

18

11.12.63

Δ-53



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**  
**ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ**

---

В.П. Дмитриевский, Н.Л. Заплатин, В.С. Рыбалко, Л.А. Саркисян

1432

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЦИКЛОТРОНА  
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ  
НА ЭНЕРГИЮ ПРОТОНОВ 700 МЭВ

Дубна 1963

В.П. Дмитриевский, Н.Л. Заплатин, В.С. Рыбалко, Л.А. Саркисян

1432

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЦИКЛОТРОНА  
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ  
НА ЭНЕРГИЮ ПРОТОНОВ 700 МЭВ

2171/2 48

Дубна 1983

## В в е д е н и е

В последнее десятилетие в научно-исследовательских центрах многих стран проектируются и строятся ускорители с пространственной вариацией напряженности магнитного поля<sup>/1-3/</sup>. Среди этих ускорителей значительный интерес представляют ускорители циклотронного типа на энергию протонов несколько сот Мэв для генерации интенсивных пучков  $\pi$ -мезонов - так называемые мезонные генераторы.

В настоящее время около десяти циклотронов на такие энергии находятся в стадии проектирования (таблица 1). Исследования, проведенные на моделях, показали возможность ускорения в этих циклотронах протонов до энергий  $\sim 1000$  Мэв<sup>/3,4/</sup>. Получение таких энергий накладывает жесткие требования на точность формирования заданного закона магнитного поля в средней плоскости циклотрона.

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ разрабатывается релятивистский циклотрон на энергию протонов 700 Мэв с интенсивностью пучка  $\sim 500$  мка. Магнитную систему такого циклотрона предполагается выполнить на базе электромагнита синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем.

Развитие методов расчета<sup>/5-8/</sup>, измерения и стабилизации<sup>/9/</sup> магнитных полей сложных конфигураций в Лаборатории ядерных проблем позволило перейти к формированию магнитного поля на модели магнитной системы циклотрона.

В настоящей работе рассмотрено моделирование магнитной системы релятивистского циклотрона, для которого необходимый закон изменения поля в плоскости симметрии ( $z = 0$ ) задан в виде<sup>/4/</sup>:

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

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

Требуемая радиальная зависимость среднего поля и глубины вариации определяются выражениями

$$H(r) = \frac{H_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{r_\infty}\right)^2}}, \quad (2)$$

$$\epsilon(r) = \frac{N\lambda}{r} \left[ (Q^2 + \frac{r^2}{r_\infty^2 - r^2}) \cdot \frac{1 - \frac{r_\infty^2}{N^2(r_\infty^2 - r^2)}}{1 - \frac{r_\infty^2}{2N^2(r_\infty^2 - r^2)} + \frac{1}{2} \left(\frac{N\lambda}{r}\right)^2} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где  $r_\infty = \frac{E_0}{eH_0}$ ,  $Q$  - частота аксиальных колебаний.

Таблица 1

Страна	Местоположение	Энергия $W$ (МэВ)	Источники пучка	Число секторов	Угол слияния $\mu_s$	Шаг спирали $\lambda$ (см)	Радиус орбиты $r_s$ (см)	Радиус полюса $R_m$ (см)	Миним. зазор $2h_{min}$ (см)	Среднее поле $H(r_s)$ (кэ)	Дуанты	Апертура дуанта $d$ (см)	В.Ч. $f$ (МГц)	Набор энергии за оборот (кэВ/оборот)
			$I$ (кА)	$N$										
Англия	Харуэлл (Реконструкция синхротрона 175 МэВ)	240 p	100	4	78°	-	127,0	139,7	15,2	19,0	1 x 180°	5,08	-	100-150
США	Флорида	400p	100	6	65°	24	208,3	220	8(10)	15,1	4 x 60°	-	-	400
Швейцария, ФРГ	Цюрих-Франсбург на Майне	430p		6	70°	13,4	224		15	15,0	2 x 90°		32	
Швейцария	Женева (ЦЕРН)	500p	100	6	60°	28,9	300	300	35	18,0	2 x 150°	10	12,2	200
США	Лос-Алamos	500-700p	500-150	6			1036,3		78,2		2 x		3,77	400
СССР	Дубна (ОИЯИ) (Реконструкция синхротрона 680 МэВ)	700p	500	8	78°	7,7	325	350	14,8	13,8	2 x 180°	5	12,2	400
США	Лос-Алamos	700p		6	60°	44,3		480	12,7	10,0	2 x			
США	Оак-Ридж	810p	100	8			535	600	20,3	8,1	2 x	10	12,7 или 20,6	1000

4

На рис. 1 приведены зависимости аксиально-симметричного (среднего) поля  $H(r)$  и амплитуды основной гармоники поля  $\epsilon(r)H(r)$  от радиуса, рассчитанные по формулам (2) и (3) при следующих основных параметрах циклотрона:  $N=8$ ,  $\chi=7,7$ ,  $H_0=7887$  э,  $Q_s=0,24$ . Линии допусков на величину вариации поля (кривые 3) рассчитаны при допустимом изменении частоты аксиальных колебаний  $\Delta Q_s = \pm 0,09$ . При этом допуск на амплитуду вариации на конечных радиусах составляет  $\pm 1 \cdot 10^{-2}$ . Допуск на величину среднего поля определяется конечной энергией частиц и составляет  $\pm (2-3) \cdot 10^{-4}$  при максимальном наборе энергии за оборот 400 кэВ.

Предварительное определение параметров системы спиральных шимм и конфигурации полюсных наконечников электромагнита, формирующих поле вида (1), было проведено на основе расчетов и моделирования отдельных элементов магнитной системы<sup>10/</sup>. Проведенное исследование по формированию периодических магнитных полей с помощью криволинейных шимм показало, что для ускорителя на такую энергию наиболее приемлемым является выбор шимм с границами, изменяющимися по закону спирали Архимеда  $r = a\phi$  ( $a = N\lambda$  - параметр спирали). Параметры спиральных шимм -  $\lambda = 7,7$  см, высота  $2b = 25$  см и азимутальная протяженность  $\alpha = 18^\circ$  были определены путем моделирования системы прямолинейных шимм. На основе этих же экспериментов был выбран профиль системы спиральных шимм  $h_s(r)$ , формирующий необходимый закон вариации с радиусом. Для уточнения профиля системы спиральных шимм и полюсных наконечников электромагнита была создана модель магнитной системы релятивистского циклотрона в масштабе  $K = 1/6,087$  (рис. 2). Измерения на модели показали, что параметры системы, выбранные таким способом, близки к требуемым. Исследования, проведенные на модели, позволили найти конфигурацию спиральных шимм и полюсных наконечников, обеспечивающую формирование заданного закона магнитного поля в средней плоскости. При этом зависимость амплитуды вариации магнитного поля от радиуса находится в заданных допусках. Доведение среднего поля до заданных допусков предполагается осуществить с помощью токовых катушек, секторных и кольцевых шимм.

