

18
K 29

2.3.

V

601



В.С.Катышев, А.А.Кропин, В.Б.Мухина,
Т.Н.Томилина, А.В.Честной

P - 601

ИСПРАВЛЕНИЕ РАДИАЛЬНОГО СПАДА
И АЗИМУТАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ШЕСТИМЕТРОВОГО СИНХРОЦИКЛОТРОНА

Дубна 1960 год

P - 601

В.С.Катышев, А.А.Кропин, В.Б.Мухина,
Т.Н.Томилина, А.В.Честной

ИСПРАВЛЕНИЕ РАДИАЛЬНОГО СПАДА
И АЗИМУТАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ШЕСТИМЕТРОВОГО СИНХРОЦИКЛОТРОНА

Объединенная
Ядерная Исследовательская
Библиотека

Магнитное поле шестиметрового синхроциклотрона

Излагаются результаты работы по корректировке магнитного поля электромагнита шестиметрового синхроциклотрона Объединенного института ядерных исследований, выполненной в период 1952-53 г.г. Использовались данные из рабочих журналов и отчетов, относящихся к излагаемому вопросу. Отмечается удовлетворительное согласие рассчитанного поля шимм с экспериментально определенным его значением.

В в е д е н и е

Исследования, проведенные в 1949 году при формировании магнитного поля электромагнита пятиметрового синхроциклотрона ОИЯИ, показали техническую и экономическую целесообразность увеличения индукции в железе магнитопровода. Так как в пятиметровом варианте ускорителя полюса электромагнита конструктивно были осуществлены набором стальных дисков с диаметром от 6 до 5 м, то представлялась реальная и простая возможность путем заполнения железом кольцевых уступов на полюсах довести их диаметр до 6 м.

Реализация этой возможности, выполненная при реконструкции ускорителя в 1952-53 г.г., привела к увеличению энергии ускоряемых частиц почти в полтора раза. При этом стальные крышки ускорительной камеры, являющиеся полюсными наконечниками, были увеличены до 6 м, а воздушный зазор между ними уменьшен с 80 до 60 см. Номинальная напряженность магнитного поля в центре камеры 16500 эрстед была получена от одного из рабочих генераторов при токе около 4100 ампер и напряжении 220 вольт.

1. Моделирование шестиметрового электромагнита

Обычно формирование магнитного поля в зазоре больших электромагнитов производится предварительно на малых электромагнитах - моделях, выполняемых

до $0,01^{1)}$ размеров, моделируемых магнитов. Для шестиметрового электромагнита выбор конфигурации полюсных наконечников производился на электромагните - модели в масштабе $1 : 4,16$. При заданном минимальном зазоре между периферийными шиммами, найденный на модели профиль шимм, должен был обеспечить монотонный спад поля по радиусу на 4% до 2700мм, где показатель спада поля

$$n = -\frac{R}{H} \frac{dH}{dR} = 0,2.$$

Это значение рабочего радиуса в 2700 мм составляет около 90% эффективного радиуса электромагнита. Так как дальнейшее увеличение высоты шимм являлось нежелательным из-за радиочастотных требований, то увеличение эффективного радиуса моделировалось за счет боковых шимм, увеличивающих диаметр крышек камеры на 100-120 мм. Для уменьшения зоны естественного параболического спада были подобраны шиммы в центре полюсов. Таким образом был найден на модели профиль полюсных наконечников, который должен был обеспечить монотонный спад поля основного электромагнита в 4-5 % до радиуса 2700-2750 мм.

2. Расчет профиля шимм

Экспериментальное шиммирование поля электромагнита, при известном навыке, представляет простую, но довольно трудоемкую операцию. Для ускорения этого процесса можно расчетом заранее оценить необходимый профиль шимм²⁾. Лист железа - шимма, накладываемая на каждый полюс, намагничивается до величины "В" гаусс. При осевом намагничении изменение основного поля от данной шиммы описывается потенциалом:

$$\phi = \frac{M(z-z')}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{3/2}} \quad (1)$$

где $M = \frac{B}{4\pi}$ гаусс.

