

с 345с4

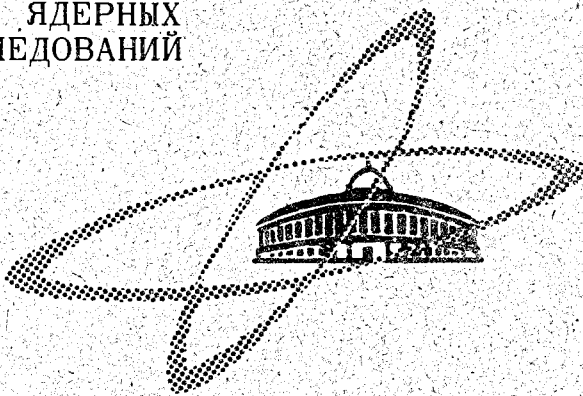
B-751

11/18

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

9 - 4517



С.Б.Ворожцов, Н.И.Дьяков, Н.Л.Заплатин

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
ФАЗОТРОНА С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ (УСТАНОВКА "Ф")

1969

9 - 4517

С.Б.Ворожцов, Н.И.Дьяков, Н.Л.Заплатин

**ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
ФАЗОТРОНА С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ (УСТАНОВКА "Ф")**

Объединенный институт
ядерных исследований
Библиотека

7934/1, 14.

В настоящее время во многих лабораториях мира ведутся исследования, связанные с реконструкцией действующих синхротронов /1/.

Для синхротронов на энергии протонов 400–700 Мэв увеличение интенсивности за счет повышения высокочастотного напряжения на дуанте (и как следствие этого – рост частоты модуляции ускоряющего напряжения) с помощью создания более совершенных частотно-модулирующих систем представляется крайне затруднительным.

Усовершенствование синхротрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, максимальная энергия которого на предельном радиусе составляет 680 Мэв при интенсивности протонов 2,3 мка, предполагается осуществить путем введения в магнитное поле пространственной вариации. Как показано в работе /2/, такая модификация синхротрона позволит увеличить ток протонов до 30+50 мка.

Одним из наиболее сложных и трудоемких моментов создания модифицированного синхротрона-фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля (установка "Ф") является формирование требуемого магнитного поля.

Для установки "Ф" закон изменения магнитного поля в цилиндрической системе координат для плоскости симметрии ($Z=0$) выбран в виде

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

где $H(r)$ – среднее магнитное поле, $\epsilon_N(r) = \frac{H_N(r)}{H(r)}$ – глубина вариации поля, $2\pi\lambda$, N – радиальный шаг и периодичность структуры магнитного поля.

Магнитное поле фазотрона, как и в случае разработанного ранее проекта релятивистского циклотрона, может быть сформировано в зазоре электромагнита действующего синхроциклотрона с помощью системы спиральных и кольцевых шимм, располагаемых между полюсными наконечниками.

Методика выбора основных параметров магнитной системы для формирования требуемого поля разработана и изложена в /3/, где показано, что амплитуда вариации магнитного поля системы спиральных шимм достаточно хорошо описывается выражением, полученным из рассмотрения поля от бесконечной системы прямолинейных шимм:

$$H_{mN}(r) = \frac{8M}{\pi} \sin mN \frac{\alpha}{2} \left(e^{-m \frac{h_1}{\lambda} \alpha \phi} - e^{-m \frac{h_2}{\lambda} \alpha \phi} \right). \quad (2)$$

Здесь $4\pi M$ - намагниченность шимм, h_1 и h_2 - расстояния до поверхностей, ограничивающих шиммы в вертикальном направлении, α - азимутальная протяженность спиральной шиммы - угол между боковыми образующими, $\lambda_{\alpha\phi} = \lambda / \sqrt{1 + \left(\frac{N\lambda}{r}\right)^2}$, $m=1,2,3\dots$

Используя это выражение, проанализируем возможность создания вариации при различных N и λ при выполнении следующих ограничений:

1. Минимальный зазор между элементами магнитной системы по вертикали определяется требованиями к высокочастотной системе ускорителя и не должен быть меньше 30 см.

2. Максимальный размер между полюсными наконечниками электромагнита составляет 120 см.

Предварительное рассмотрение показало, что наиболее трудные условия создания вариации встретятся в зоне малых радиусов. На рис. 1 приведены зависимости требуемых и рассчитанных по формуле (2) амплитуд гармоник от параметра спирали λ при двух значениях $N=4$ и $N=6$ для $r=100$ см. В этих расчетах величина намагниченности принималась равной $4\pi M = 15000$ гс при оптимальной толщине шимм $\alpha = \frac{\pi}{N}$, расстоянию между спиральными шиммами по вертикали $2h_1 = 30$ см и их высоте $2b = h_2 - h_1 = 25$ см. Из рисунка видно, что при $N=6$ нельзя получить требуемой величины вариации при ограничениях,

