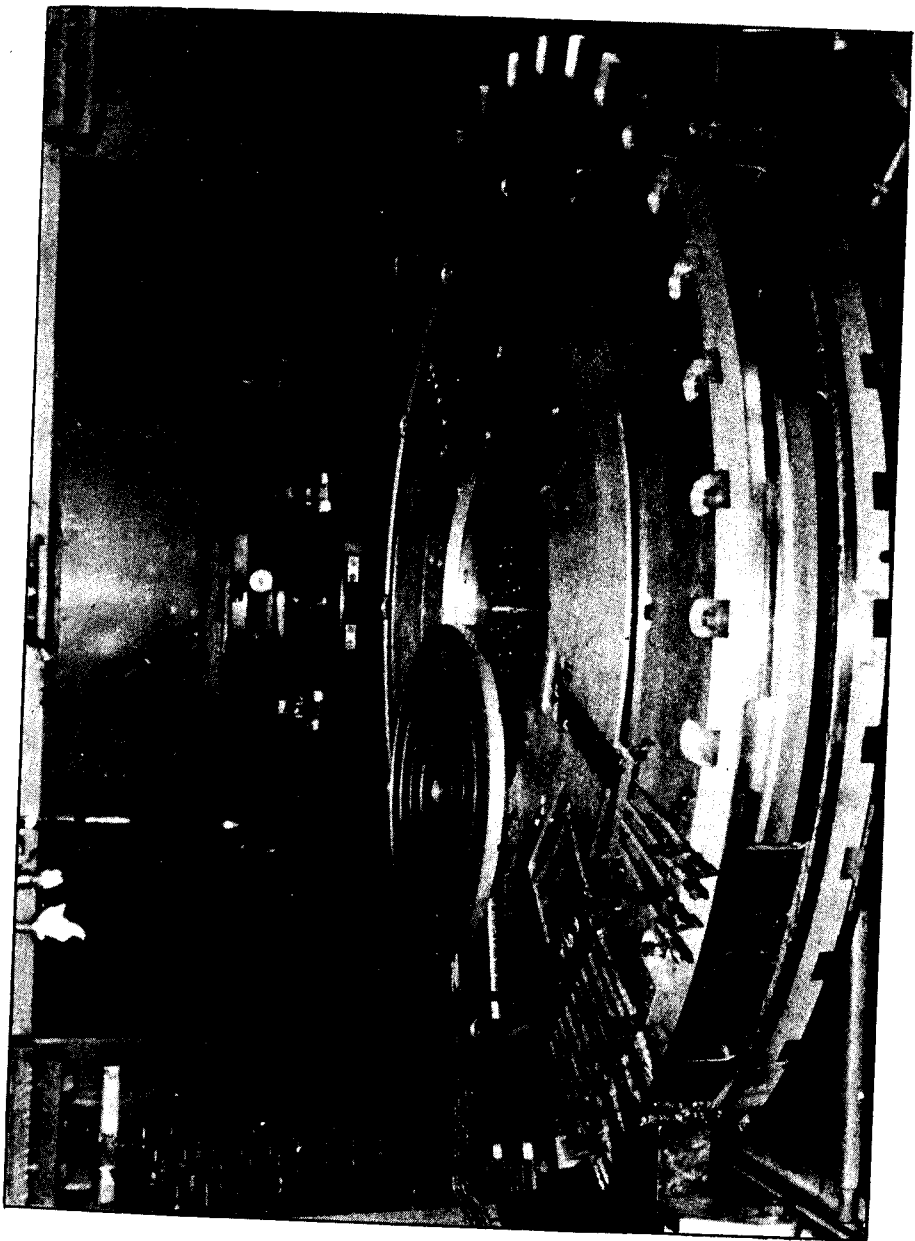


Рис. 4. Система II обмоток грубой коррекции модели циклотрона.

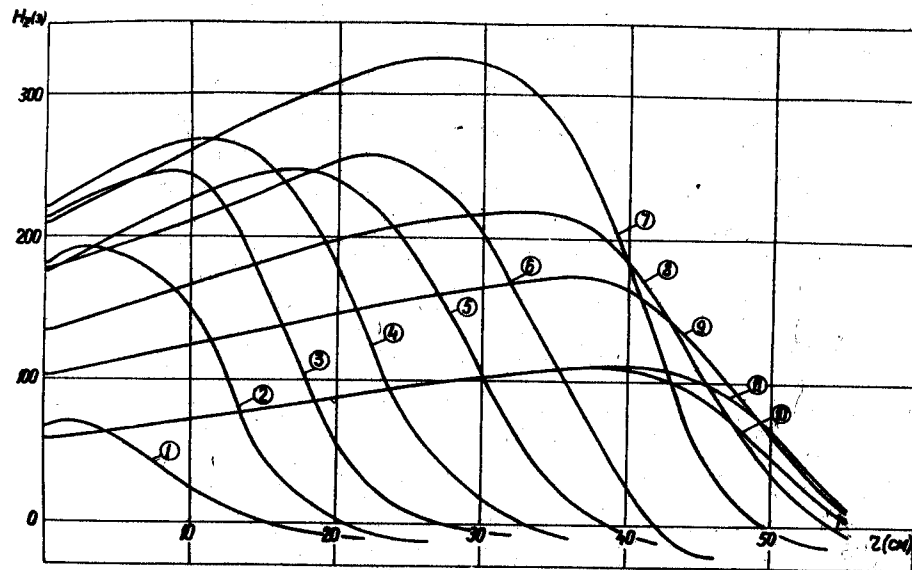


Рис. 5. Магнитное поле токовых обмоток грубой коррекции на модели ($H_0 = 8600$ э, $I_1 = 400$ а).
Параметры катушек

№	1	2	3	4	5	6
$R_2 - R_1$ (см)	7,4-3,6	12,4-7,7	17,9-13,2	23,7-19,0	30,0-26,2	34,7-30,9
$h_2 - h_1$ (см)	9,4-7,8	9,4-7,8	9,4-7,8	9,4-7,8	9,4-7,8	9,4-7,8
W	10	12	12	12	10	10
№	7	8	9	10	11	
$R_2 - R_1$ (см)	42,5-37,5	46,1-43,0	49,1-46,7	51,3-49,6	53,4-51,7	
$h_2 - h_1$ (см)	9,4-7,8	9,4-7,8	9,4-7,8	9,4-7,8	9,4-7,8	
W	12	8	6	4	4	

здесь R_1, R_2 - внутренний и внешний радиус кольцевой катушки, h_1, h_2 - расстояния от средней плоскости до внутреннего и внешнего оснований катушки, W - число витков в катушке.