Если размеры шиммы обозначить через $2a$ -радиальную ширину шиммы, $2l$ - ее длину и $2d$ - толщину шиммы, то составляющая поля H_z в плоскости $z = 0$ от двух шимм, расположенных с зазором $2h$, может быть вычислена по следующей формуле:

$$\begin{aligned}
 H_z = -2M \left\{ \right. & \arctg \frac{x-a}{h+2d_{\text{эф}}} \frac{y-e}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-e)^2 + (h+2d_{\text{эф}})^2}} - \\
 & - \arctg \frac{x+a}{h+2d_{\text{эф}}} \frac{y-e}{\sqrt{(x+a)^2 + (y-e)^2 + (h+2d_{\text{эф}})^2}} - \\
 & - \arctg \frac{x-a}{h+2d_{\text{эф}}} \frac{y+e}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+e)^2 + (h+2d_{\text{эф}})^2}} + \\
 & + \arctg \frac{x+a}{h+2d_{\text{эф}}} \frac{y+e}{\sqrt{(x+a)^2 + (y+e)^2 + (h+2d_{\text{эф}})^2}} - \\
 & - \arctg \frac{x-a}{h} \frac{y-e}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-e)^2 + h^2}} + \\
 & + \arctg \frac{x+a}{h} \frac{y-e}{\sqrt{(x+a)^2 + (y-e)^2 + h^2}} + \\
 & + \arctg \frac{x-a}{h} \frac{y+e}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+e)^2 + h^2}} - \\
 & \left. - \arctg \frac{x+a}{h} \frac{y+e}{\sqrt{(x+a)^2 + (y+e)^2 + h^2}} \right\} \quad (2)
 \end{aligned}$$

где x и y - текущие координаты по ширине шиммы и ее длине, соответственно, а толщина шиммы $2d$ заменена эмпирическим значением $2d_{\text{эф}} = 1,8 \cdot 2d$,

где коэффициент 1,8 учитывает эффективное утолщение шиммы за счет "отражения" в железе полюса. Начало координат располагается в центре симметричной системы.

Ограничиваясь при оценке действия шиммы областью $x \leq h \leftarrow \rho$, где ρ - радиус кривизны шиммы, можно пренебречь ее кривизной и считать $2l = \infty$. В этом случае формула (2) принимает вид:

$$H_z = -4M \left\{ -\arctg \frac{x-a}{h+2d_{\text{эф}}} + \arctg \frac{x+a}{h+2d_{\text{эф}}} + \arctg \frac{x-a}{h} - \arctg \frac{x+a}{h} \right\} \quad (3)$$

Для области $x > h$ необходимо учитывать кривизну шимм. Наиболее просто это можно сделать, разбив круговую шимму на ряд участков, каждый из которых считать прямолинейной шиммой конечной длины $2l > 2h$ и просуммировать их действие. При этом практически достаточно просуммировать

их действие только в геометрическом центре зазора электромагнита, экстраполируя полученные данные до той области, где длина шимм в расчете считалась бесконечно длинной.

Пользуясь этими соображениями, моделирование шестиметрового электромагнита было дополнено расчетом действия выбранного профиля шимм. Принимая спад поля по радиусу в плоскопараллельном зазоре магнита тем же, что и в его модели были рассчитаны периферийные и центральные шиммы для обеспечения монотонного спада поля по радиусу.

В работе ³⁾ и в экспериментах по ускорению частиц до энергии 500 Мэв, выполненных на шестиметровом ускорителе ОИЯИ в 1951 году, было показано, что увеличение параметра h - параболического спада магнитного поля, за счет установки конических шимм из мягкого железа в центре ускорителя, приведет к увеличению интенсивности тока ускоренных частиц в 5-10 раз. Это может быть объяснено как усилением магнитной фокусировки на начальной стадии ускорения, так и фиксированием магнитного центра ускорителя относительно положения ионного источника. Такие конические шиммы, увеличивающие поле в центре магнита на величину $\Delta H = 0,005 H_0$, были рассчитаны по формуле (2), причем в расчете каждый конус заменялся двумя равновеликими по объему параллелепипедами.