#### Моделирование магнитной системы циклотрона

Целью моделирования всей магнитной системы ускорителя являлось:

- 1) Определение допусков на параметры магнитной системы.
- 2) Уточнение профиля полюсов электромагнита для создания резонансного закона среднего магнитного поля при наличии системы спиральных шимм.
- 3) Уточнение параметров системы спиральных шимм, обеспечивающих вариацию магнитного поля в заданных допусках.

4) Определение топографии магнитного поля за предельным радиусом для решения вопросов, связанных с выводом пучка из камеры ускорителя.

5) Исследование магнитного поля токовых катушек для коррекции среднего поля.

Моделирование магнитного поля релятивистского циклотрона проводилось в зазоре электромагнита с диаметром полюсов 115 см. Коэффициент подобия был принят равным отношению диаметров полюсов релятивистского циклотрона ( $\delta$  700 см) и модели ( $\delta$  115 см) и составлял  $K = 1/6,087$ .

Принципиальная схема конструкции модели магнитной системы изображена на рис. 2. Выбор профиля полюсного наконечника электромагнита, формирующего заданный закон среднего поля (2), был проведен методом эквипотенциалей<sup>/10/</sup>. Шиммирование краевого эффекта осуществлялось за счет конечной кольцевой шиммы, которая служила продолжением полюсного наконечника. Для придания жесткости камере эта шимма крепилась к дискам из нержавеющей стали. Для изменения радиальной зависимости среднего поля на профиле полюса был предусмотрен набор дисков и кольцевых шимм.

Распределение среднего поля от радиуса для профиля полюсного наконечника электромагнита (без системы спиральных и конечных кольцевых шимм) изображено на рис. 3 (кривая 6). Максимум среднего поля достигается на  $r = 51$  см при росте поля ~ 34%.

Спиральные шиммы крепились болтами к дискам из нержавеющей стали, которые вместе с конечными кольцевыми шиммами служили крышками цилиндрической камеры (рис. 4, 5). Профилирование спиральных шимм было связано с формированием закона вариации (3) в заданных допусках. Проведенные оценки показали, что рост среднего магнитного поля за счет профилирования системы спиральных шимм может составлять ~ 15%. При наличии конечной кольцевой шиммы выбранная магнитная система должна обеспечить необходимый градиент магнитного поля на предельных радиусах модели ~ 500 э/см.

Геометрические размеры полюсных наконечников модели были выполнены с точностью  $\pm 0,5$  мм.

Соосность дисков и спиральных шимм обеспечивалась с точностью 0,2 мм. Зеркальность верхних спиральных шимм относительно нижних достигалась за счет высокой степени соосности и азимутальной установки верхнего диска относительно нижнего с точностью 0,01°.

Ввиду сильной зависимости вариации поля от зазора между спиральными шиммами особенно жесткие требования предъявлялись к точности изготовления ступенчатого профиля системы спиральных шимм. На модели магнитной системы этот профиль

контролировался специальным индикаторным устройством. Точность выполнения профиля системы спиральных шимм составляла  $\pm 0,05$  мм.

Ошибки изготовления и установки элементов магнитной системы могут привести к появлению недопустимых возмущений в законе магнитного поля (низшие гармоники, искажение медианной поверхности). Оценим максимальное возмущение поля, которое может возникнуть в плоскости  $z = 0$  от системы спиральных шимм, параметры которых выполнены с точностью  $a \pm \Delta a$ ,  $h \pm \Delta h$ ,  $\phi \pm \Delta \phi$ ,  $\frac{2\pi}{N} \pm \Delta \phi$ . В этом случае возможные гармоники поля с точностью до членов второго порядка малости можно найти из выражения

$$|H_m| = 4M e^{-m \frac{h}{a}} \left\{ \sin \frac{m\alpha}{2} \left( r \frac{|\Delta a|}{a^2} + \Delta \phi \right) \sum_{n=1}^N \sin m \left( \phi + n \frac{2\pi}{N} - \frac{r}{a} \right) + \left[ \sin \frac{m\alpha}{2} \left( \frac{|\Delta h|}{a} + \frac{h}{a} \frac{|\Delta a|}{a} \right) + \frac{\Delta a}{2} \cos \frac{m\alpha}{2} \right] \sum_{n=1}^N \cos m \left( \phi + n \frac{2\pi}{N} - \frac{r}{a} \right) \right\}, \quad (4)$$

где  $4\pi M$  - намагниченность спиральной шиммы.

Среднее значение  $H_r$  - составляющей в плоскости  $z = 0$  для наилучшего распределения ошибок  $\Delta a > 0$ ,  $\Delta h_1 > 0$  при  $0 < r < R$  и  $\Delta a < 0$ ,  $\Delta h_1 < 0$  при  $R < r < R_k$  можно оценить по формуле<sup>/11/</sup>:

$$|H_r(r)| = \frac{4MN}{\pi} \left\{ \frac{|\Delta a|}{2} \sqrt{\frac{R}{r}} [Q_{\frac{1}{2}}(x_1) - Q_{\frac{1}{2}}(x_2)] + |\Delta h_1| \frac{a}{2} \frac{1}{r\sqrt{rR}} [h_1 Q'_{\frac{1}{2}}(x_1) - h_2 Q'_{\frac{1}{2}}(x_2)] \right\}, \quad (5)$$

где  $Q_{\frac{1}{2}}(x)$  - сферическая функция Лежандра II -го рода от аргумента  $x = \frac{R^2 + r^2 + h^2}{2Rr}$ .

Так, при изготовлении и установке спиральных шимм на модели с точностью  $\Delta a = \pm 0,03^\circ$ ,  $\Delta h_1 = \pm 0,05$  мм,  $\Delta a = \pm 0,1$  мм и  $\Delta \phi = \pm 0,05^\circ$  в плоскости  $z = 0$  радиальная составляющая поля может достигь 9э. Амплитуды первой и искажения основной гармоник поля, рассчитанные по формуле (4) для этих величин, приведены в таблице II.