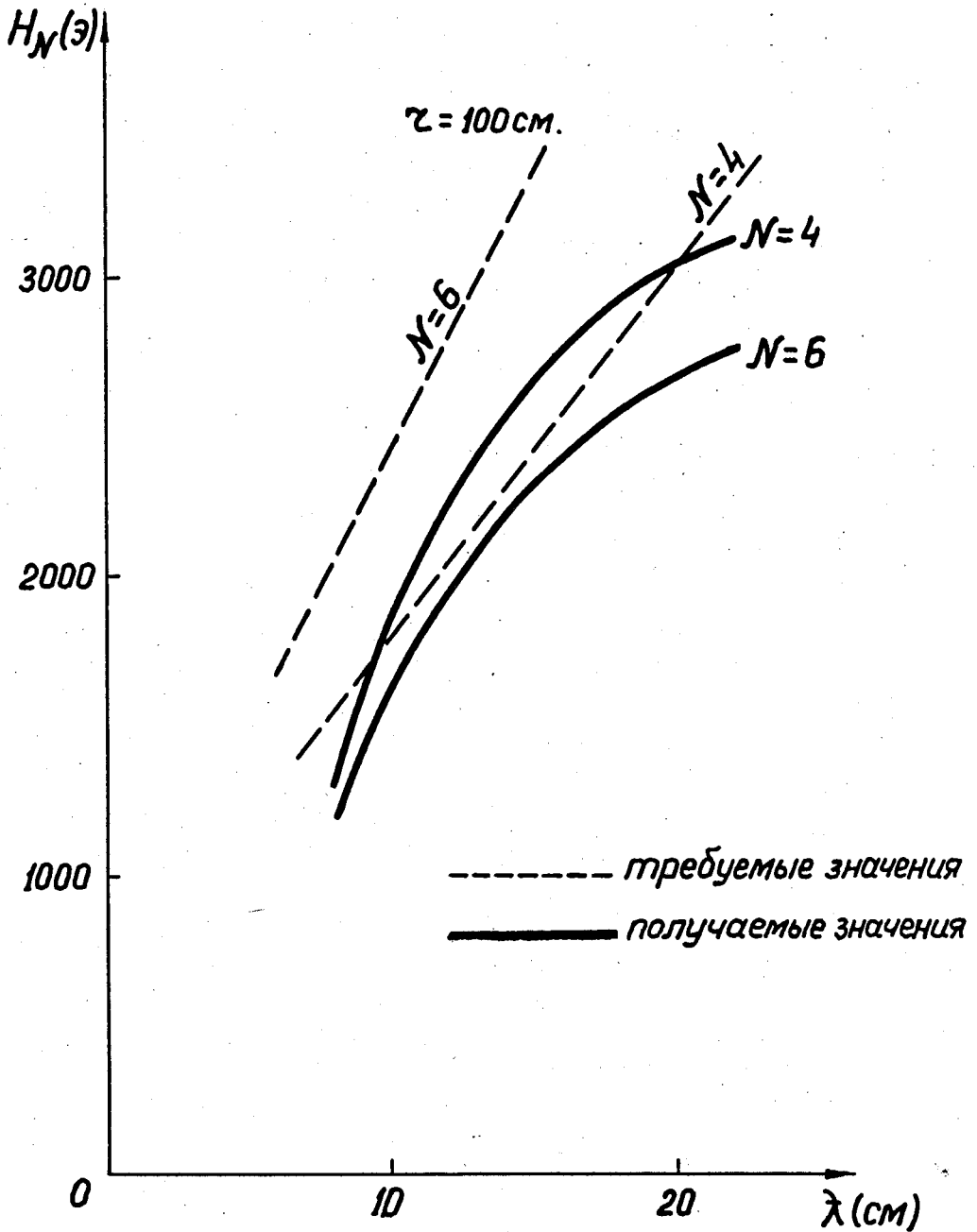


Рис. 1

накладываемых на полузазор между спиральными шиммами ($h_1 \geq 15$ см). Таким образом, для установки "Ф" периодичность и радиальный шаг структуры магнитного поля могут быть приняты равными $N=4$, $\lambda \approx 15$ см. Выбранные параметры магнитного поля согласуются с требованиями, вытекающими из рассмотрения динамики движения частиц в поле вида (1) ($\lambda \geq 15$ см при $N=4$) /2/.

На рис. 2 приведены зависимости требуемых значений среднего поля и амплитуды основной гармоники от радиуса при $N=4$, $\lambda = 15$ см с ориентировочно выбранным конечным радиусом $r_k = 270$ см.

Среднее магнитное поле возрастает от центра до конечного радиуса ускорения с $H_0 = 11902$ гс до $H_k = 16276$ гс по следующему закону:

$$H(\xi) = H_0 \exp(0.359 \xi^2 + 0.83 \xi^6 - 1.611 \xi^8 + 0.735 \xi^{10}), \quad (3)$$

где

$$\xi = \frac{r}{r_k}.$$

Рост среднего поля $h_k \approx \frac{H_k}{H_0} = 1,3675$, как это будет показано ниже, является предельным при зазоре между полюсами электромагнита 120 см. Характер зависимости $H(r)$ выбран с учетом требований, накладываемых на показатель магнитного поля n на предельных радиусах регенеративным методом вывода пучка.

Требуемая зависимость вариации поля может быть получена из выражения

$$Q_z^2 = -n + \epsilon^2 \left[\frac{N^2}{2(N^2 - 1 - n)} + \frac{r^2}{2N^2 \lambda^2} \left(1 + \frac{N^2}{N^2 - 1 - n} \right) \right] \quad (4)$$

для выбранной зависимости частоты максимальных колебаний с наибольшим значением $Q_z = 0,2$ на конечном радиусе. Амплитуда 4-ой гармоники принимает максимальное значение $H_4 = 3000$ э на радиусе $r \approx 180$ см и уменьшается до величины $H_4 = 1600$ - на конечном радиусе.

Заданные зависимости $H(r)$ и $H_4(r)$ однозначно определяют наиболее оптимальную конфигурацию системы спиральных шимм. Такой конфигурацией являются шиммы переменной угловой протяженности вдоль радиуса

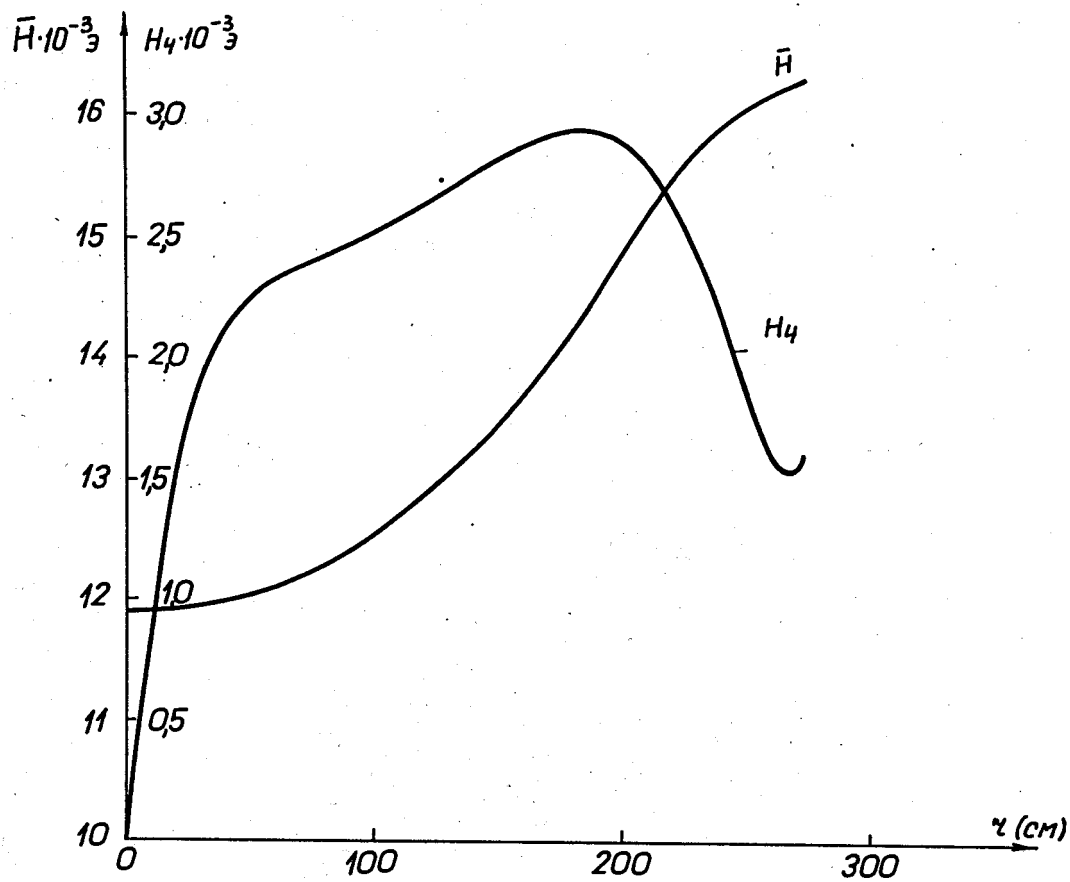


Рис. 2

h_1 и $h_2 = \text{const}$. При этом оптимальная угловая протяженность $\alpha = \frac{\pi}{N}$ выбирается на радиусе, соответствующем максимальной вариации. В этом случае для $r > 180$ см уменьшение вариации поля в соответствии с требуемым законом может быть достигнуто как при $\alpha < \frac{\pi}{N}$, так и при $\alpha > \frac{\pi}{N}$. Однако во втором случае одновременно могут быть частично удовлетворены требования закона среднего магнитного поля.