3. Магнитные измерения и исправление радиального спада поля

Опыт корректирования и моделирования электромагнита пятиметрового варианта ускорителя показал необходимость дополнительной корректировки периферийной части поля основного электромагнита из-за неполного его подобия своей модели. Поэтому, для удобства экспериментального шиммирования, корректирующие шиммы были разбиты на кольцевые зоны, каждая из которых состояла из 24 сегментов, составленных набором железных пластин различной толщины. Это обеспечивало удобство установки шимм и быстроту изменения их профиля. Для возможности сравнения действия шимм, выбранных на основании моделирования и на основании расчета, сектор полюсов в 60° был оставлен с плоским зазором в 60 см, на секторе в 240° выложены шиммы модельного варианта и, на оставшемся секторе

в 60° , были выложены шиммы, полученные в результате расчета. Магнитные измерения в плоском зазоре показали, что радиальный спад поля оказался на 0,5% больше, чем следовало из данных по моделированию электромагнита. Это вызвало необходимость дополнительной корректировки поля в области $R = 2500-3000$ мм. При выборе необходимых шимм их параметры выбирались на основании оценки по формуле (3). Шиммы крепились на поверхности полюса с помощью распорных латунных винтов, что обеспечивало быстроту выбора профиля шимм.

Магнитные измерения проводились с помощью ядерного магнитометра и дифференциально-баллистическим методом с помощью двух катушек, вращаемых на 180° , одна из которых находилась в центре магнита, а другая перемещалась вдоль радиуса. Точность измерений в обоих методах составляла $\pm 0,1\%$.

4. Измерение и исправление азимутальной неоднородности

Азимутальная неоднородность магнитного поля ускорителя вызывает вынужденные колебания ускоряемых частиц. Это приводит к движению частиц около эффективного магнитного центра, смещенного относительно геометрического центра магнита на величину

$$\Delta R = \frac{R h_1}{n} \quad (4)$$

где R - радиус орбиты, h_1 - амплитуда первой гармоники, n - показатель изменения поля.

Движение частиц около смещенного центра уменьшает, соответственно рабочий радиус ускорителя и предельную энергию частиц. Реально можно было допустить смещение $\Delta R \approx 1-2$ см на предельном радиусе. В этих условиях необходимо так исправить поле, чтобы амплитуда первой гармоники азимутальной неоднородности поля не превышала 0,05%. Измерения азимутальной неоднородности поля с точностью до 0,05%, обеспечивались с помощью прибора, основанного на изменении магнитной проницаемости сердечника из магнитодиэлектрика при изменении напряженности магнитного поля ⁴⁾.

Как показали измерения, нескорректированное поле имело возмущения до 0,4%, связанные с непостоянством воздушного зазора электромагнита по азимуту из-за неточности в толщинах отдельных шимм в секторах, составляющей в сумме 2-3 мм. Секторная форма шимм с набором толщин позволяла оперативно производить исправление поля на соответствующих участках. Используемая при измерениях и исправлении положения медианной поверхности, методика плавающей петли с током^{5,6)} позволяла определять не только среднее положение медианной поверхности, но и положение центров орбит ускоряемых частиц на соответствующих радиусах. Эта методика позволяла контролировать точность магнитных измерений, а также исправлять амплитуду и фазу первой гармоники без измерения неоднородности поля. Для дополнительной коррекции поля при этом использовались имеющиеся зазоры между крышками камеры ускорителя и полюсами электромагнита. Установленные в этих зазорах шиммы позволили также осуществить и коррекцию азимутальной неоднородности поля, вызванной конструкциями крепления магнитного канала и вариатора. Указанные зазоры, по 14 мм высотой, оказались достаточными для исправления с помощью шимм толщиной по 10 мм неоднородностей поля порядка 0,5%.

В таблицах №№ 1-2 и на рис. 1,2,3 и 4 приведены основные параметры магнитного поля шестиметрового ускорителя.

З а к л ю ч е н и е

1. Магнитное поле шестиметрового синхроциклотрона отшуммировано так, что полезный радиус в воздушном зазоре в 600 мм составляет $\approx 93\%$ от геометрического.

2. Азимутальная неоднородность поля после ее исправления на предельном радиусе 2800 мм по амплитуде первой гармоники составляет 0,05% и, соответственно, по положению магнитного центра $\Delta R \approx 5$ мм.