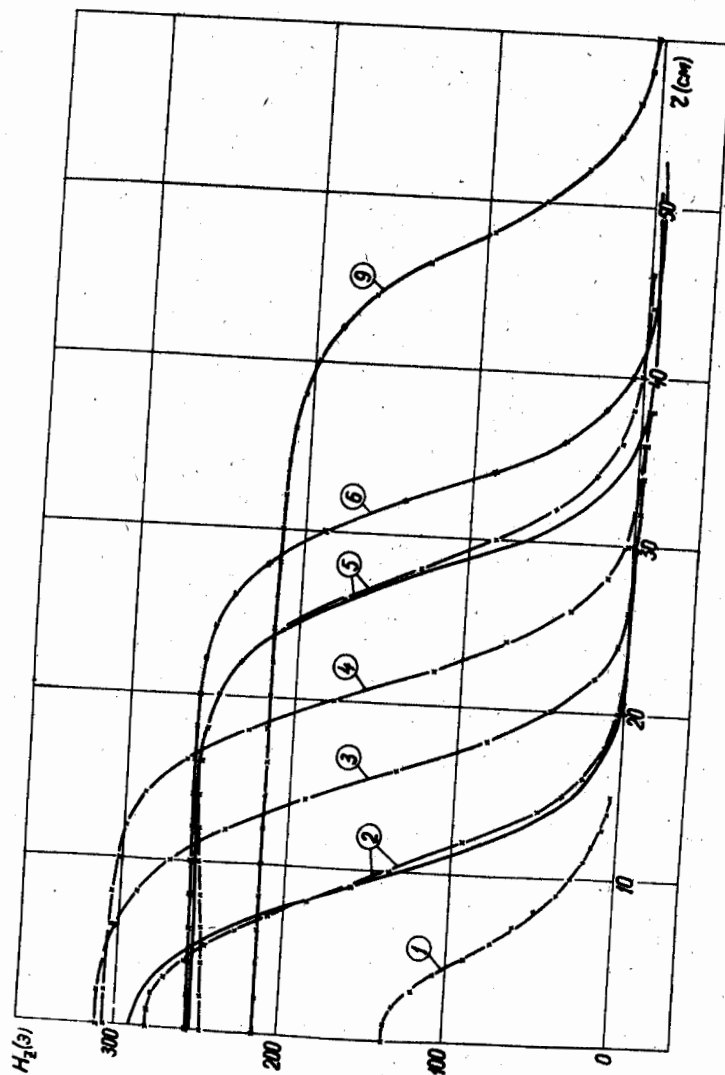


Рис. 6. Магнитное поле обмоток грубой коррекции в зазоре электромагнита модели ($I_1 = 400 \text{ A}$);
xxx - расчет, --- эксперимент.

поля при встречном включении обмоток на модели результаты расчета поля обмоток в зазоре электромагнита по формуле (5).

Отклонение среднего поля от резонансного значения, которое должно быть скомпенсировано на модели с помощью обмоток, представлено на рис. 7 (кривая 1).

Расчеты по определению токов в обмотках для шиммирования среднего поля на модели магнитной системы проводились на электронно-вычислительной машине ОИЯИ. Для расчетов были использованы два метода - метод наименьших квадратов и метод линейного программирования.

а) В случае метода наименьших квадратов токи в обмотках были найдены из условия минимума выражений

$$\sum_{s=1}^m [H(r_s) - \sum_{i=1}^n f_i(r_s) I_i]^2 = \sum_{s=1}^m v_s^2, \quad (2)$$

где m - число точек в интервале радиусов $r_H - r_k$, $H(r_s)$ - поле, подлежащее шиммированию в точке r_s , $f_i(r_s)$ - значение коэффициента пропорциональности между полем и током I в i -обмотке в точке r_s , v_s - оставшееся нескорректированное поле, n - число обмоток.

В расчете было принято, что токи в обмотках произвольны по величине и по знаку, число расчетных точек - $m = 32$. Получено следующее распределение тока в обмотках^{х)}:

N	1	2	3	4	5	6
I_1 (A)	-3202,8	1337,4	-1474,1	253,7	-337,3	489,8
N	7	8	9	10	11	
I_1 (A)	-1289,4	4301,4	-5017,8	837,9	-1884,9	

Результат расчета приведен на рис. 7 (кривая 2). Максимальное отклонение поля величиной $\pm 180 \text{ э}$ на начальных радиусах связано с выбросами поля на кривой 1 и не может быть скорректировано данной системой обмоток. Эти отклонения поля должны быть исправлены за счет изменения профиля системы спиральных шимм. Поэтому в дальнейших расчетах исходная кривая поля (кривая 1) была заменена "гладкой" кривой. В этом предположении производится расчет методом линейного программирования.

х) Знак минус соответствует направлению тока в обмотке, при котором ее поле направлено противоположно полю электромагнита.

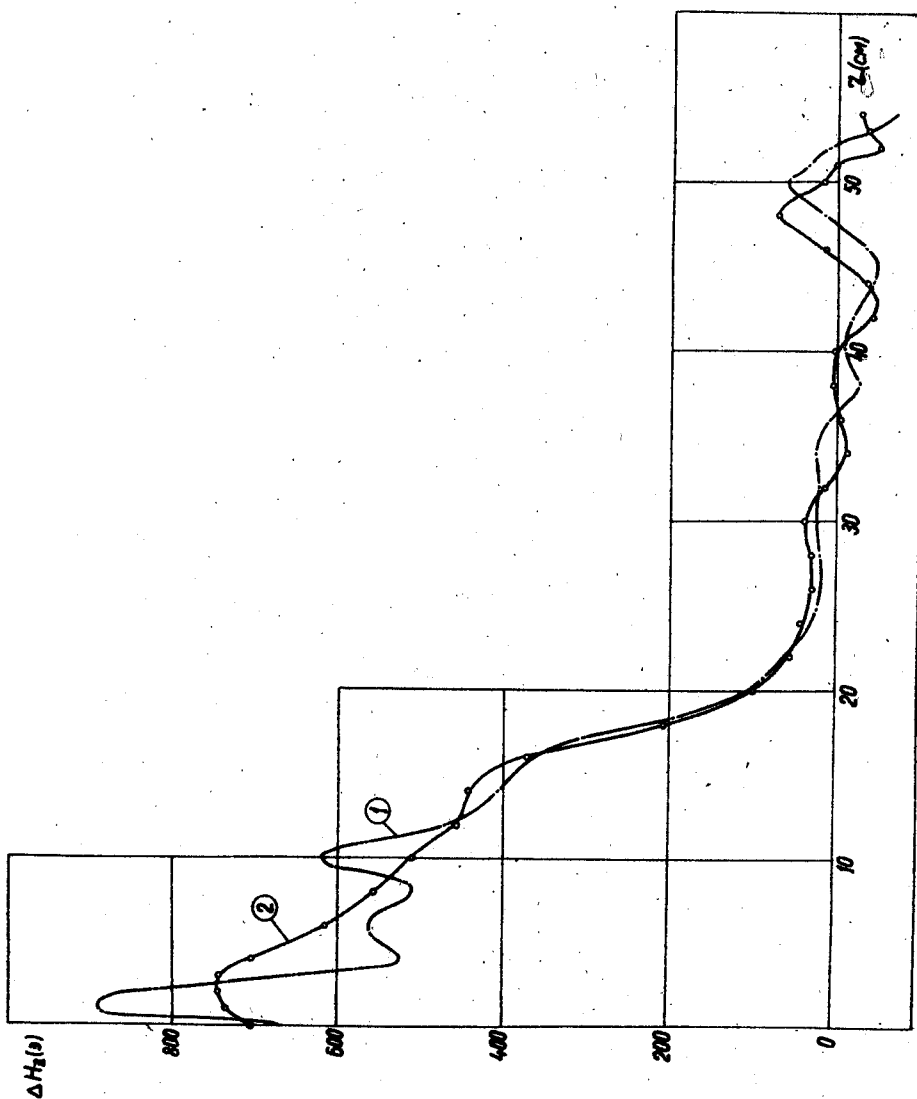


Рис. 7. Шиммирование среднего поля на модели расчетным способом (методом наименьших квадратов) обмотками грубой коррекции.