Т а б л и ц а II

	$\Delta a = \pm 0,03^\circ$	$\Delta h_1 = \pm 0,05$ мм	$\Delta a = \pm 0,1$ мм	$\Delta \phi = \pm 0,05^\circ$
$H_1$ (э)	7,5	2,2	2,1	4,0
$\delta H_1$ (э)	1,2	8,9	6,7	9,0

Однако ошибки экспериментального определения топографии магнитного поля модели превышают возмущения поля, обусловленные геометрическими неточностями системы, приведенными в таблице II. Это связано с достигнутой точностью установ-

ки датчика магнитометра в полях с градиентом  $\sim (2000-3500)$  э/см. Применение магнитометра, основанного на явлении ядерного резонанса<sup>/9/</sup> в полях с такими градиентами, оказалось невозможным, и измерение топографии магнитного поля проводилось прибором, основанным на эффекте Холла<sup>x)</sup>. Термостатирование датчика и потенциометрический метод измерения разности потенциалов на кристалле, а также высокая точность поддержания продольного тока через кристалл позволили получить точность измерения поля  $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ . Размеры кристалла составляли  $(0,3 \times 1,2 \times 1,8 \text{ мм})$ , что обеспечивало практически точечные измерения.

Датчик магнитометра устанавливался на измерительную штангу (рис. 5), которая обеспечивала установку датчика по радиусу, по азимуту и по вертикали с точностью  $\pm 0,1 \text{ мм}$ ,  $\pm 0,01^\circ$  и  $\pm 0,5 \text{ мм}$ , соответственно. Для исключения ошибок, связанных с нестабильностью магнитного поля, был применен стабилизатор, основанный на явлении ядерной индукции<sup>/9/</sup>, который обеспечивал стабильность поля  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ .

Максимальная ошибка измерения поля в точке на модели магнитной системы достигала  $\pm (30-40)$  э, а точность определения среднего поля и амплитуды восьмой гармоники, получаемая из азимутальных измерений по 48 точкам на периоде  $2\pi$  составляла  $\pm (10-15)$  э<sup>xx)</sup>.

Для релятивистского циклотрона на энергию протонов 700 Мэв раздельное формирование среднего поля и вариации оказывается невозможным. Это связано с тем, что магнитное состояние спиральных шимм не доведено до насыщения. Поэтому формирование поля (1) в средней плоскости модели магнитной системы циклотрона включало в себя несколько этапов последовательного приближения к заданным законам среднего магнитного поля и амплитуды основной гармоники.

На рис. 3 приведены зависимости амплитуды основной гармоники и среднего магнитного поля от радиуса, полученные в первых экспериментах на модели. Видно, что вариация магнитного поля (кривая 1') за исключением конечных радиусов, лежит внутри заданных допусков. Это указывает на то, что параметры магнитной системы, выбранные на основе предварительных расчетов и моделирования отдельных элементов системы, близки к требуемым. Однако принятое разбиение гладкого профиля на 11 ступенек нельзя считать удовлетворительным из-за наличия недопустимых отклонений градиента вариации от требуемого и ступенчатого характера зависимости среднего поля от радиуса. Это указывает на необходимость уменьшения радиальной протяженности ступенек профиля.

---

x) В настоящее время в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ разработан ядерный магнитометр, позволяющий измерять магнитные поля с градиентами до 4000 э/см, который будет использован в дальнейших работах по моделированию магнитного поля РЦ.

xx) В настоящее время ведутся работы по определению необходимого числа измеряемых точек на периоде для достижения заданной точности по среднему полю, основной и высшим гармоникам.

Пересечение кривой  $H_z(r)$  с линией  $\epsilon_{min}(r)H(r)$ , соответствующей  $Q_z = 0$ , находится на радиусе  $r = 4$  см. Это означает, что для релятивистского циклотрона аксиальная фокусировка частиц будет начинаться уже с радиуса  $r = 24$  см. На конечных радиусах модели  $\Delta r = (51-54)$  см наблюдается резкий рост амплитуды вариации. Такое увеличение вариации характерно для спиральных шимм, у которых угол между радиусом и касательной к осевой линии спирали на конечных радиусах  $\mu_k = \arctg \frac{r_k}{N\lambda}$  отличается незначительно от  $\pi/2$ . Так, например, в циклотроне с постоянным зазором между спиралями  $2h_1 = 8$  см при  $\mu_k = 84^\circ$  ( $N = 4$ ,  $\lambda = 1,37$  см) амплитуда вариации возросла в 1,5 раза, а при  $\mu_k = 75^\circ$  ( $N = 6$ ,  $\lambda = 2,7$  см) этот эффект был уже незначителен  $^{1/2}$ . Увеличение вариации вызывается тем, что фаза основной гармоники на конечных радиусах отклоняется от закона спирали Архимеда, что эквивалентно увеличению значения параметра  $\lambda_{эф} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + (\frac{N\lambda}{r})^2}}$   $^{1/2}$ . Для модели магнитной системы ( $\mu_k = 79^\circ$ ) оценить вклад этого эффекта трудно из-за роста амплитуды вариации за счет профилирования зазора между спиральными шиммами. Распределение среднего магнитного поля отличается от резонансной кривой в интервале радиусов  $\Delta r = (24-55)$  см на величину  $\pm 300$  э. При этом градиент поля близок к требуемому вплоть до радиуса  $r = 55$  см. Существенное отклонение среднего магнитного поля от резонансного в центральной области ( $\sim 2000$  э) обусловлено уменьшением зазора между спиральными шиммами и увеличением их намагниченности на этих радиусах. Из рисунка видно несовпадение радиусов экстремальных значений  $H(r)$  и  $H_z(r)$  ( $\Delta r = 2,5$  см), что является нежелательным для решения вопросов, связанных с выводом частиц из камеры ускорителя. Для иллюстрации различных способов шиммирования среднего магнитного поля на рис. 3 приведены экспериментальные кривые 2, 3, 4 и 5.

а) Кривые 2 и 2' соответствуют полю модели магнитной системы, в которой зазор между спиральными шиммами  $2h_1$  в интервале радиусов  $\Delta r = (1,2-12,5)$  см увеличен с 2,4 см до 2,9 см;

б) Зависимость  $H(r)$  (кривая 3) получена как за счет изменения зазора между спиралями (пункт а), так и за счет увеличения зазора между полюсами электромагнита в центральной области с 20 см до 26 см;

в) Кривая 4 отличается от кривой 2 на величину поля от системы токовых катушек;

г) Кривая 5 описывает магнитное поле системы при уменьшении высоты спиральных шимм за счет изменения параметра  $h_2$  с 5,3 см до 4,6 см в интервале радиусов  $\Delta r = (1,2-4,8)$  см.