3. Действие шимм, рассчитанных по формулам 2 и 3, достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными.

4. Параметр $n = -\frac{R}{H} \frac{dH}{dR}$ достигает критического значения 0,2 на $R = 2790$ мм. На этом радиусе спад поля составляет 4,8%.

5. Эксперименты с пучком ускоренных частиц показали, что предельный радиус ускорения $\approx 2790 \pm 5$ мм, а смещение магнитного центра составляет 17-20 мм. Максимальная энергия протонов при этом достигает значения 685 Мэв.

Л и т е р а т у р а

1. Foss M., Fox J.G., Sutton R.B. and Creutz E.C. Rev.Sci.Instr. , 22, 469-472 (1951).
Расчет магнита циклотрона.
2. В.И.Данилов. Диссертация.
3. Henrich L.R., Sewell D.C. and Vale J. Rev.Sci.Instr., 20, 887-898 (1949).
Работа 184-дюймового фазотрона.
4. М.П.Зельдович, С.М.Рубчинский. Измеритель азимутальной симметрии поля мощных электромагнитов. ПТЭ, № 1, 56 (1958).
5. Herbert L. Anderson, John Marshall, Lester Kornblith, Jr., Leroy Schwartz, and Richard Miller. Rev.Sci.Instr., 12, 707-728 (1952).
Синхроциклотрон для 450 Мэв протонов.
6. В.И.Данилов, В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолодчиков, **В.С.Катышев**, А.А.Кропин, А.В.Честной. Исправление медианной поверхности магнитного поля шестиметрового синхроциклотрона. ПТЭ, №3, 17 (1956).

Рукопись поступила в издательский отдел
30 августа 1960 года.

Таблица № I.

Зависимость напряженности магнитного поля от тока.

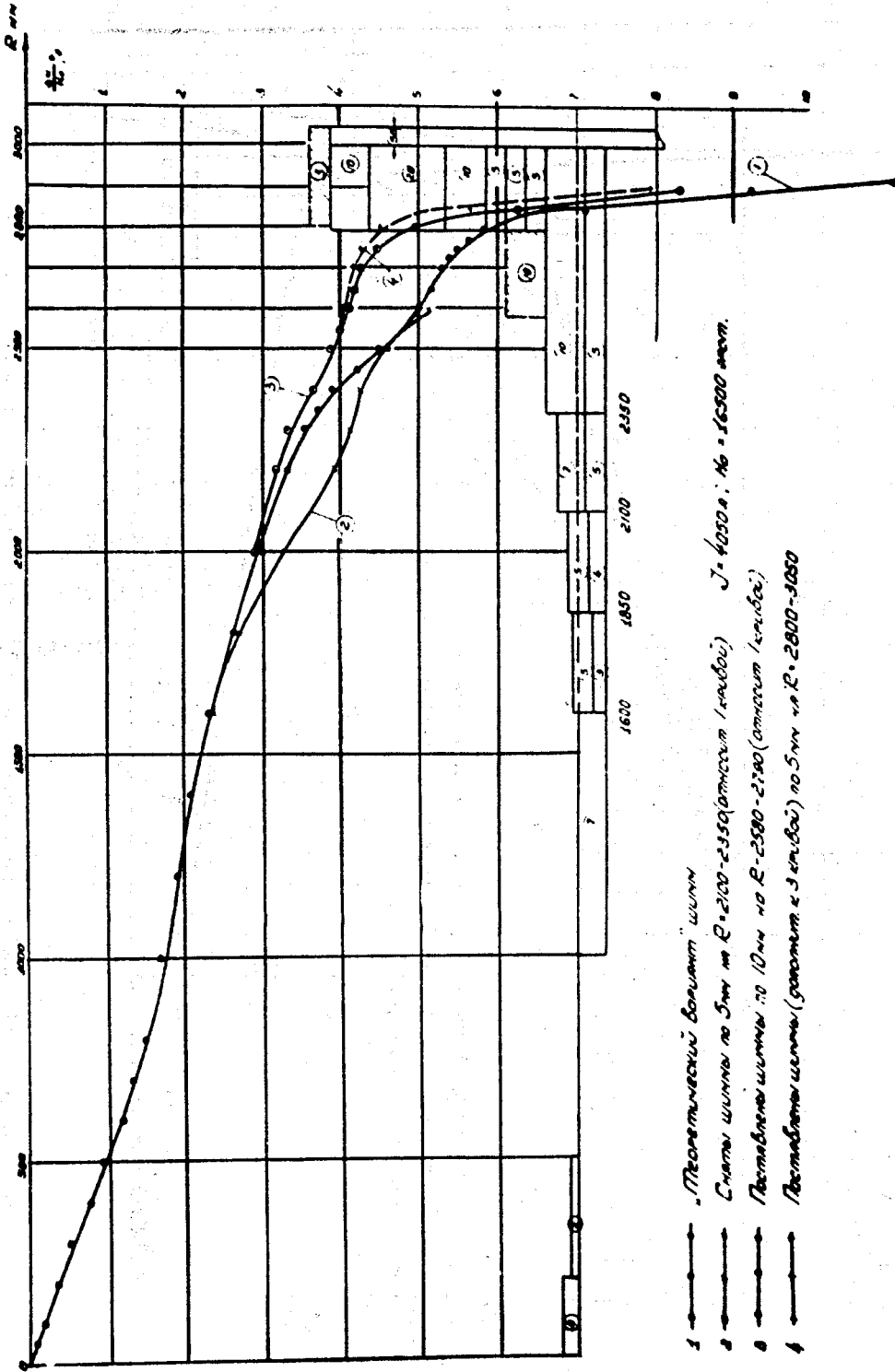
Ток.	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300
H эрст.	9000	10820	12130	13250	13900	14600	15090	15520
Ток.	3750	4000	4100	4150	4200	4300	4500	4950
H эрст.	16170	16450	16570	16630	16700	16780	17030	17600