б) Метод линейного программирования заключается в том, что из системы уравнений

$$H(r_s) - \sum_{i=1}^n f_i(r_s) I_i = v_s \quad (3)$$

$$s = 1, 2, \dots, m$$

находится минимальное значение λ , где $\lambda = \max(v_s)$. Были проведены расчеты для двух случаев:

1. Токи в обмотках одного знака; максимальный ток $|I_i| = 500$ а; число расчетных точек $m = 26$.

Расчет дал следующее распределение тока в обмотках:

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I_i (a)	-434,3	-500	-215,9	-232,4	0	0	0	0	-48,9	0	0

Построенная по этим данным кривая 2 имеет максимальное отклонение поля от исходной кривой 1, в расчетных точках равное $\lambda = +23,5$ э (рис. 8).

2. Токи в обмотках обоих знаков; максимальный ток $|I_i| = 500$ а; число расчетных точек $m = 26$.

В этом случае получено следующее распределение тока в обмотках:

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I_i (a)	-500	-352,5	-207,8	-453,3	384,6	-464,5	500	-500	-500	500	338,5

Максимальное отклонение расчетной кривой 3 от исходной кривой 1 равно $\lambda = +15,1$ э (рис. 8).

Как видно из этих расчетов, целесообразно шиммировать исходное среднее поле модели (рис. 9, кривая 1) только в области радиусов $\Delta r = (0-25)$ см. Так как используемые источники питания не позволяли воспроизвести расчетные значения токов, в эксперименте на модели брались следующие значения токов в обмотках: $I_1 = I_2 = I_3 = -400$ а, $I_4 = -133$ а. Максимальное отклонение поля в этом случае равно $+80$ э. (с учетом сглаживания исходной кривой поля в центре, рис. 9, кривая 2). Отметим, что оставшиеся на разных радиусах модели локальные выбросы среднего поля не могут быть отшиммированы полностью данной системой обмоток грубой коррекции и поэтому должны быть скорректированы с помощью обмоток тонкой коррекции, а также за счет изменения профиля системы спиральных шимм.

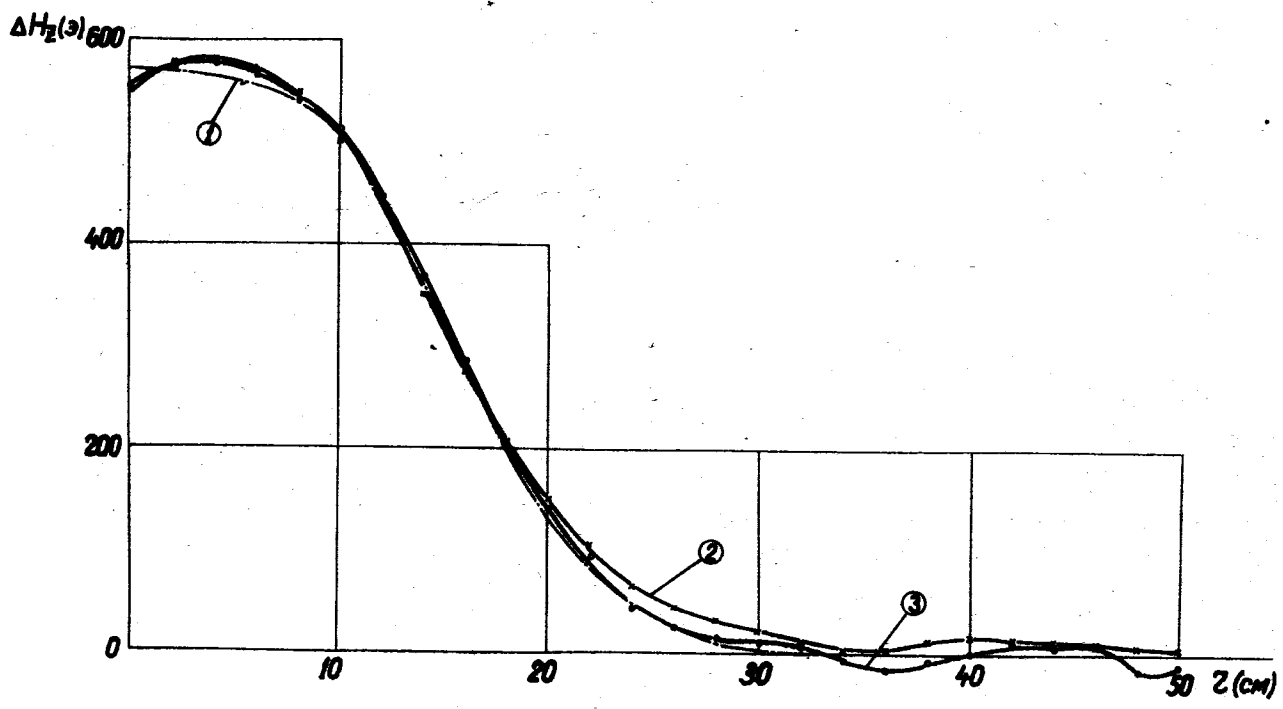


Рис. 8. Шиммирование среднего поля на модели расчетным способом (методом линейного программирования) обмотками грубой коррекции.

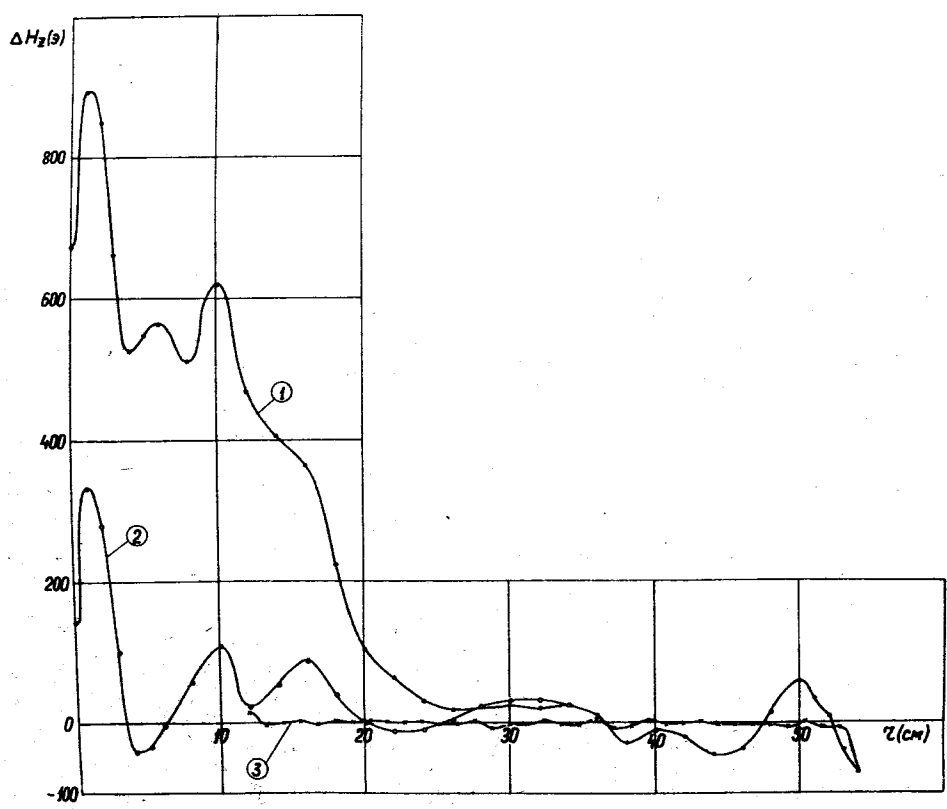


Рис. 8. Шиммирование среднего поля на модели токовыми обмотками. (1) Отклонение среднего поля, сформированного с помощью спиральных шимм и полюсных наконечников электромагнита от резонансного закона. (2) Отклонение среднего поля при включении обмоток грубой коррекции. (3) Отклонение среднего поля на основании расчета с токовыми обмотками тонкой коррекции.