На малых радиусах угловая протяженность шимм выбрана равной $\alpha = 30^\circ$. Для удовлетворения требований по среднему полю и вариации в этой области наиболее эффективными методами являются варьирование параметров h_1 и h_2 спиральных шимм и использование токовых обмоток.

Выбор зазора между спиральными шиммами $2h_1(r)$ на малых радиусах и угловой протяженности $\alpha(r)$ производился путем расчетов по формуле (2) и экспериментального исследования магнитного поля системы 4-х пар прямолинейных брусков в зазоре электромагнита. В этих экспериментах параметры шимм и зазор электромагнита выбирались так, что они моделировали поле спиральных шимм для следующих радиусов:

$r = 26,1; 52,2; 104,4; 156,6; 261$ см. Результаты экспериментов приведены на рис.3,4,5. На основании этих экспериментов полученные зависимости $h_1(r)$ и $\alpha(r)$ для $\lambda = 15$ см, $2h_2 = 78$ см и $2h_M = 115$ см приведены на рис. 6 и в таблице I.

Таблица I

r см	0	25	50	75	100	150	200	250	300
h_1 см	9,5	9,5	13,2	14,4	15	15	15	15	15
α_0	30	30	30	30	30	32	47	62	78

Среднее поле и амплитуда основной гармоники от системы спиральных шимм выбранной конфигурации рассчитывались по формулам работы [3], полученным в предположении равномерного намагничивания их объема. Расчеты выполнялись при одинаковом намагничивании шимм вдоль радиуса $4\pi M = 17000$ э.

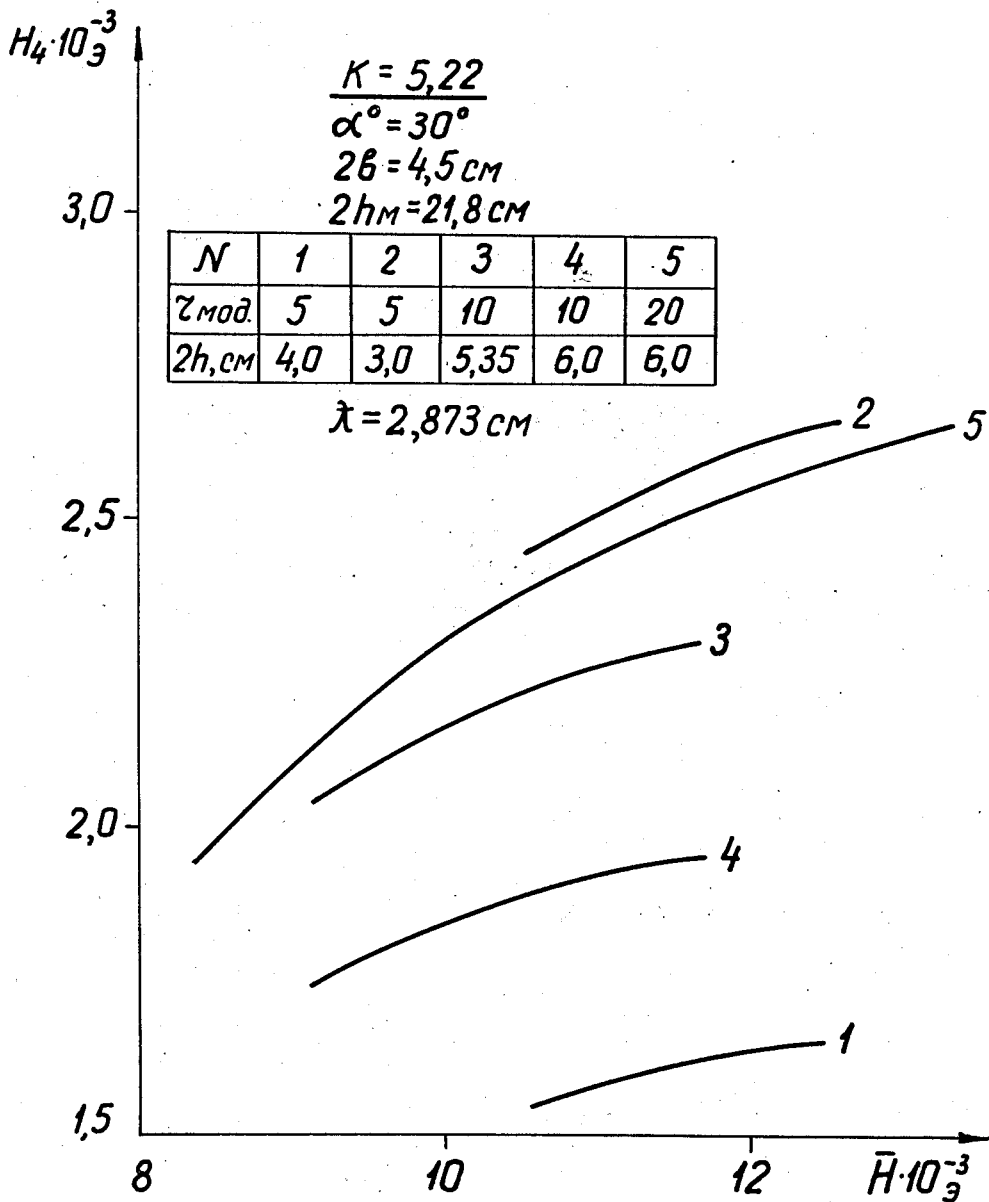
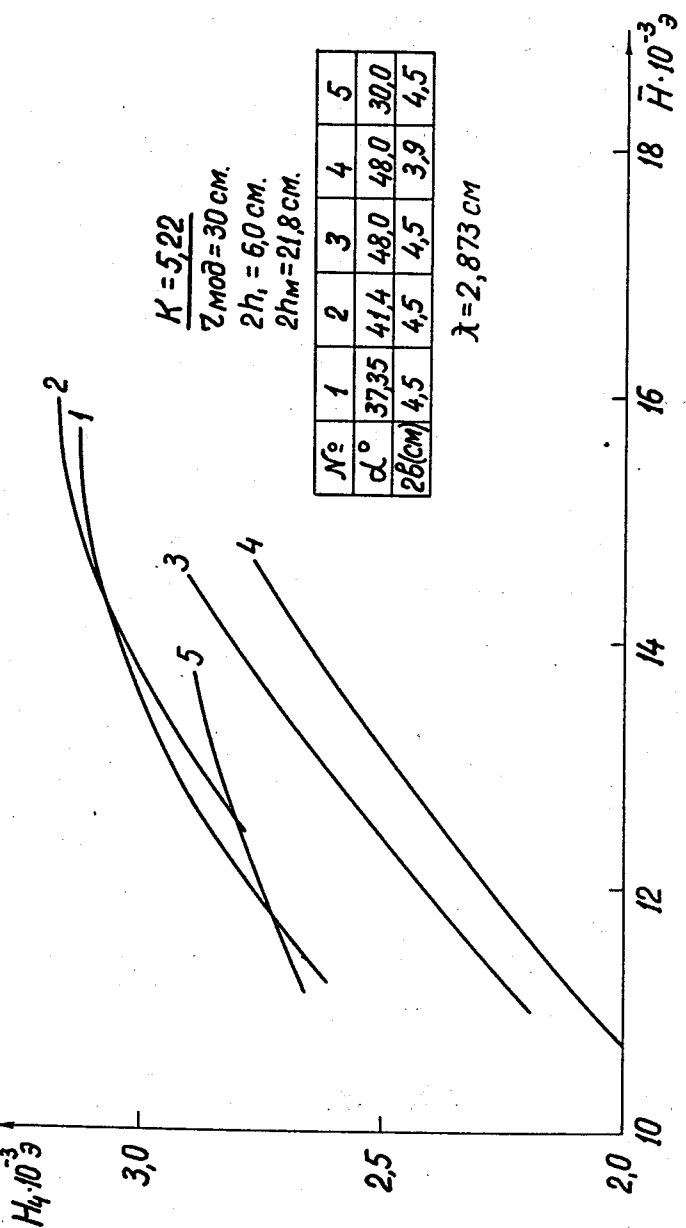


Рис. 3.