Таблица № 2

Основные параметры магнитного поля.

$R_{\text{мм}}$	H эрст. $\mathcal{D} = 7125 \text{ см}$	$\frac{\Delta H}{H} \%$	n	$h_i \%$	ΔR	φ°	Примечание
0	I66I0	0,00					I. $n = 0,2$ на $R = 278,8 \text{ см}$. $n = 0,25$ на $R = 279,7 \text{ см}$ $n = 1,00$ на $R = 285 \text{ см}$
25	I6600	0,06					
50	I6990	0,12					
75	I6580	0,18					
I00	I6570	0,24	0,003				
I50	I6540	0,42					
200	I65I0	0,60	0,007	0,078	2,6	I05,50	
250	I6480	0,78					
300	I6450	0,96		0,07I	2,63	95,5	
400	I6420	I,15					
500	I6390	I,33	0,0I	0,079	3,96	86	
600	I6350	I,57					
800	I6300	I,87		0,0I6	I,04	87	
I000	I6250	2,17	0,0I7	0,062	4,03	79	
I200	I6I90	2,56		0,0039	0,25	30I	
I400	I6I40	2,86		0,034	2,2		
I600	I6090	3,18	0,025	0,046	2,9		
I800	I6040	3,43		0,079	5,1		
2000	I5990	3,73	0,03I	0,0I4	0,9		
2200	I5940	4,06		0,032	2,1		
2400	I5900	4,27		0,022	I,4		
2600	I5850	4,63	0,042	0,089	5,7		
2650	I5840	4,62	-	-	-		
2700	I5830	4,75	0,045	0,02	I,35	233	

$R_{\text{мм}}$	$H_{\text{эпр.}} = 4125 \text{ см}$	$\frac{\Delta H}{H_0} \%$	n	$h_1 \%$	ΔR	φ°
2750	I5820	4,82				
2775	I5810	4,81	0,16			
2800	I5800	4,93	0,265	0,053	0,6	
2850	I5630	5,88	1,006			
2900	I5220	8,3				
3000	I3700					2. Измерения рассеянного поля за радиусом 2900 осуществлялось с помощью флюксметра и калиброванной катушки с точностью 1-2%.
3100	II700					
3200	9300					
3300	7400					
3400	6100					
3500	5100					
3600	4400					
3700	3800					
3800	3200					
3900	2950					
4000	2600					
4200	2000					
4400	I700					
4600	I400					
4800	I050					
5000	900					
5200	500					
5400	300					
6000	0					