Встречное по отношению к полю электромагнита включение токовых обмоток уменьшает вариацию поля $H_z(r)$ в центральной области. Радиальная зависимость среднего поля и вариации на модели магнитной системы до и после включения токовых обмоток приведена на рис. 2. Видно, что изменению вариации мало и не приводит к существенному смещению радиуса, соответствующего началу вертикальной фокусировки (кривая $\epsilon_{\min}(r)H(r)$).

На основании проведенных исследований геометрические параметры и максимальные амперватки обмоток грубой коррекции РЦ были выбраны следующими:

Т а б л и ц а I

N^0	1	2	3	4	5	6
$\Phi_H - \Phi_B$ (см)	81-39	158,5-98,5	216,1-166,5	296,7-224,7	360,5-305,7	435,5-380,7
h_1 (см)	45	45	45	45	45	45
Δh (см)	8,7	9,0	10,2	10,3	10,3	10,0
$IW \cdot 10^{-8}$	40,0	45,0	45,0	40,0	30,0	28,2
N^0	17	8	9	10	11	
$\Phi_H - \Phi_B$ (см)	503,4-445,2	552,4-513,6	593,7-562,9	629,3-603,9	663,0-640,2	
h_1 (см)	45	45	45	45	45	
Δh (см)	10,7	10,3	9,6	10,7	11,7	
$IW \cdot 10^{-8}$	31,9	28,6	23,9	25,5	29,3	

Здесь $\Phi_H - \Phi_B$ - наружный и внутренний диаметр катушки,

h_1 - расстояние от средней плоскости до нижнего основания катушки,

$\Delta h = h_2 - h_1$ - высота катушки,

IW - амперватки на одну катушку.

II. Обмотки тонкой коррекции поля

Для шиммирования локальных неоднородностей среднего поля РЦ величиной до ± 40 э предусмотрены обмотки тонкой коррекции. Двадцать две концентрические обмотки (сорок четыре кольцевые катушки) укладываются по профилю системы спиральных шимм (рис. 3).

Магнитное поле каждой обмотки в такой системе может быть представлено в виде

$$H = H_0(R, h, r) + kH_1(R, h, h_1, r) + (1-k)H_2(R, h, h_M, r), \quad (4)$$

где H_0 - поле катушки в воздухе, H_1 и H_2 - поле отображений катушки в спиральных шиммах и полюсных наконечниках электромагнита, соответственно; $k = \frac{N \cdot \Delta \phi}{2\pi}$, $\Delta \phi$ - азимутальная протяженность спиральной шиммы (для РЦ $K=0,4$); $2h_1(r)$ - высота зазора между спиральными шиммами; $2h_M(r)$ - высота зазора между полюсными наконечниками.

При расчете магнитного поля обмотки, помещенной в зазоре l , может быть использована формула поля витка:

$$H_z = 0,1\pi \cdot IW \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\mu-1}{\mu+1} \right)^n \left\{ \frac{1}{\sqrt{(R+r)^2 + (2nl+h)^2}} \left[F_0(\alpha_n) + \frac{R^2-r^2-(2nl+h)^2}{(R+r)^2 + (2nl+h)^2} E_0(\alpha_n) \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{(R+r)^2 + (2nl-h)^2}} \left[F_0(\beta_n) + \frac{R^2-r^2-(2nl-h)^2}{(R+r)^2 + (2nl-h)^2} E_0(\beta_n) \right] \right\}, \quad (5)$$

где n - номер отображения; μ - магнитная проницаемость ферромагнетика; $R = \frac{R_1+R_2}{2}$ - средний радиус; h - расстояние по вертикали от плоскости $z=0$ до середины катушки, параметры эллиптических интегралов $\alpha_n = 2\sqrt{\frac{Rr}{(R+r)^2 + (2nl+h)^2}}$ и $\beta_n = 2\sqrt{\frac{Rr}{(R+r)^2 + (2nl-h)^2}}$.

Однако в случае, когда можно пренебречь кривизной катушки ($|R-r| \ll R$), магнитное поле от концентрической катушки с достаточной точностью определяется по формуле для пленок тока в зазоре, что позволяет аналитически учесть бесконечное число отображений при $\mu = \infty$.

$$H_z = \frac{0,1 \cdot IW}{b} \left\{ \ln \frac{[\operatorname{ch} \frac{\pi}{l}(x+b+s) + \operatorname{Cos} \frac{\pi}{l}h] \cdot [\operatorname{ch} \frac{\pi}{l}(x+b+s) - \operatorname{Cos} \frac{\pi}{l}h]}{[\operatorname{ch} \frac{\pi}{l}(x-b+s) + \operatorname{Cos} \frac{\pi}{l}h] \cdot [\operatorname{ch} \frac{\pi}{l}(x-b+s) - \operatorname{Cos} \frac{\pi}{l}h]} + \right. \\ \left. + \ln \frac{[\operatorname{ch} \frac{\pi}{l}(x+b-s) + \operatorname{Cos} \frac{\pi}{l}h] \cdot [\operatorname{ch} \frac{\pi}{l}(x+b-s) - \operatorname{Cos} \frac{\pi}{l}h]}{[\operatorname{ch} \frac{\pi}{l}(x-b-s) + \operatorname{Cos} \frac{\pi}{l}h] \cdot [\operatorname{ch} \frac{\pi}{l}(x-b-s) - \operatorname{Cos} \frac{\pi}{l}h]} \right\}, \quad (6)$$

где $2b$ - ширина пленки тока, $2s = 2R$ - взаимное смещение по оси x включенных встречно двух пар пленок.

Для проверки схемы расчета обмоток РЦ были проведены на модели магнитной системы эксперименты с парой обмоток. Расположение токовых катушек и системы охлаждения на нижней крышке камеры показано на рис. 10. Токовые катушки размещались в пазах, проточенных в дюралевом кольце. В качестве проводника использовался провод ПЭВ-1 $\delta = 0,137$ см. Катушка пропитывалась бакелитовым лаком и обертывалась лакотканью толщиной 0,02 см. Система охлаждения позволяла работать при плотностях тока ≈ 2000 а/см².

На рис. 11 приведено сравнение расчета по формулам (4) и (6) с экспериментом при встречном включении обмоток. При расчете в формуле (4) не был учтен третий член (вклад которого, по оценке, не превышает нескольких процентов), при этом отклонение расчета от эксперимента не превышает $\pm 3\%$. Это указывает, что предложенная схема расчета (4) позволяет с достаточной точностью рассчитать магнитное поле концентрических обмоток тонкой коррекции РЦ.