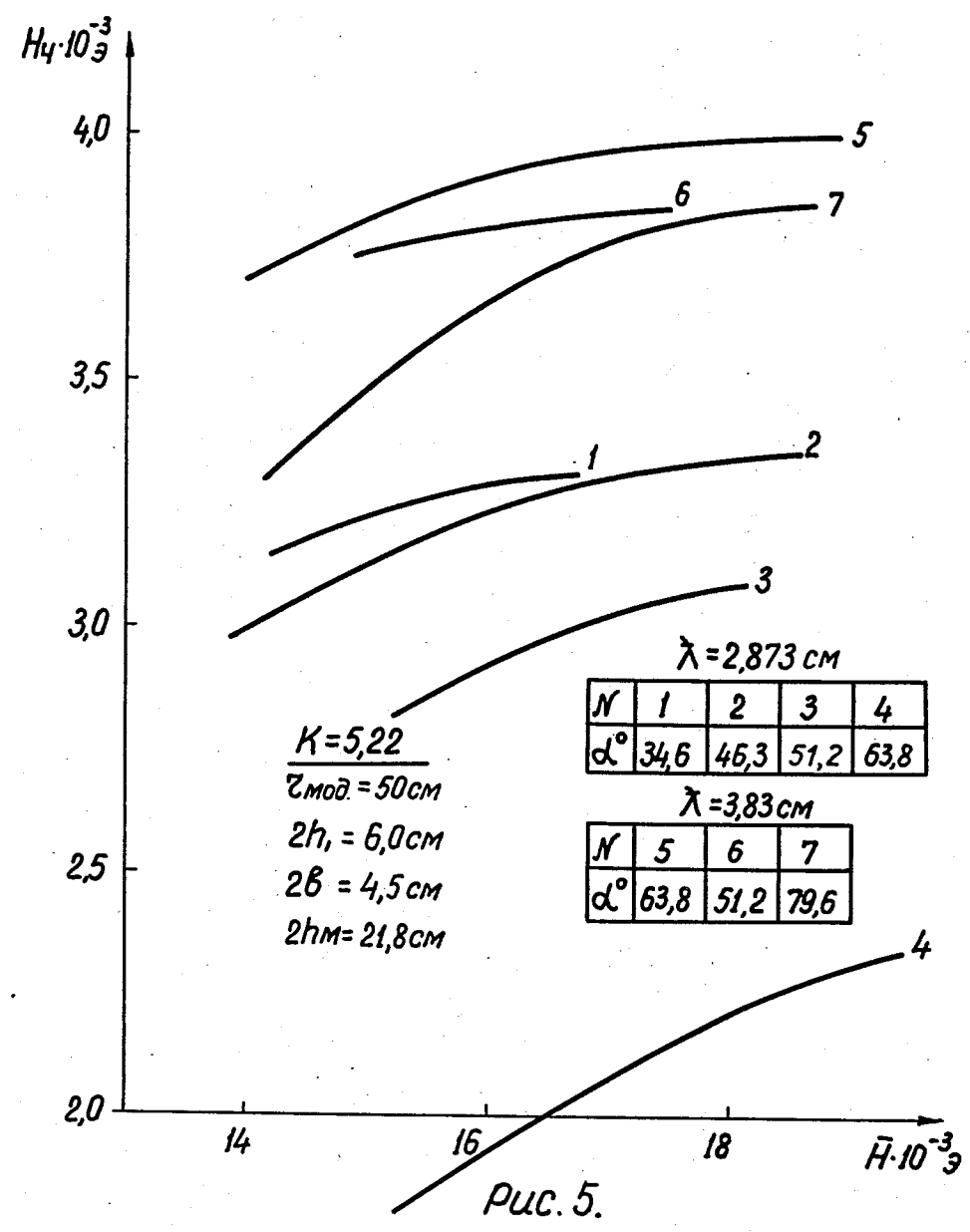


$K = 5,22$
 $Z_{mod} = 30 \text{ cm}$
 $2h = 6,0 \text{ cm}$
 $2hm = 21,8 \text{ cm}$

N°	1	2	3	4	5
α°	37,35	41,4	48,0	48,0	30,0
2b(cm)	4,5	4,5	4,5	3,9	4,5

$\lambda = 2,873 \text{ cm}$

Рис. 4.



$K = 5,22$
 $Z_{mod} = 50 \text{ cm}$
 $2h = 6,0 \text{ cm}$
 $2b = 4,5 \text{ cm}$
 $2hm = 21,8 \text{ cm}$

$\lambda = 2,873 \text{ cm}$

N	1	2	3	4
α°	34,6	46,3	51,2	63,8

$\lambda = 3,83 \text{ cm}$

N	5	6	7
α°	63,8	51,2	79,6

Рис. 5.