- 1 — Прогретый вакуум шланг
- 2 — Статус шланга по 5 мм на Р=2100 (отсоса (каждый) J=4050 в. №=16500 ммт.
- 3 — Поставлены шланги по 10 мм на Р=2500-2700 (отсоса (каждый))
- 4 — Поставлены шланги (размер 2 и 3 мм) по 5 мм на Р=2800-3050

Рис. 1. Последовательные этапы шиммирования $H-f (P)$

А

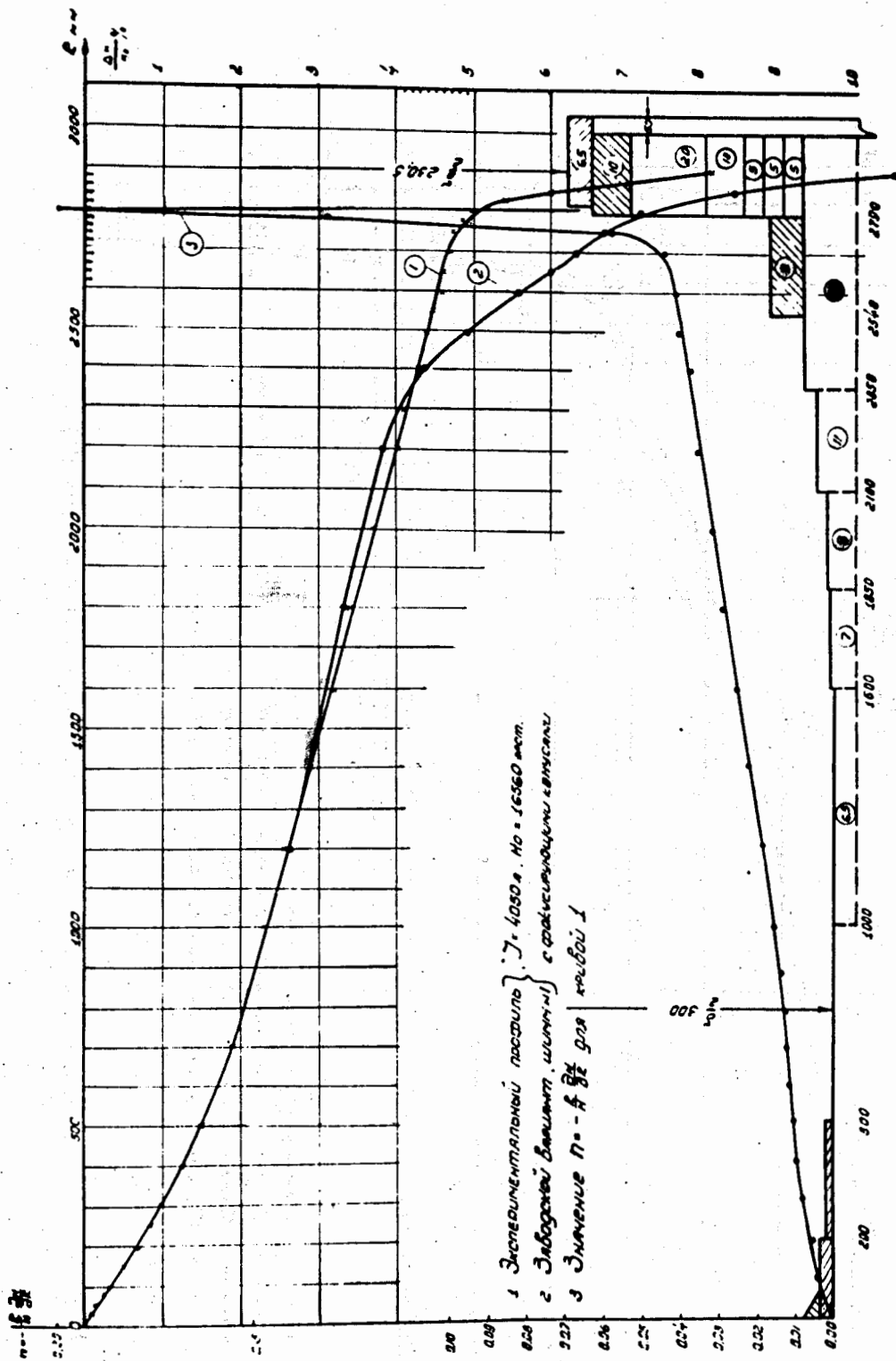


Рис. 2. Радиальный спад напряженности магнитного поля для шимитового окончател- ного варианта.