Расчеты поля обмоток тонкой коррекции РЦ (параметры приведены в таблице II) показали, что выбранная система позволит исправлять возмущения среднего поля величиной $\pm(20-40)$ э при минимальной радиальной протяженности поля $\Delta r = (30-50)$ см. В последнем столбце таблицы приведено распределение тока в обмотках тонкой коррекции, полученное расчетным способом для формирования резонансного закона среднего поля модели (токи приведены для РЦ). Превышение числа ампервитков в некоторых обмотках над заданным связано с шиммированием локальных возмущений среднего поля больших ± 40 э. Расчеты проводились на ЭВМ по формулам (4) и (5) в диапазоне радиусов $\Delta r = (12-54)$ см. На основании этих расчетов можно сделать вывод, что выбранная система обмоток позволит отшиммировать поле на модели в интервале радиусов $\Delta r = (12-53,4)$ см с точностью до ± 15 э (рис. 9).

Дальнейшая коррекция среднего поля на модели в заданных допусках $\pm(2-3) \cdot 10^{-4}$ является нецелесообразной, так как шиммирование неоднородностей поля величиной ± 15 э находится в пределах точности обработки профиля системы спиральных шимм. Кроме того, расчет фазового движения для приведенного характера отклонений среднего поля от резонансного (кривая 3, рис. 9) показал, что смещение фазы не превышает $\pm 30^\circ$.

Так как концентрические катушки уменьшают рабочий зазор ускорителя, был рассмотрен второй вариант этих катушек в виде секторных, размещенных в пазах между спиральными шиммами. Однако, как показали расчеты и эксперименты, секторные обмотки не удовлетворяют совместным требованиям формирования среднего поля и вариации. Так, например, когда максимальная величина среднего поля, создаваемого секторной обмоткой, достигает порядка 40 э, вариация поля составляет ~ 80 э. Кроме того, секторные обмотки не обладают той гибкостью шиммирования



Рис. 10. Катушки тонкой коррекции с системой охлаждения на нижней крышке камеры модели.

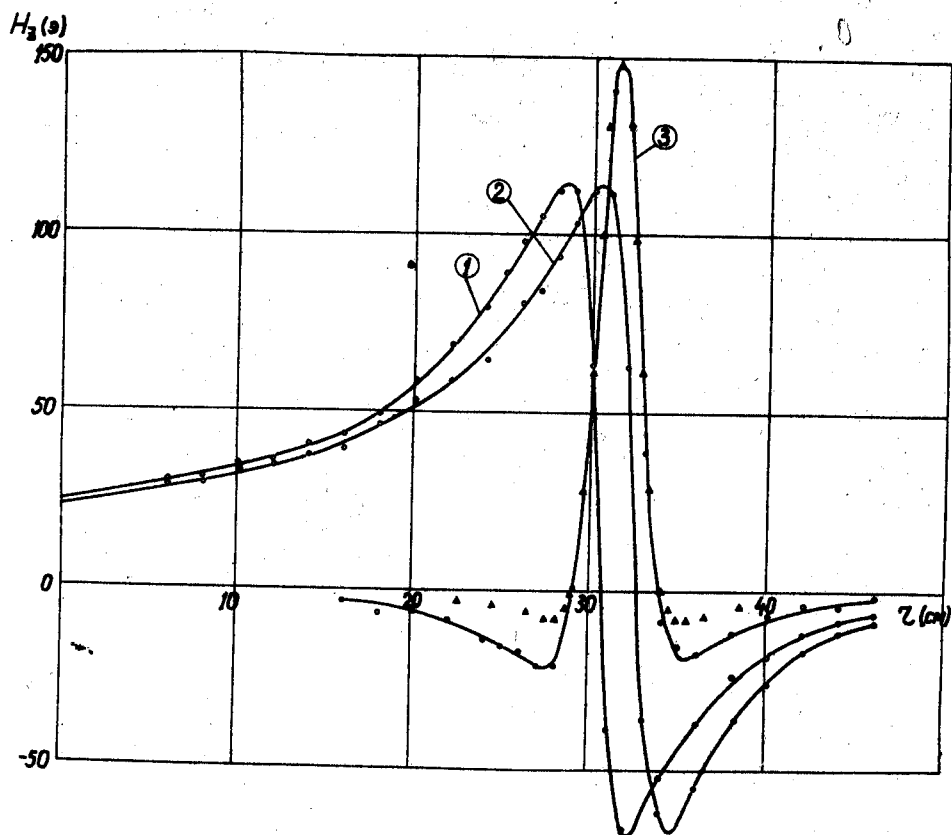


Рис. 11. Магнитное поле обмоток тонкой коррекции на модели.

N°	1	2
R (см)	30,4	32,4
ΔR (см)	1,2	1,2
b (см)	1,55	1,55
IW	480	480

(1), (2) o-o-o- - экспериментальное поле обмоток 1 и 2. (3) - поле обмоток 1 и 2 при их встречном включении. -o-o-o- - эксперимент, $\Delta\Delta\Delta$ - расчет

Таблица II

№	Средний диаметр (см)	Ширина (см)	Высота (см)	IW на одну катушку	IW на одну катушку (расчет)
I.	160,0	10,0	0,5	450	- 564
2.	190,0	10,0	0,5	450	-339
3.	220,0	10,0	0,5	412	848
4.	245,0	10,0	0,5	375	232
5.	270,0	10,0	0,5	375	78
6.	295,0	10,0	0,5	375	- 40
7.	320,0	10,0	0,5	375	-248
8.	345,0	10,0	0,5	375	- 165
9.	370,0	10,0	0,5	375	- III
10.	395,0	10,0	0,5	375	- 197
II.	420,0	10,0	0,5	375	57
12.	445,0	10,0	0,5	375	485
13.	467,5	7,5	0,5	300	52
14.	487,5	7,5	0,5	300	- 139
15.	507,5	7,5	0,5	300	149
16.	527,5	7,5	0,5	300	266
17.	547,5	7,5	0,5	300	- 24
18.	566,0	6,0	0,5	255	- 334
19.	583,0	6,0	0,5	255	- 398
20.	600,0	6,0	0,5	255	- 482
21.	617,0	6,0	0,5	255	442
22.	633,2	6,0	0,5	255	259

среднего поля и медианной поверхности, которая существует в варианте концентрических обмоток. Поэтому использование секторных катушек является целесообразным только для коррекции гармоник поля.

III. Гармонические обмотки

В релятивистском циклотроне в зонах действия простых и параметрических резонансов накладывается ограничение на величину низших гармоник поля. Величина гармоники определяется допустимым увеличением амплитуды радиальных колебаний после прохождения данного резонанса. Допуски на величины низших гармоник для резонансных зон приведены в таблице III.

Т а б л и ц а III

Q_r	Тип резонанса	Возбуждающая гармоника	Протяженность резонанса по r (см)	Допустимая величина гармоники (ε)
1,0	Простой	1	0-30	5-10
1,0	Параметрический	2	0-30	12-15
1,5	Параметрический	3	291-293	3-5

Оценки, приведенные в работе /2/, показали, что ожидаемые величины низших гармоник поля, обусловленные геометрическими неточностями изготовления магнитной системы ПЦ, могут составлять $\approx 20\varepsilon$.

Коррекцию этих гармоник на циклотроне предполагается осуществлять с помощью гармонических обмоток.