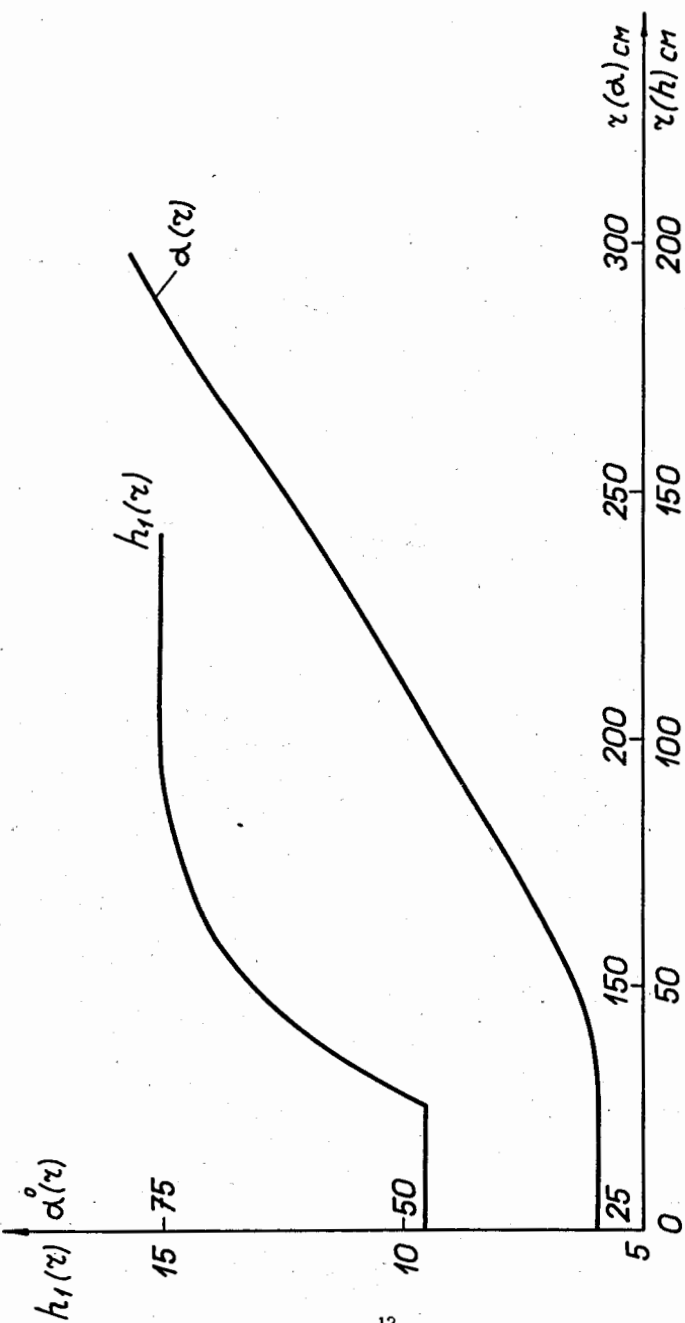


Рис. 6

Хотя полученные результаты по среднему полю носят приблизительный характер и не дают достаточной точности в определении абсолютной величины поля, тем не менее они позволяют получить достаточное представление о характере изменения среднего магнитного поля с радиусом.

Для выбранной конфигурации спиральных шимм существует относительно большое увеличение среднего поля в центральной области из-за уменьшения параметра спиральных шимм $2h_1$.

Такое распределение вносимого поля создает большие трудности при формировании среднего магнитного поля на малых радиусах.

Характер зависимости амплитуды 4-ой гармоники и отклонение ее фазы от спирали Архимеда $r = N \lambda \Phi$ при различных параметрах шимм (см. таблицу II) с коэффициентом подобия $K = 5,22$ показаны на рис. 7.

Таблица II

№	α (рад)	h_1 (см)	h_2 (см)
1	$\alpha(r)$	3 см	7,5 см
2	$\pi/6$	$h_1(r)$	7,5 см
3	$\pi/6$	$h_1(r)$	$h_2(r)$

r (см)	0-35	40	45	50	55	60
α (рад)	0,5236	0,86	1,0	1,16	1,32	1,46

r (см)	0-10	15	20-57,5
h_1 (см)	2,0	2,5	3,0
h_2 (см)	5,5	7,5	7,5

Видно, что уменьшение зазора $2h_1$ между спиральными шиммами приводит к значительному увеличению вариации при одновременном улучшении характера зависимости ее фазы (кривая 2). Отметим также, что

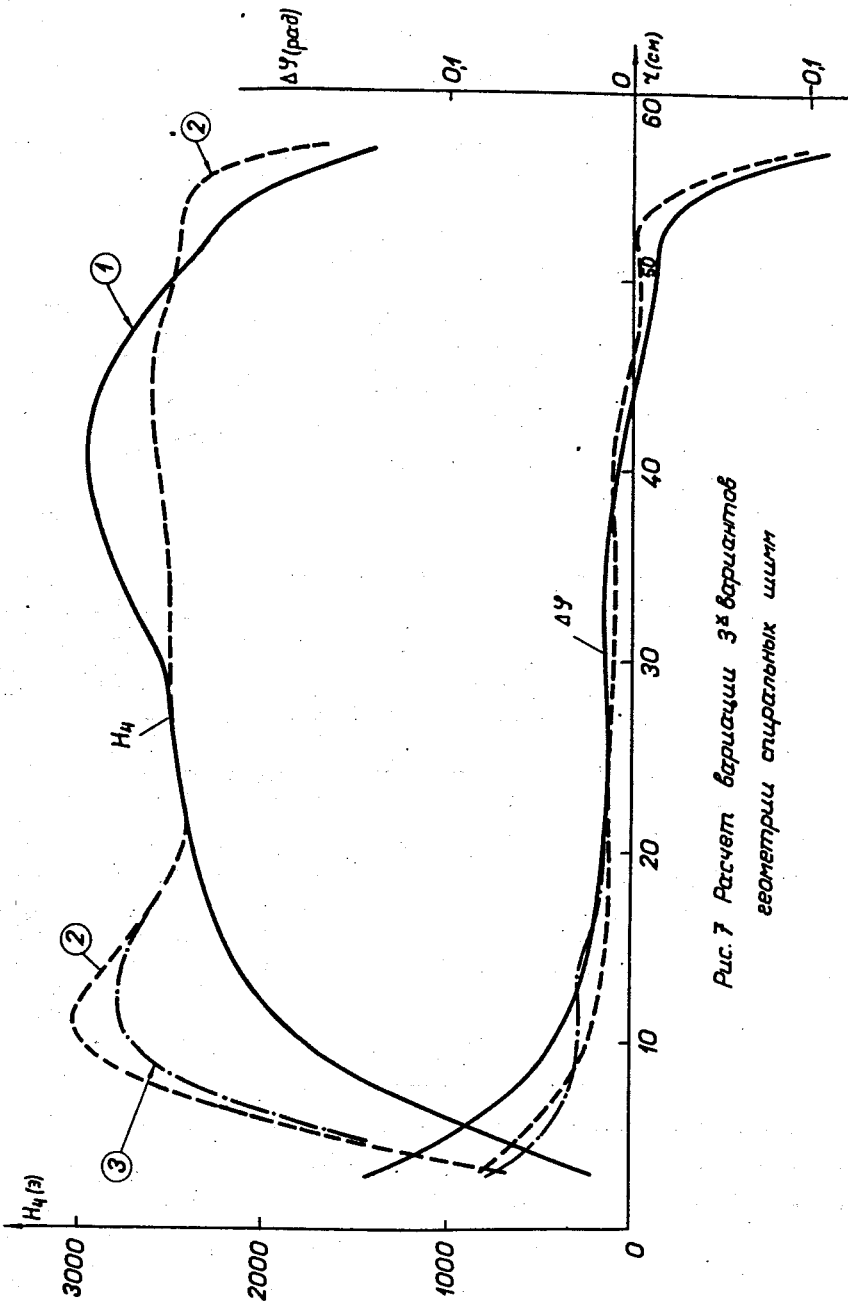


Рис. 7 Расчет вариации 3-х вариантов геометрии спиральных шимм

изменение параметра h_2 несущественно сказывается на амплитуде гармоники (кривая 3).

При этом, как показали расчеты, изменение среднего магнитного поля составляет значительную величину. Это обстоятельство может быть использовано для формирования среднего магнитного поля в этой области.