Из анализа этих кривых можно сделать следующие выводы:

1) Формирование резонансного среднего поля путем изменения параметра  $h_1$

нецелесообразно, так как вызывает ухудшение характера радиальной зависимости  $H_z(r)$  в центральной области. Так, уменьшение среднего поля на величину  $\sim 800$  э приводит к смещению точки пересечения кривых  $H_z(r)$  и  $\epsilon_{min}(r)H(r)$  с 4 см до 5,5 см.

2) Увеличение зазора между полюсами электромагнита в центральной области является малоэффективным. Изменение зазора с 20 см до 28 см на модели приводит к относительно малому ( $\sim 200$  э) уменьшению среднего магнитного поля. Отметим, что для релятивистского циклотрона этот способ неприменим из-за конструктивных особенностей электромагнита синхротронного Лаборатории ядерных проблем.

3) Наиболее приемлемым способом формирования среднего магнитного поля является изменение параметра  $h_2$  системы спиральных шимм. Такой способ позволяет в достаточно широких пределах шиммировать среднее магнитное поле без существенного изменения вариации. Однако этим методом невозможно полностью сформировать резонансное поле при соблюдении требований к вариации в центральной области. Поэтому выбор параметра  $h_2$  спиральных шимм должен удовлетворять требованию максимального приближения формируемого среднего поля к заданному с таким расчетом, чтобы оставшееся отклонение могло быть легко скомпенсировано с помощью токовых катушек.

4) Применение токовых катушек является необходимым для формирования заданного закона поля в требуемых допусках.

Предварительные эксперименты на модели показали, что токовые катушки радиальной протяженности  $\Delta r = (2,5-24,5)$  см, расположенные на крышках камеры, при линейной плоскости тока  $i = 270$  А/см обеспечивают градиент магнитного поля  $\sim 10$  э/см.

На рис. 8 приведены кривые вариации и среднего поля для двух последующих этапов шиммирования. Видно, что измененный профиль системы спиральных шимм  $h_2(r)$ , приведенный на этом рисунке, позволил устранить недопустимые градиенты вариации и ступенчатый характер зависимости среднего поля  $H(r)$ . Профилирование параметра  $h_2(r)$  позволило уменьшить отклонение среднего поля от заданного в центральной области модели до величины  $\sim 1000$  э. Изменение профиля  $h_2(r)$  на конечных радиусах и увеличение зазора между конечными кольцевыми шиммами на 2,0 см позволило практически совместить радиусы экстремальных значений  $H(r)$  и  $H_z(r)$  (кривые 2).

Результаты последнего этапа формирования поля модели приведены на рис. 7. Максимальное отклонение среднего магнитного поля от резонансного закона не превышает  $\pm 50$  э, за исключением области  $\Delta r = (0-25)$  см. Распределение среднего поля

$H(r)$  в центральной области может быть доведено до резонансного за счет токового шиммирования. Это показывает кривая 2, которая получена расчетным способом на основании экспериментально найденного распределения поля токовых катушек, упомянутых выше. Отклонение вариации магнитного поля от требуемой в интервале радиусов  $\Delta r = (8-30)$  см будет также скомпенсировано за счет изменения намагниченности спиральных шимм при шиммировании среднего поля с помощью токов. Для конечных радиусов  $\Delta r = (51-54)$  см отличие амплитуды восьмой гармоники от заданной превышает допустимые величины и достигает  $\sim 300$  э на  $r_k = 53,4$  см. Это частично связано с увеличением параметра  $\lambda$ , что видно из отклонения фазы основной гармоники поля от линейной зависимости  $\phi = \frac{r}{N\lambda}$  (рис. 8). Отклонение фазы на  $r_k = 53,4$  см составляет  $1^\circ$ , что соответствует увеличению  $\lambda$  до значения  $\lambda = 8,0$  см. Согласно (3), рост  $\lambda$  вызывает дополнительное увеличение требуемой глубины вариации  $\epsilon(r)$ . Так, на  $r_k = 53,4$  см эта дополнительная величина вариации составляет  $\sim 160$  э. Отметим, что это отклонение фазы (увеличение  $\lambda$ ) на  $r_k$  может быть устранено путем увеличения конечного радиуса спиральных шимм  $R_k = 55,0$  см.

Для начальных радиусов вариация вполне удовлетворяет заданным требованиям, причем пересечение кривой  $H_z(r)$  с линией  $\epsilon_{min}(r)H(r)$  находится на  $r = 4$  см. Для полной характеристики топографии магнитного поля модели на рис. 9 приведены распределения вариации с среднего поля для радиусов, превышающих предельный рабочий радиус  $r_k$ .

Таким образом, на основе полученных результатов на модели магнитной системы релятивистского циклотрона найдена конфигурация спиральных шимм и полюсных накопителей, обеспечивающая формирование заданного закона магнитного поля в средней плоскости.

Параметры спиральных шимм и полюсов электромагнита релятивистского циклотрона на энергию протонов 700 Мэв приведены в таблицах III, IV, V, VI.

Т а б л и ц а III

Основные параметры магнитной системы

Число спиралей	$N = 8$
Параметр спирали	$\lambda = 7,7$
Угловая протяженность спиральной шиммы	$\alpha = 18^\circ$
Начальный радиус системы спиральных шимм	$R_n = 2,5$ см
Конечный радиус системы спиральных шимм	$R_k = 335$ см
Минимальный зазор между спиральными шиммами	$2h_{min} = 14,6$ см
Максимальный зазор между спиральными шиммами	$2h_{max} = 22,0$ см



Высота спиральных шимм	$2b = (8 \pm 25)$ см
Диаметр полюсного наконечника электромагнита	$\phi = 700$ см
Расстояние между полюсами электромагнита в центре	$2h_{max} = 244$ см
Расстояние между полюсами электромагнита на краю	$2h_{min} = 131$ см
Зазор между конечными кольцевыми шиммами	$2h_1 = 20$ см
Высота конечных кольцевых шимм	$2b = 46,4$ см
Радиальная протяженность конечных кольцевых шимм	$\Delta R = (335 - 350)$ см

### З а к л ю ч е н и е

В результате исследования, проведенного на модели, уточнены параметры магнитной системы релятивистского циклотрона на энергию протонов 700 Мэв, выбранные ранее в работе /10/.

Найден профиль системы спиральных шимм  $h_1(r)$ , обеспечивающий необходимую радиальную зависимость амплитуды основной гармоники поля в заданных допусках.

Выбран окончательный профиль полюсных наконечников электромагнита, формирующий совместно с системой спиральных шимм резонансное среднее поле с точностью  $\pm 50$  э, за исключением центральной области.