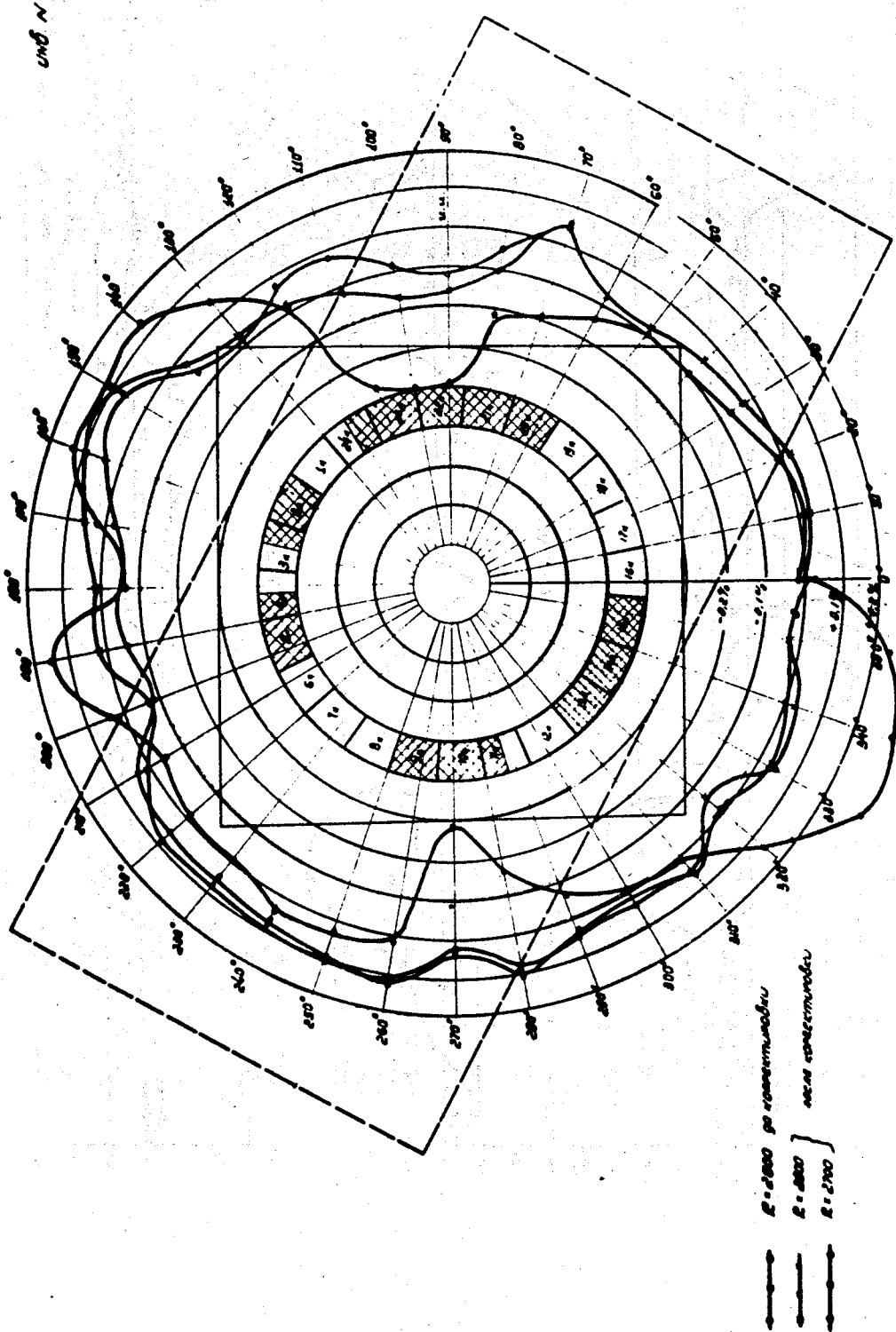


Рис. 3. Азимутальная неоднородность магнитного поля.