Гармонические обмотки исследовались в двух вариантах:

- катушки, расположенные в районе обмоток грубой коррекции поля, и
- катушки, расположенные в пазах между спиральными шиммами.

Расчет среднего поля и амплитуд гармоник симметричной пары гармонических катушек может быть проведен соответственно по приближенным выражениям (при условии $\frac{\Delta R}{R} \ll 1, \frac{\Delta h}{h} \ll 1$):

$$H_z^{(0)} = \frac{0,2 \cdot IW \cdot \Delta R \cdot \Delta \phi}{\pi (h_2 - h_1) r^{3/2} R^{1/2}} \{ h_1 Q_{m-1/2}'(x_1) - h_2 Q_{m-1/2}'(x_2) \}, \quad (7)$$

$$H_z^{(m)} = \frac{0,8 \cdot IW \cdot \Delta R \cdot \sin(\frac{m \Delta \phi}{2})}{m \pi (h_2 - h_1) r^{3/2} R^{1/2}} \{ h_1 Q_{m-1/2}'(x_1) - h_2 Q_{m-1/2}'(x_2) \}, \quad (8)$$

где $m = 1, 2 \dots$ номер гармоники, $\Delta h = h_2 - h_1$ - высота катушки, $R = \frac{R_1 + R_2}{2}$ - средний радиус установки катушки, $\Delta R = R_2 - R_1$ и $\Delta \phi$ - радиальная и азимутальная протяженности катушки, $Q_{m-1/2}'(x)$ - производная сферической функции Лежандра второго рода аргумента $x_{1,2} = \frac{R^2 + r^2 + h_{1,2}^2}{2Rr}$. При условии, что $\frac{\Delta h}{h} \ll 1$ между гармоникой индекса m и средним полем на основании формул (7) и (8) можно установить следующую простую связь:

$$\frac{H_z^{(m)}(r)}{H_z^{(0)}(r)} \Big|_{r=R} \approx \frac{4 \sin(\frac{m \Delta \phi}{2})}{m \cdot \Delta \phi} \cdot \frac{Q_{m-1/2}'(x)}{Q_{m-1/2}'(x)} \quad (9)$$

Оценки для 1, 3, и 8 гармоник поля показали, что отношение $\frac{Q_{m-1/2}'(x)}{Q_{m-1/2}'(x)}$ слабо зависит от r в районе $r = R$; поэтому в выражении (9) можно использовать значение x при $r = R$.

Расчеты, проведенные по формуле (8), показали, что для компенсации 1 и 3 гармоник поля величиной 20ε требуемые ампервитки на одну гармоническую катушку, расположенную в районе обмоток грубой коррекции, равны $2,8 \cdot 10^3 IW$ и $1,7 \cdot 10^3 IW$, соответственно (расчет был проведен без учета действия системы спиральных шимм и полюсных наконечников электромагнита на магнитное поле катушек). Недостатком таких катушек является значительная радиальная протяженность возмущения $\Delta r = 2h$ и большая мощность источников питания. Эти недостатки отсутствуют в гармонических катушках, расположенных в пазах между спиральными шиммами.

Для выяснения влияния системы спиральных шимм и полюсных наконечников электромагнита на магнитное поле секторных катушек и проверки формул расчета были проведены эксперименты на модели с системой из трех пар секторных катушек. Катушки крепились на дюралевой пластине, помещенной между спиральными шиммами (рис. 12). Параметры катушки: $R = 35$ см, $\Delta R = 2,4$ см, $\delta = 1,4$ см (толщина обмотки), $\Delta h = 1,2$ см, $\Delta \phi = 14^\circ$, $IW = 680$. Катушки были намотаны из провода ПЭВ-2 $d = 0,181$ см. При естественном охлаждении катушек плотность тока через проводник достигала ≈ 800 а/см². Эксперименты были проведены при двух значениях параметра h_1 . Поле катушки выделялось путем азимутальных измерений по 18 точкам на периоде структуры магнитной системы. Эксперименты показали, что поле секторной катушки практически не зависит от уровня поля электромагнита. Сравнение результатов расчета среднего

x) Таблицы для расчета функции $Q_{m-1/2}'(x)$ с достаточно малым шагом изменения аргумента x содержатся в работе /3/.

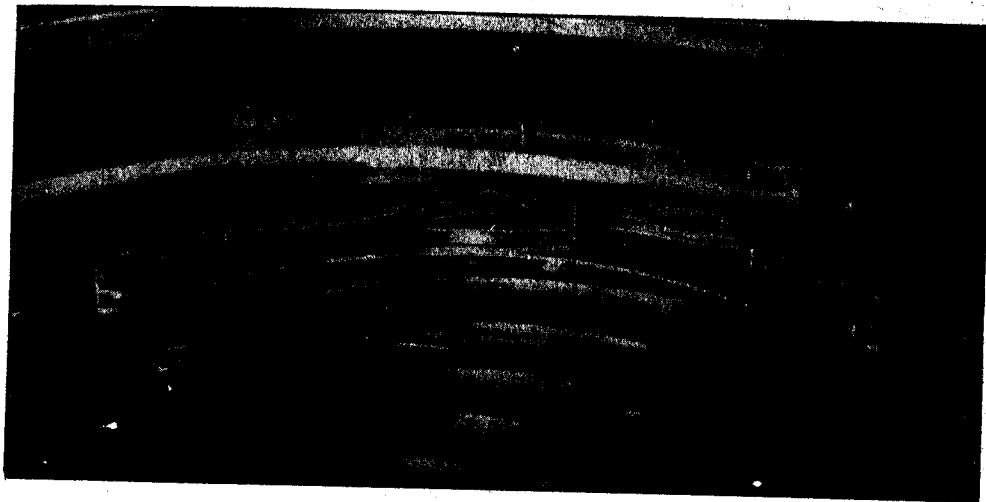


Рис. 12. Секторные катушки на нижней крышке камеры модели.

поля и гармоник (1,3 и 8) по формулам (7) и (8) с разложением экспериментальных кривых в ряд Фурье, показывает их хорошее совпадение (рис. 13). Это указывает на то, что при оценке магнитного поля секторной катушки, помещенной между спиральными шиммами в зазоре электромагнита, достаточно ограничиться расчетом поля катушки в воздухе.

Исследования показали, что гармоники поля (1,3 и 8) секторной катушки медленно уменьшаются с ростом номера гармоники, и отношение их амплитуд к среднему полю порядка двух.

Для коррекции низших и основной гармоник в структуре магнитного поля ПЦ предусмотрено пять гармонических обмоток. Параметры и максимальные ампервитки катушек приведены в таблице 1У.

Т а б л и ц а 1У

№	Назначение обмотки	$\phi_H - \phi_B$ (см)	$h_2 - h_1$ (см)	$I \cdot 10^{-3}$ на одну секторную катушку
1.	1 гармоника	80-30	13,3-8,3	1,5
2.	2 гармоника	139-85	13,29 - 8,79	2,0
3.	8 гармоника	552-498	16,2I - 11,7I	2,0
4.	3 гармоника	6II-577	15,48 - 10,98	2,0
5.	8 гармоника	670-616	14,45 - 9,95	2,0

Расчеты показали, что при выбранных ампервитках секторные обмотки позволяют производить коррекцию низших гармоник величиной $\sim 25\%$, основной $\sim 40\%$ и среднего поля $\sim 25\%$ при радиальной протяженности возмущения $\Delta r \sim 30$ см.