На основании результатов работы можно сделать вывод, что формирование резонансного среднего поля с помощью ферромагнитных элементов магнитной системы в основном закончено. Дальнейшее формирование среднего поля должно осуществляться за счет применения токовых катушек.

В настоящее время для модели изготовлено 11 пар токовых катушек, которые располагаются за спиральными шиммами (рис. 10). Оценки и предварительные эксперименты показали, что линейная плотность тока в этих катушках должна составлять  $\sim 900$  а/см в центральной области и  $\sim 400$  а/см на конечных радиусах. Параметры этих катушек позволяют промоделировать токовые обмотки, предусмотренные в магнитной системе релятивистского циклотрона.

Авторы выражают благодарность В.П. Джелепову, Б.И. Замолдчикову за постоянное внимание к работе, ценные обсуждения и замечания, Д.П. Василевской, Л.В. Васильеву, Ю.Н. Денисову за обеспечение надежной работы аппаратуры для измерений и стабилизации магнитного поля; К.А. Байчеру, В.В. Куликову и Н.И. Семенову за конструирование и изготовление модели магнитной системы циклотрона.

Т а б л и ц а IV

Профиль системы спиральных шимм  $h_1(r)$

$\Delta r$ (см)	2,5-80,9	80,9-87,0	87,0-73,0	73,0-79,1	79,1-85,2	85,2-91,3	91,3-97,4	97,4-105,0
$h_1$ (см)	7,30	7,49	7,79	8,10	8,40	8,70	9,01	9,37
$\Delta r$ (см)	105,0-112,8	112,8-124,8	124,8-140,0	140,0-155,2	155,2-228,3	228,3-240,4	240,4-252,6	252,6-264,8
$h_1$ (см)	9,88	10,29	10,59	10,83	11,02	10,90	10,71	10,47
$\Delta r$ (см)	264,8-275,1	275,1-283,0	283,0-289,1	289,1-295,2	295,2-301,3	301,3-307,4	307,4-313,5	313,5-319,6
$h_1$ (см)	10,23	9,98	9,74	9,50	9,31	9,13	8,95	8,76
$\Delta r$ (см)	319,8-325,6	325,6-330,2	330,2-335,5					
$h_1$ (см)	8,58	8,03	7,87					

Т а б л и ц а V

Профиль системы спиральных шимм  $h_2(r)$

$\Delta r$ (см)	2,5-38,5	38,5-48,7	48,7-80,9	80,9-73,0	73,0-85,2	85,2-97,4	97,4-335,0
$h_2$ (см)	15,22	16,26	21,30	24,35	27,39	30,43	32,5

Т а б л и ц а VI

Профиль полюсных наконечников электромагнита  $h_m(r)$

$\Delta r$ (см)	0 - 152	152 - 183	183-213	213-243	243-274	274-304	304-350
$h_m$ (см)	121,7	115,6	106,5	100,4	87,4	81,3	85,7

Л и т е р а т у р а

1. Sector-focused Cyclotrons, Proceedings of an Informal Conference, Sea Island, Georgia, February 2-4 (1959) F.T.Howard, editor.
2. International Conference on High-Energy Accelerators and Instrumentation. CERN (1959).
3. Nuclear Instr. and Meth. 18, 19 (1962).
4. Д.П.Василевская, А.А.Глазов, В.И.Данилов и др. Циклотрон с пространственной вариацией напряженности магнитного поля. Атомная энергия, 8, 657 (1959); 8, 3, 189-200 (1960).
5. В.И.Данилов, Н.Л.Заплатин, В.С.Рыбалко, Л.А.Саркисян. Формирование аксиально-симметричных магнитных полей с помощью кольцевых шимм. Сб. "Ускорители". Атомиздат, 1962.
6. В.И.Данилов, Н.Л.Заплатин, В.С.Рыбалко, Л.А.Саркисян. Формирование периодических магнитных полей с помощью криволинейных шимм. Препринт ОИЯИ Р-409, Дубна, 1959.
7. В.И.Данилов. Формирование магнитных полей для ускорителей с пространственной вариацией. Диссертация, Дубна, 1959.
8. В.И.Данилов, Н.Л.Заплатин, И.В.Попова, В.С.Рыбалко, Л.А.Саркисян. Таблицы функций для расчета магнитных полей. Препринт ОИЯИ Р-702, Дубна, 1961.
9. Ю.Н.Денисов. Измерение и стабилизация магнитных полей ускорителей с пространственной вариацией поля. Диссертация, Дубна, 1959.
10. В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, В.С.Рыбалко, Л.А.Саркисян. Определение основных параметров магнитной системы релятивистского циклотрона. Препринт ОИЯИ 1431, Дубна, 1963 г.
11. 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.
12. В.И.Данилов, В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга, Лю Нэ-чуань, В.С.Рыбалко, Л.А.Саркисян. Формирование магнитного поля циклотрона с пространственной вариацией. Препринт ОИЯИ Р-373, Дубна, 1959.

Рукопись поступила в издательский отдел  
9 октября 1963 г.

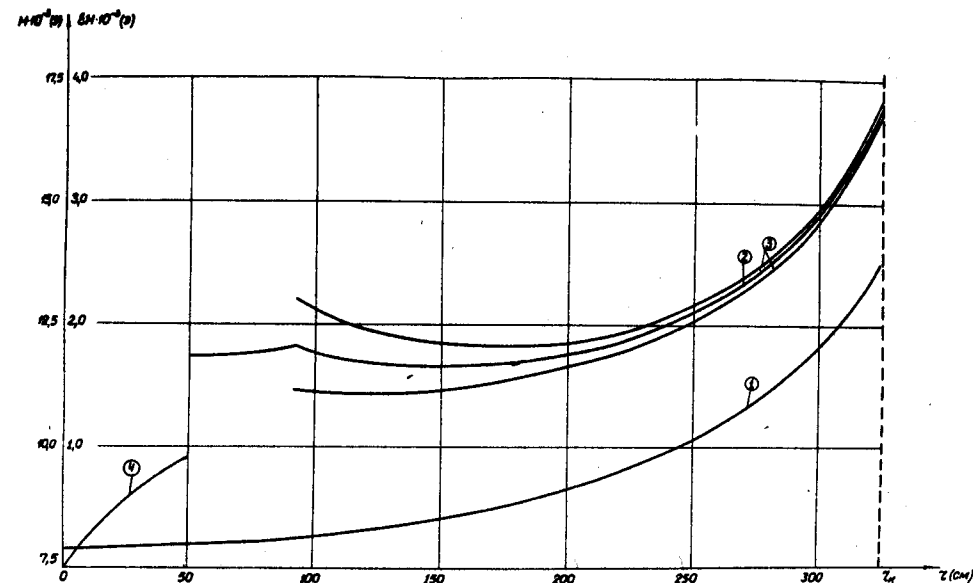


Рис. 1. (1)-(2) Зависимость среднего магнитного поля и вариации от радиуса для спирального циклотрона на энергии протонов 700 Мэв.  
(3) Линии допусков на величину вариации поля при  $\Delta Q_z = \pm 0,09$   
(4) Кривая  $\epsilon_{min} H(z)$ , соответствующая  $Q_z = 0$ .