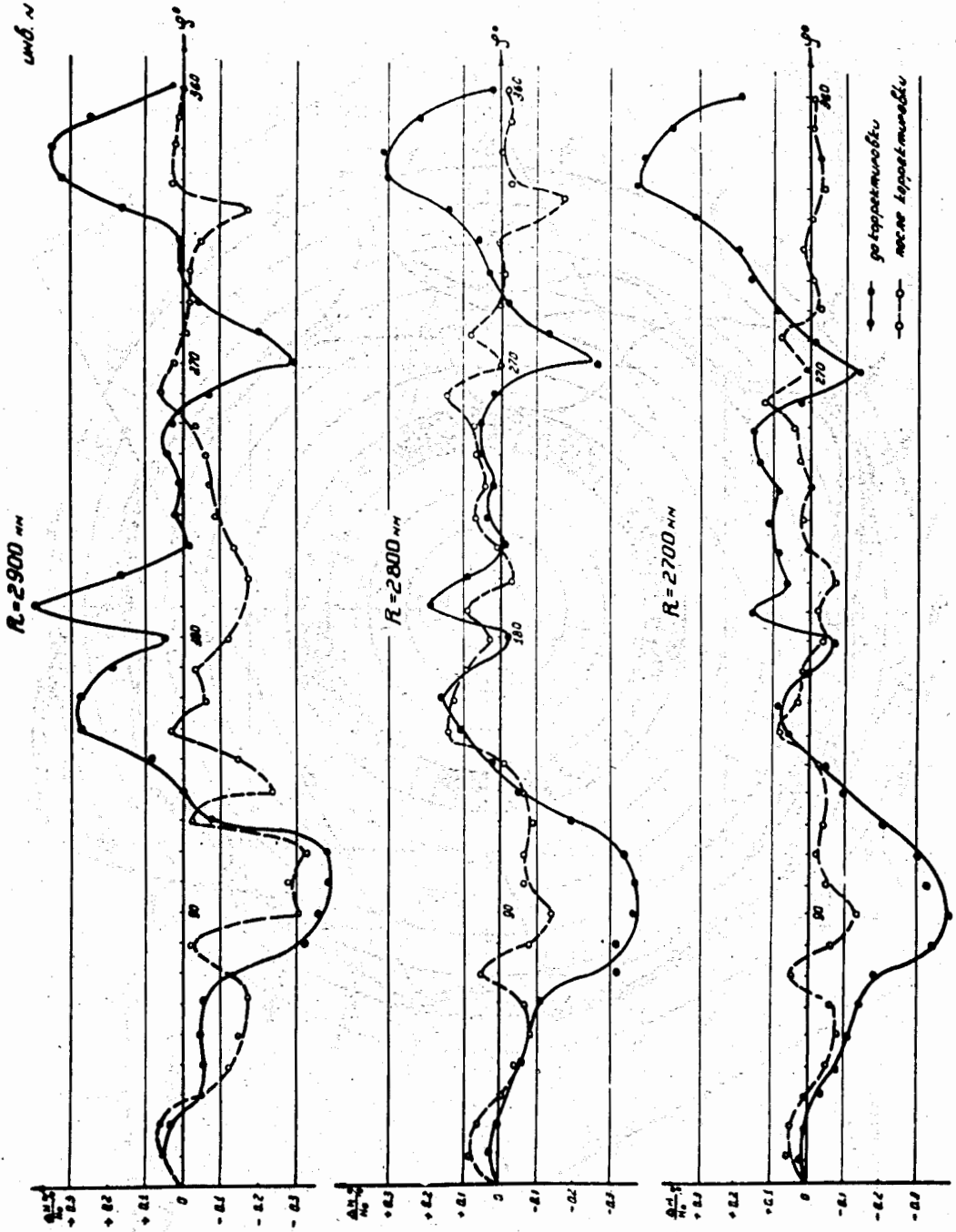


Рис. 4. Азимутальная неоднородность магнитного поля.