IV. Исправление медианной поверхности обмотками пучков и тонкой коррекции поля

Положение медианной поверхности в ускорителе определяется в основном условием равенства нулю среднего значения радиальной компоненты поля $H_r = 0$ //4//. Отклонение медианной поверхности от середины зазора камеры не должно превышать $\pm 0,5$ см на всех радиусах.

Для обеспечения этого допуска, как это следует из выражения $\Delta z = \frac{r H_r}{Q_z^2 H_z}$

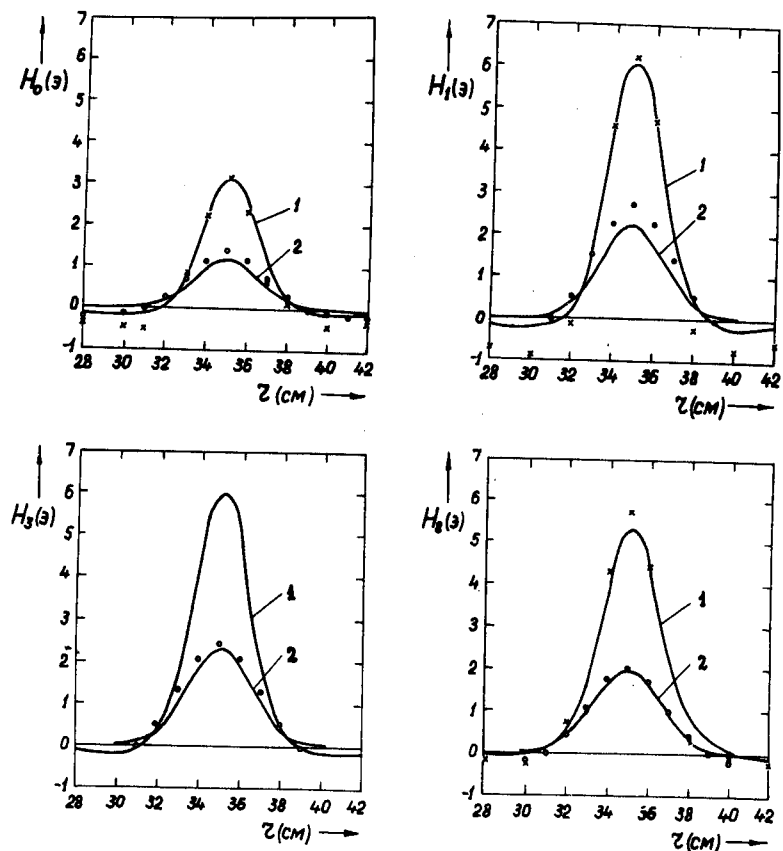


Рис. 13. Среднее поле и гармоники (1, 3 и 8) симметричной пары секторных катушек на модели. (1) — эксперимент при $h_1 = 2,0$ см, xxx — расчет при $h_1 = 2,0$ см. (2) — эксперимент при $h_1 = 3,4$ см, o o o — расчет при $h_1 = 3,4$ см.

(Q_z — частота аксиальных колебаний), величина H_z , измеряемая в средней геометрической плоскости электромагнита, должна находиться в пределах от $H_z = \pm 2,5$ э при $r = 100$ см до $H_z = \pm 1,5$ э при $r = 300$ см.

Коррекция медианной поверхности релятивистского циклотрона будет осуществляться обмотками грубой и тонкой коррекции поля.

На рис. 14 приведены результаты расчета радиальной компоненты поля этих катушек. Расчет выполнен по формуле витка без учета влияния системы спиральных шимм и полюсного наконечника электромагнита на магнитное поле катушки. Катушки грубой коррекции позволяют исправлять радиальную компоненту поля величиной в несколько сот эрстед, а катушка тонкой коррекции — около двадцати эрстед.

З а к л ю ч е н и е

На основании исследований, проведенных с токовыми обмотками на модели магнитной системы РЦ, можно сделать следующие выводы:

- 1) Использование обмоток грубой коррекции на модели магнитной системы позволяет отшуммировать среднее магнитное поле в интервале радиусов $\Delta r = (3-53,4)$ см с точностью ± 80 э.
- 2) Расчетным способом показано, что при использовании обмоток тонкой коррекции среднее магнитное поле модели может быть сформировано с точностью ± 15 э в интервале радиусов $\Delta r = (12-53,4)$ см.

Доведение среднего поля на модели до заданных допусков $\pm(2-3) \cdot 10^{-4}$ за счет профилирования системы спиральных шимм является нецелесообразным.

3) Показана целесообразность размещения гармонических обмоток в пазах между спиральными шиммами.

4) Обмотки грубой и тонкой коррекции позволяют осуществлять регулирование положения медианной поверхности.

На основании результатов исследований, изложенных в работах [1, 2] и настоящей, можно считать, что моделирование магнитной системы релятивистского циклотрона на энергию протонов 700 Мэв закончено.

Авторы выражают благодарность В.В.Куликову за конструирование токовых обмоток, А.М.Озерову и Н.А.Реуту — за помощь при проведении магнитных измерений.

Приложение I

Поле прямолинейного проводника прямоугольного сечения, расположенного между плоскопараллельными поверхностями железа.

Поле прямолинейного проводника прямоугольного сечения в зазоре l с помощью конечной комбинации элементарных функций не выражается^{/5/}. Используя в формуле (6) разложение в ряд вида $\ln \theta = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \left(\frac{\theta-1}{\theta+1} \right)^{2n+1}$ при $\theta > 0$ получим после интегрирования приближенное выражение для z компоненты поля^{x)}. Ограничиваясь двумя членами ряда, имеем:

$$H_z = \frac{0,1 \cdot I \cdot l}{\pi b \cdot (h_2 - h_1)} \cdot \frac{A}{\sqrt{B^2 - 4}} [\text{arc Sin } C_2 - \text{arc Sin } C_1 + \text{arc Sin } D_1 - \text{arc Sin } D_2] +$$

$$+ \frac{0,1 I \cdot l}{\pi b (h_2 - h_1)} \cdot \frac{A^3}{3(B^2 - 4)} \left[\frac{\text{Sin } \frac{\pi}{l} h_1}{B + 2 \text{Cos } \frac{\pi}{l} h_1} \left(\frac{1}{B + 2 \text{Cos } \frac{\pi}{l} h_1} + \frac{3B}{B^2 - 4} \right) - \right.$$

$$\left. - \frac{\text{Sin } \frac{\pi}{l} h_1}{B - 2 \text{Cos } \frac{\pi}{l} h_1} \left(\frac{1}{B - 2 \text{Cos } \frac{\pi}{l} h_1} + \frac{3B}{B^2 - 4} \right) - \frac{\text{Sin } \frac{\pi}{l} h_2}{B + 2 \text{Cos } \frac{\pi}{l} h_2} \left(\frac{1}{B + 2 \text{Cos } \frac{\pi}{l} h_2} + \frac{3B}{B^2 - 4} \right) + \right.$$

$$\left. \frac{\text{Sin } \frac{\pi}{l} h_2}{B - 2 \text{Cos } \frac{\pi}{l} h_2} \left(\frac{1}{B - 2 \text{Cos } \frac{\pi}{l} h_2} + \frac{3B}{B^2 - 4} \right) + \frac{1}{2\sqrt{B^2 - 4}} \cdot \left(\frac{3B^2}{B^2 - 4} - 1 \right) \cdot \right.$$

$$\left. \cdot [\text{arc Sin } C_2 - \text{arc Sin } C_1 + \text{arc Sin } D_1 - \text{arc Sin } D_2] \right],$$