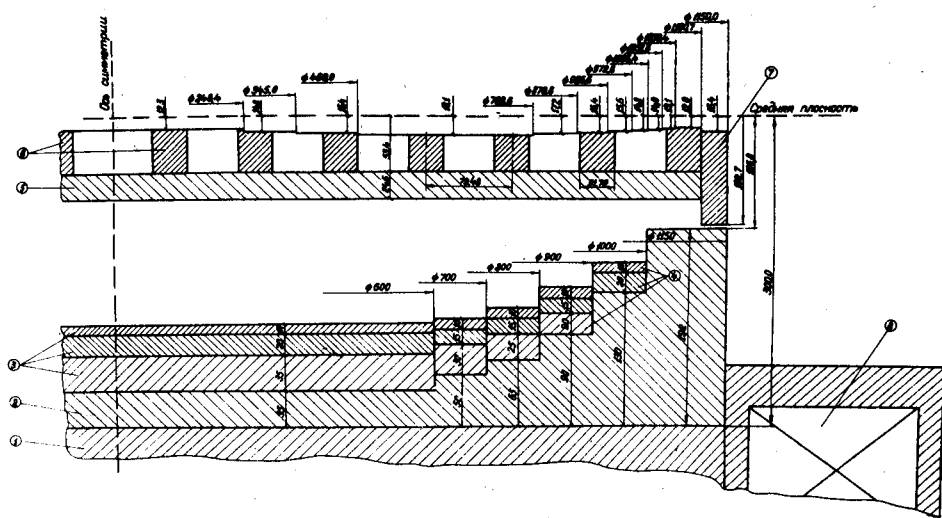


Рис. 2. Схема расположения спиральных и кольцевых шимм в модели магнитной системы.

- (1) - Полюс электромагнита.
- (2) - Профилированный полюсной наконечник.
- (3) - Дисковые шиммы.
- (4) - Кольцевые шиммы.
- (5) - Диск из нержавеющей стали.
- (6) - Спиральные шиммы.
- (7) - Конечная кольцевая шимма.
- (8) - Обмотка электромагнита.

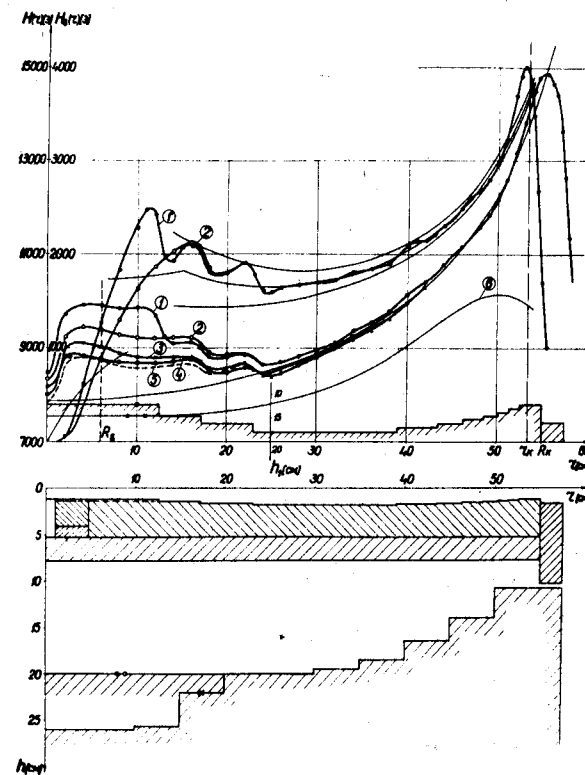


Рис. 3. Зависимости амплитуды основной гармоники и среднего магнитного поля от радиуса, полученные в первых экспериментах на модели.

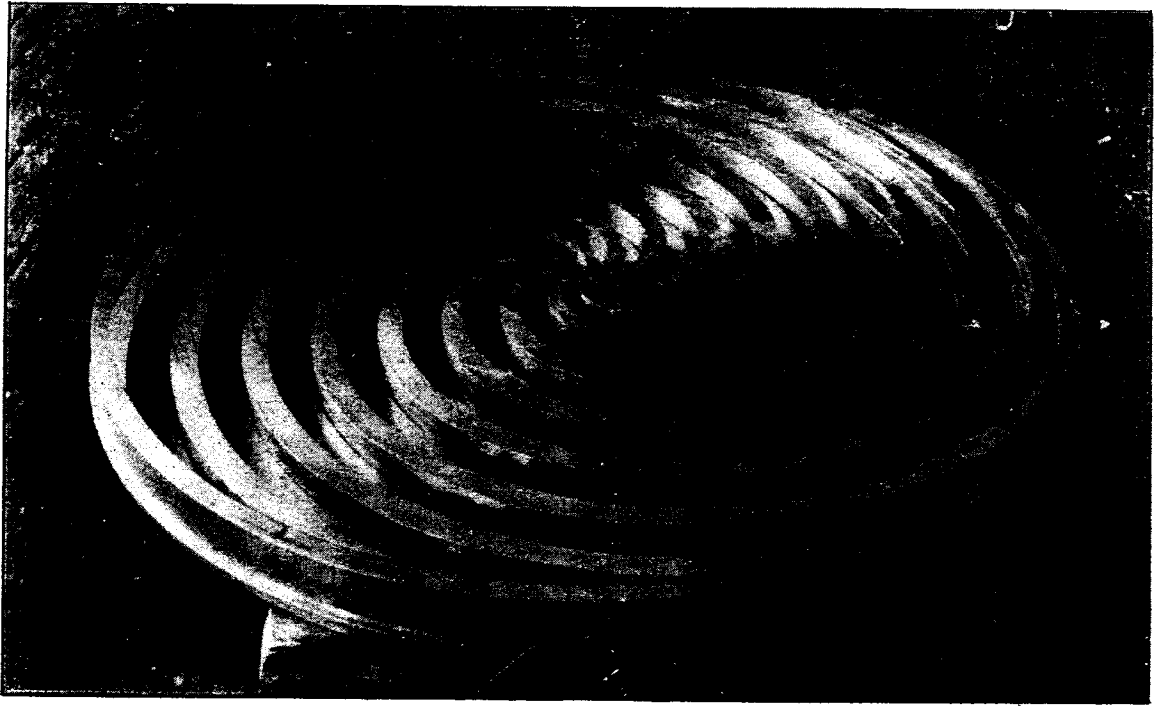


Рис. 4. Система спиральных шимм и конечная кольцевая шимма.