Из рисунка также видно, что путем изменения угловой протяженности спиральных шимм (кривая 1) легко можно достичь требуемой зависимости вариации вдоль радиуса. Однако при выбранном $a(r)$ наблюдается отклонение фазы максимума поля, что эквивалентно изменению параметра λ , которое должно быть учтено следующим образом

$$H_4^*(r) = \frac{H_4(r)}{k_{\Delta}(r)}, \quad (5)$$

где H_4^* - требуемая амплитуда вариации при $\lambda(r)$, H_4 - требуемая амплитуда вариации при $\lambda(r) = \text{const}$,

$$k_{\Delta} = \frac{\lambda_{\text{сп}}}{\lambda} = 1 + N \lambda_{\text{сп}} \frac{d\Delta}{dr}, \quad (6)$$

$\lambda_{\text{сп}}$ - параметр спирали, λ - параметр спиральности фазы магнитного поля, $\Delta = \Phi_{\text{max}} - \Phi_{\text{сп}}$ - отклонение фазы максимума поля от азимута осевой линии спирали.

Расчеты, проведенные по формуле (6), показывают, что требуемая амплитуда основной гармоники на предельном радиусе вследствие этого эффекта должна быть увеличена на (1-2)%.

Для уточнения предварительно выбранных параметров магнитной системы установки "Ф" были проведены эксперименты в зазоре электромагнита δ 115 см с набором кольцевых и одной парой спиральных шимм при коэффициенте подобия $K = 5,22$ (рис.8). Результаты 3-х серий экспериментов (таблица III) по формированию вариации поля в плоском зазоре $2h_M = 21,8$ см представлены на рис. 9 и 10.

Для сравнения с требуемой зависимостью $H_4(r)$ и с результатами экспериментов с прямолинейными брусками полученные эксперименталь-

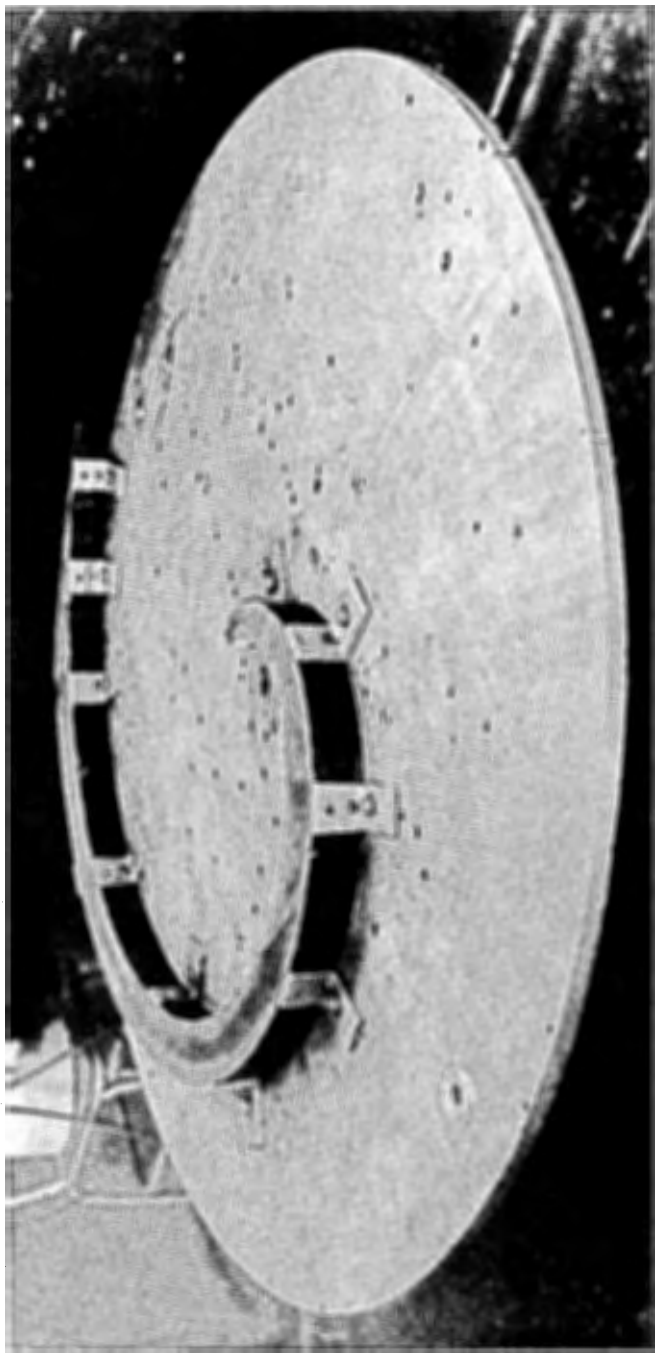


Рис. 8.