где

$$A = \text{ch } \frac{\pi}{l} (x+b) - \text{ch } \frac{\pi}{l} (x-b),$$

$$B = \text{ch } \frac{\pi}{l} (x+b) + \text{ch } \frac{\pi}{l} (x-b),$$

$$C_1 = \frac{2 + B \text{Cos } \frac{\pi}{l} h_1}{B + 2 \text{Cos } \frac{\pi}{l} h_1},$$

$$C_2 = \frac{2 + B \text{Cos } \frac{\pi}{l} h_2}{B + 2 \text{Cos } \frac{\pi}{l} h_2},$$

x) Рассмотрение проведено для симметричной относительно плоскости $x=0$ пары пленок тока при $z=0$.

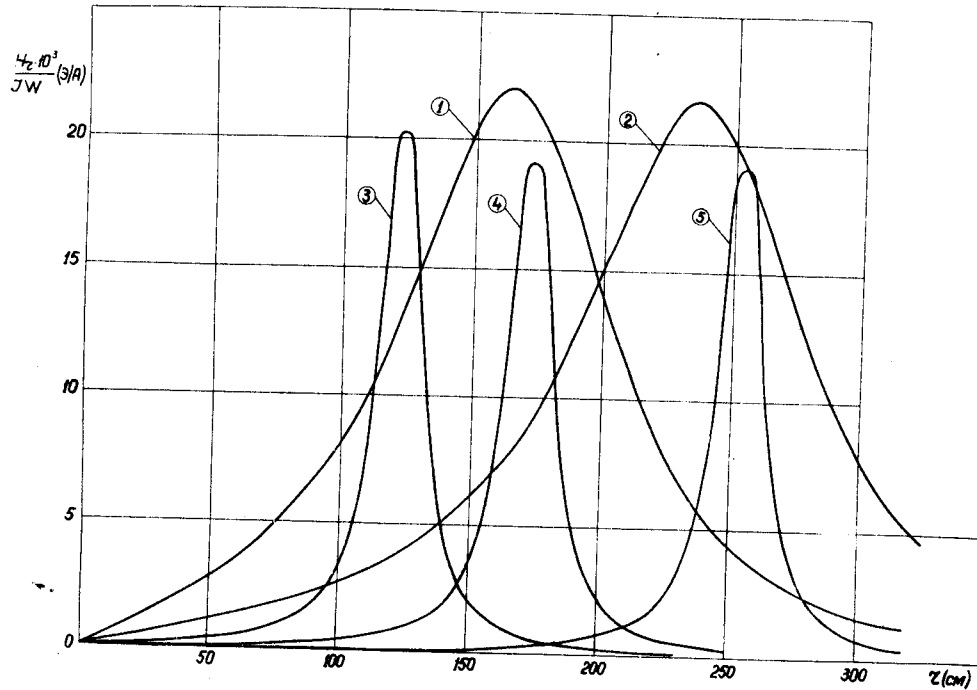


Рис. 14. Радиальная компонента поля катушек грубой и тонкой коррекции ПЦ, рассчитанная по формуле витка.

№	Параметры катушек				
	1	2	3	4	5
$R_2 - R_1$ (см)	30,0-26,2	42,5-37,5	127,5-117,5	177,5-167,5	257,5-250,0
$h_2 - h_1$ (см)	9,4-7,8	9,4-7,8			
h (см)			9,80	10,35	10,15

$$D_1 = \frac{2 - B \cos \frac{\pi}{f} h_1}{B - 2 \cos \frac{\pi}{f} h_1}$$

$$D_2 = \frac{2 - B \cos \frac{\pi}{f} h_2}{B - 2 \cos \frac{\pi}{f} h_2}$$

Расчеты показывают, что основной вклад в выражении (10) вносит первый член.

Формула (10) может быть использована для расчета магнитного поля кольцевой концентрической катушки конечной высоты с достаточно большим радиусом кривизны.

П р и л о ж е н и е II

Магнитное поле проводника при наличии ферромагнитного экрана конечной высоты.

Магнитное поле одиночного проводника - прямолинейный ток, виток - экранированное безграничным слоем ферромагнетика высотой $2c$, на расстоянии $h > 2c$ от проводника можно представить соответственно

$$H_z = 0,2I(1 - \gamma^2) \sum_{n=0}^{\infty} \gamma^{2n} \frac{x}{x^2 + (4nc+h)^2}, \quad (11)$$

$$H_z = 0,1\pi I(1 - \gamma^2) \sum_{n=0}^{\infty} \gamma^{2n} \frac{1}{\sqrt{(R+r)^2 + (4nc+h)^2}} \left\{ E_0(\alpha_n) + \frac{R^2 - r^2 - (4nc+h)^2}{(R+r)^2 + (4nc+h)^2} E_0(\alpha_n) \right\}, \quad (12)$$

где $\gamma = \frac{\mu - 1}{\mu + 1}$.

При $\mu = \infty$ ($\gamma = 1$) наступает полное экранирование $H_z = 0$, при $\mu = 1$ ($\gamma = 0$) отсутствует эффект экранирования ферромагнетиком магнитного поля проводника.

Как видно из формул (11) и (12), эффект экранирования не зависит от высоты установки экрана, а зависит лишь от магнитного состояния (μ) экрана.

Если экран не является сплошным, а имеет периодическую по радиусу и азимуту структуру (например, экран радиально-секторного или радиально-спирального типа) магнитное поле проводника может быть выражено как

$$H_z = (1 - k) H_0 + k H_1, \quad (13)$$

где H_0 - поле проводника в воздухе, H_1 - поле экранированного проводника, $k = \frac{N \cdot \Delta \phi}{2\pi}$ - коэффициент заполнения.

Л и т е р а т у р а

1. В.П. Дмитриевский, Н.Л. Заплатин, В.С. Рыбалко, Л.А. Саркисян. Определение основных параметров магнитной системы релятивистского циклотрона. Препринт ОИЯИ, 1431, Дубна, 1963.
2. В.П. Дмитриевский, Н.Л. Заплатин, В.С. Рыбалко, Л.А. Саркисян. Моделирование магнитного поля релятивистского циклотрона с пространственной вариацией на энергию протонов 700 Мэв. Препринт ОИЯИ, 1432, Дубна, 1963.
3. В.И. Данилов, Н.Л. Заплатин, В.С. Рыбалко, Л.А. Саркисян, И.В. Попова. Таблицы функций для расчета магнитных полей. Препринт ОИЯИ, Р-702, Дубна, 1961.
4. В.П. Дмитриевский, Н.Л. Заплатин, В.В. Кольга, А.А. Кропин, Лю Фу-сян, В.С. Рыбалко, Л.А. Саркисян. Метод определения положения равновесных орбит в циклотроне с пространственной вариацией магнитного поля. Препринт ОИЯИ, 1057, Дубна, 1962.
5. Б.Хэг. Электромагнитные расчеты. ГЭИ, Москва, 1934.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 июня 1964 г.