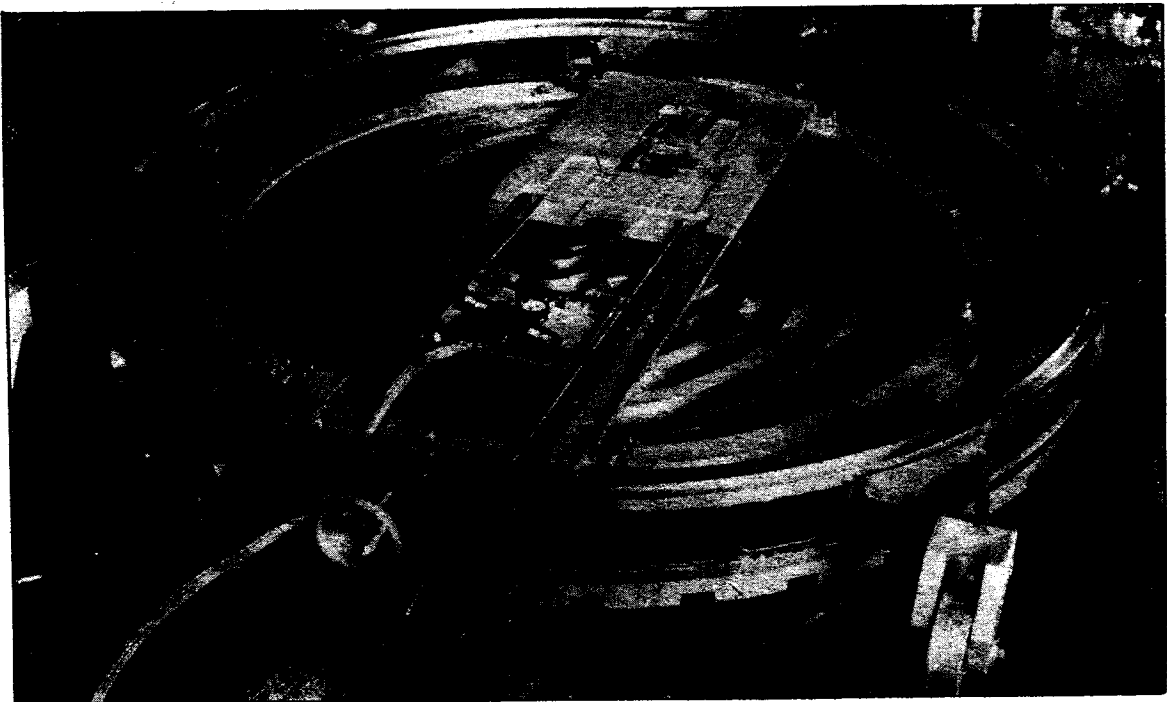


Рис. 5. Камера магнитной системы с измерительным приспособлением.

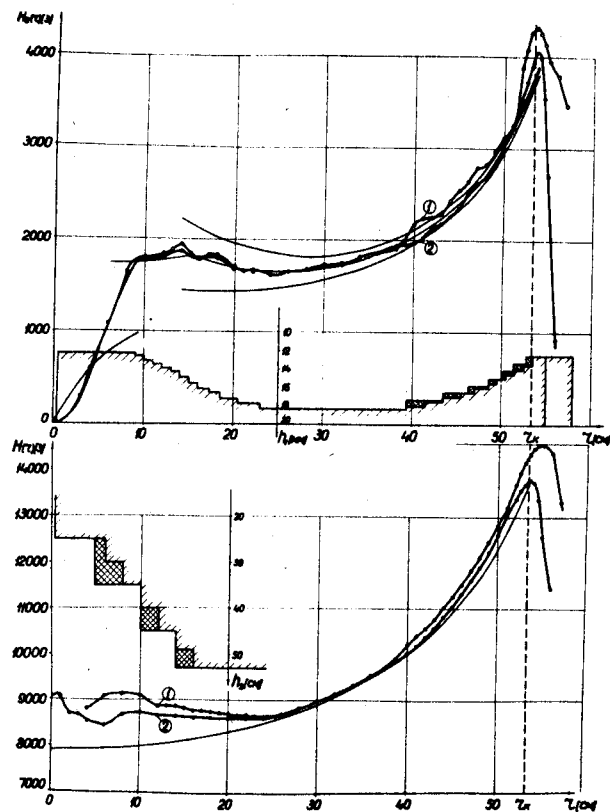


Рис. 6. Зависимости амплитуды основной гармоники и среднего магнитного поля от радиуса для двух этапов формирования магнитного поля модели.

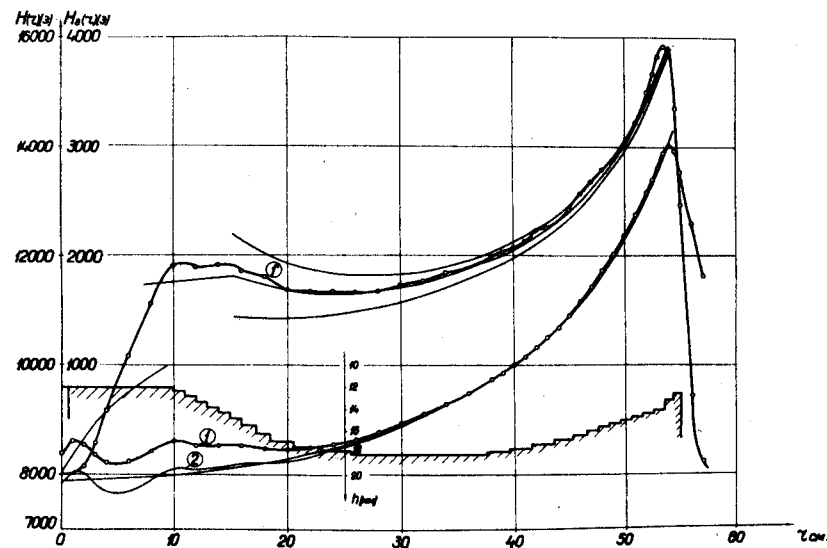


Рис. 7. Зависимости амплитуды основной гармоники и среднего магнитного поля от радиуса для последнего этапа формирования поля модели магнитной системы.