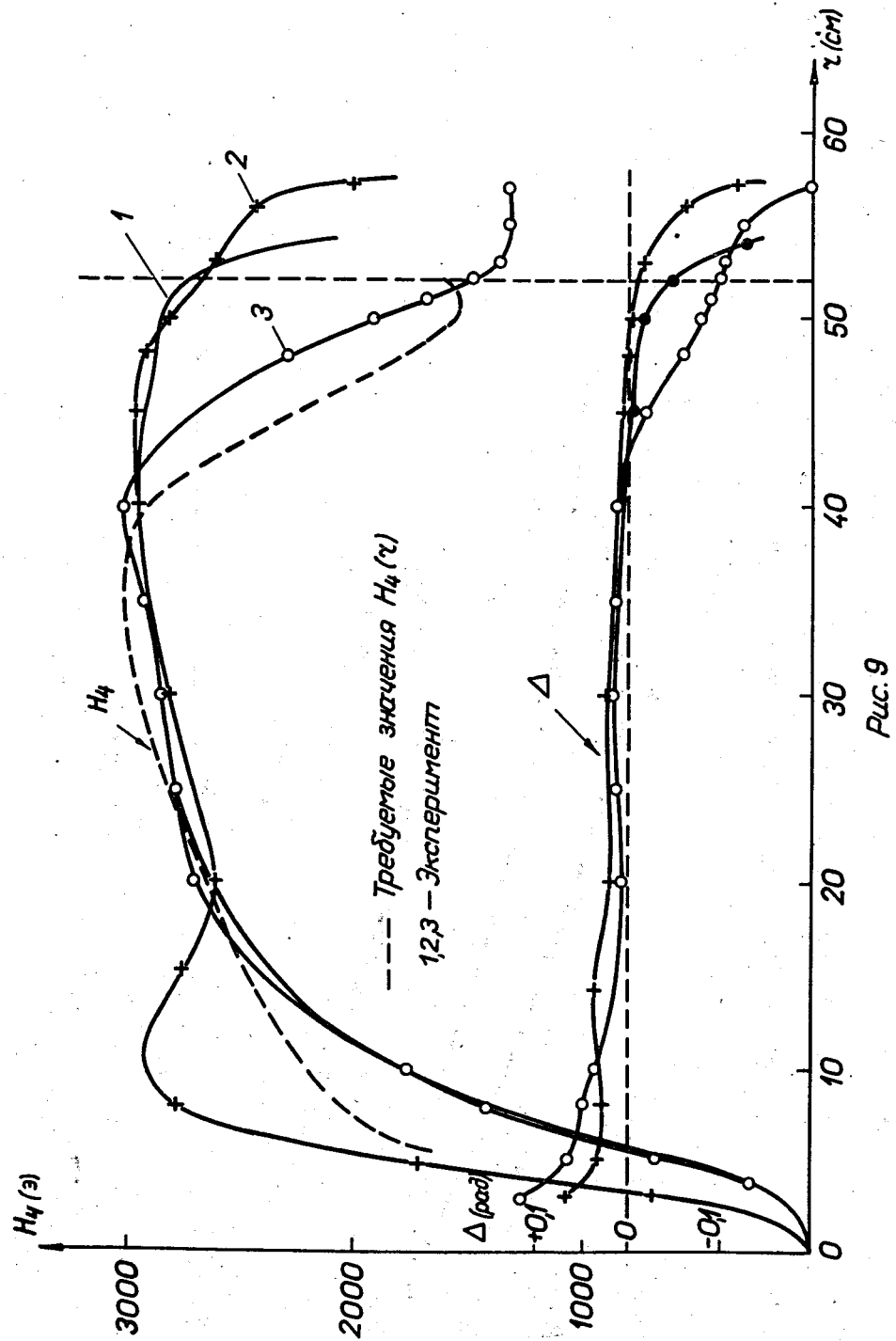


Рис. 9

1,2 - Система прямолнейных шимм.
3,4 - Пара спиральных шимм.

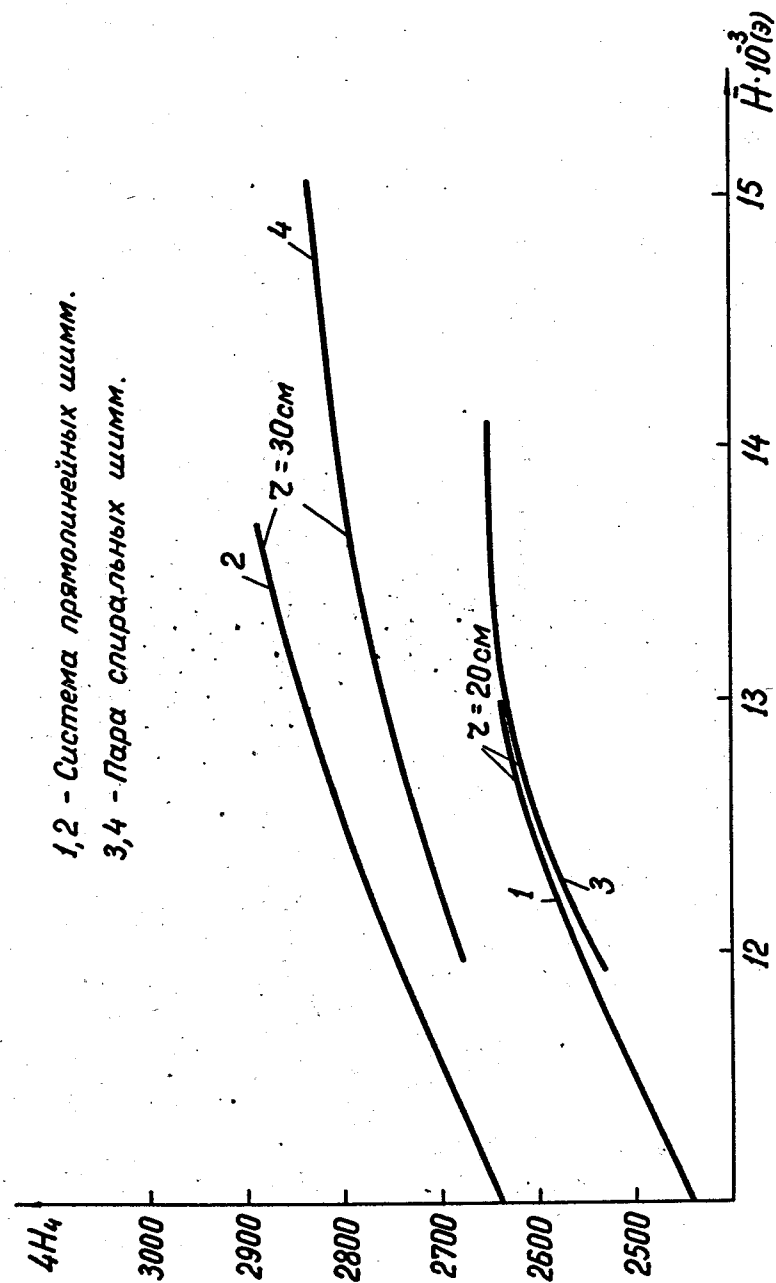


Рис. 10.

ные значения амплитуды гармоник увеличены в 4 раза. Как видно из рис. 7 и 9, существует хорошее согласие расчетных и экспериментальных результатов.

Таблица III

N эксп	h_1 (см)	h_2 (см)	α (рад)	R_1 (см)	R_2 (см)
1	3,0	7,5	$\pi/6$	1,5	55,0
2	$h_1(r)$	7,5	$\pi/6$	1,5	57,5
3	3,0	7,5	$\alpha(r)$	1,5	57,5

где $\alpha(r) = \frac{\pi}{6} + 0,0273(r-28)$ для $r > 28$ см,

r (см)	1,5-11	11-16	16-57,5
h_1 (см)	2,0	2,6	3,0

Из этих экспериментов определено также среднее магнитное поле, которое будет получено от 4-х пар спиральных и системы кольцевых шимм (таблица IV), расположенных в плоском зазоре электромагнита $2h_M = 21,6$ см (рис. 11, кривая 4).

Таким образом, перепад среднего поля $h_k = 1,3675$ является максимально возможным в рассматриваемой геометрии.

Таблица IV.

Параметры системы кольцевых шимм

	$h_2 = 10,8$ см	$h_1 = h_2 - \Delta h$		
Δr (см)	35-40	40-45	45-50	50-57,5
Δh (см)	1,0	1,5	1,7	2,9

На основании комплекса расчетных и экспериментальных работ, описанных в настоящей работе, выбраны параметры модели магнитной системы установки "Ф" (коэффициент подобия $k = 5,22$). Схема размещения элементов магнитной системы модели показана на рис. 12.

Параметры модели приведены в таблице V .

Таблица V.

Магнит	σ 115 см	$2h_M = 21,6$ см		
Спиральные шиммы	$\lambda = 2,873$ см,	$R_1 = 0,8$ см,	$R_2 = 57,5$ см,	
		$h_1 = (2-3)$ см,	$h_2 = 7,5$ см,	
		$\alpha = \pi/6$ для $r < 30$ см,		
	$\alpha = \pi/6 + 0,0262(r-30)$		для $r > 30$ см.	
Кольцевые шиммы	$h_1 = h_2 - \Delta h$,	$h_2 = 10,5$ см		
	$\Delta h = 1,0$ см для	$\Delta r = (40-45)$ см,		
	$\Delta h = 1,5$ см для	$\Delta r = (45-50)$ см,		
	$\Delta h = 3,0$ см для	$\Delta r = (50-57,5)$ см.		

Л и т е р а т у р а

1. K.R. Mac Kensie. IEEE Trans. on Nuclear Science NS-13, 220-226 (1966).
2. А.А. Глазов и др. Препринт ОИЯИ 9-3951, 1968 г.
3. В.П. Дмитриевский и др. Препринт ОИЯИ 1431, 1963 г.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 июня 1969 года.

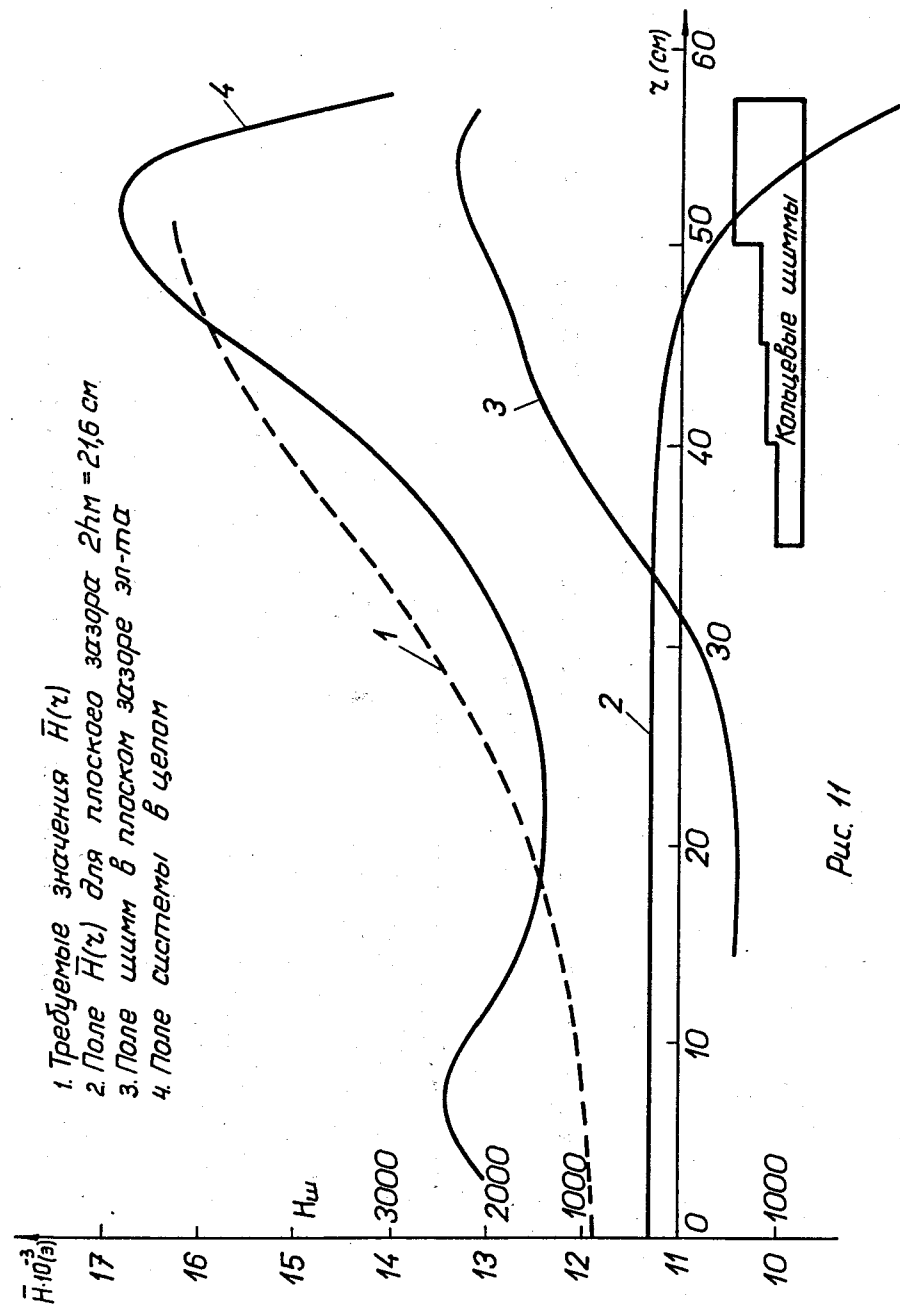


Рис. 11

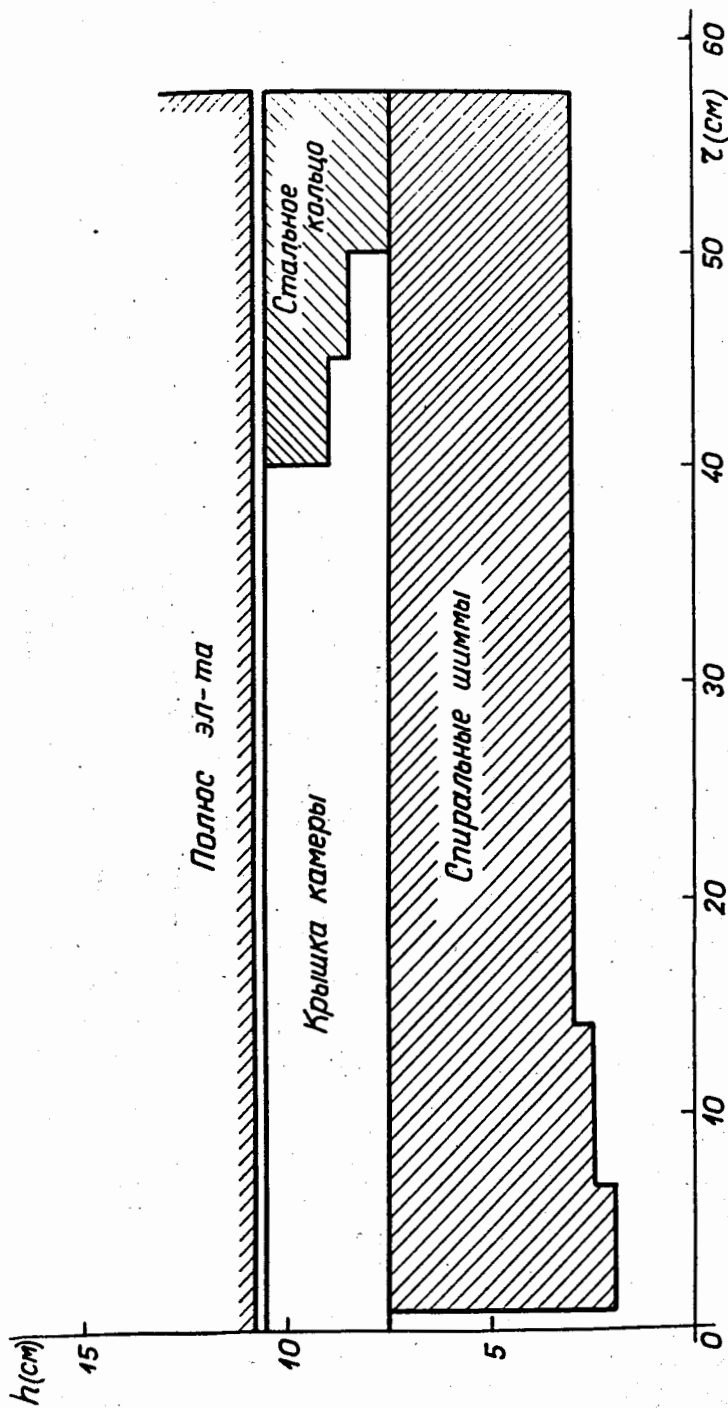


Рис.12 Схема размещения элементов модели магнитной системы