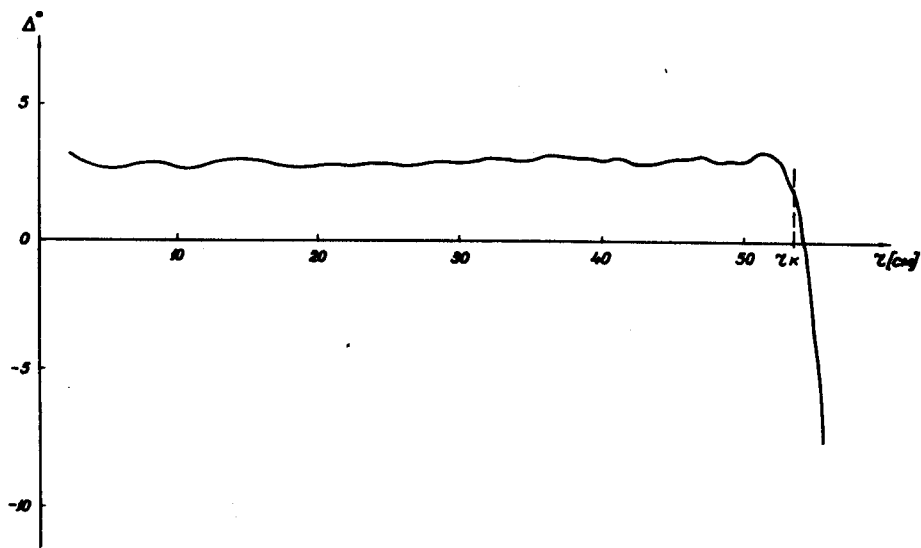


Рис. 8. Зависимость отклонения фазы основной гармоники магнитного поля от линейного закона  $\varphi = \frac{z}{N\lambda}$  вдоль радиуса.

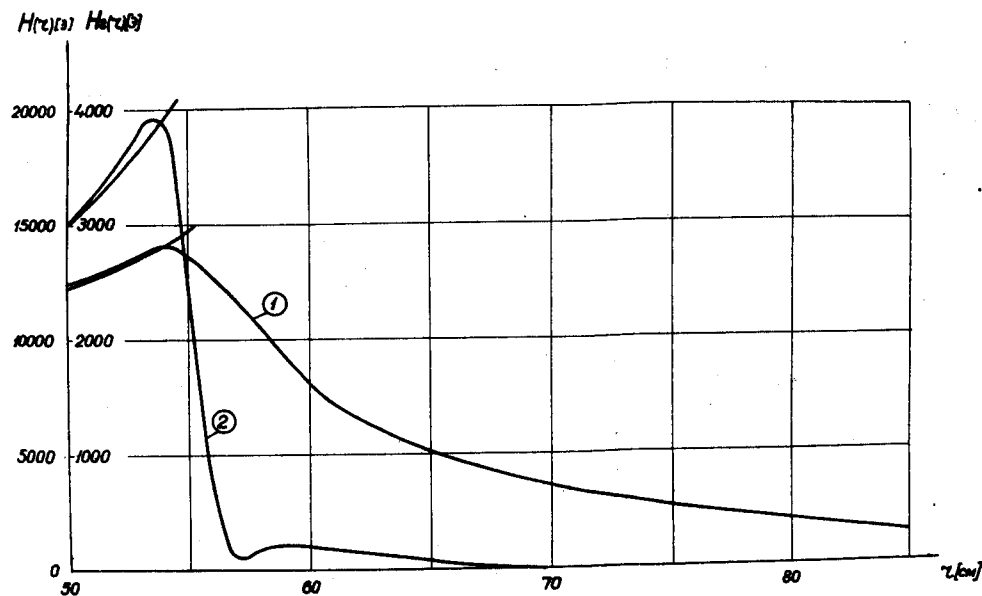


Рис. 9. Зависимости амплитуды основной гармоники и среднего магнитного поля от радиуса для  $z > z_k$ .

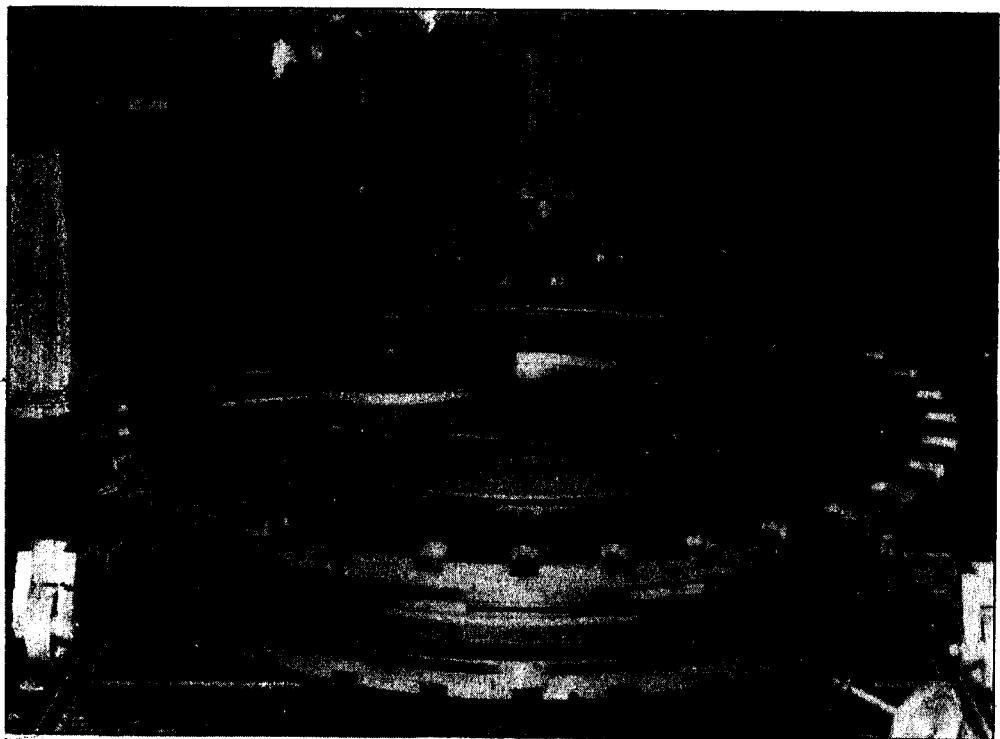


Рис.10. Система II пар токовых катушек модели циклотрона.