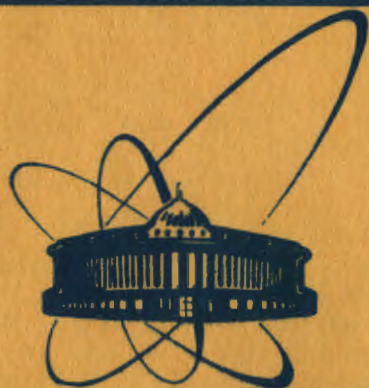
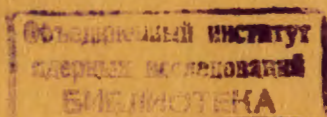


83-335



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна



9-83-335

В.П.Заболотин, А.С.Исаев, В.Н.Перфеев,  
С.В.Федуков, Д.И.Шерстянов, А.П.Царенков,  
И.Н.Яловой

АЗИМУТАЛЬНАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
В СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ  
И КОРРЕКЦИЯ ОРБИТЫ ПУЧКА ПО РАДИУСУ  
В НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД УСКОРЕНИЯ

1983

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Искажение замкнутой орбиты пучка в радиальном направлении вызывается азимутальной асимметрией магнитного поля. Основным вклад в возмущение орбиты вносят те гармоники, номера которых близки к частоте бетатронных колебаний. Поэтому коррекции подлежат в основном первая гармоника Фурье азимутальной асимметрии вертикальной составляющей магнитного поля  $H_z/V$ . Первая гармоника искажения  $H_z$  с амплитудой 0,5% в синхрофазотроне ОИЯИ в результате искажения орбиты может привести к уменьшению рабочей области на 50 см. Таким образом, имеющиеся и появляющиеся искажения в распределении магнитного поля по азимуту могут привести к существенному снижению интенсивности ускоренного пучка в синхрофазотроне.

Цель данной работы - определить распределение искажений  $H_z$  по азимуту в рабочей области камеры, оценить их влияние на орбиту пучка и скорректировать имеющиеся искажения, если невозможно устранить вызвавшие их причины.

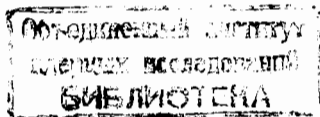
## 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Вначале измерялось распределение остаточного магнитного поля по азимуту  $\frac{\Delta H_0}{H}$  % для  $H = 160$  Э на радиусах  $R_0$  и  $R_0 \pm 60$  см после цикла размагничивания с током  $800$  А /  $H_0 = 59$ /. Затем было измерено распределение магнитного поля по азимуту  $\frac{\Delta H_{II}}{H}$  % от цикла с  $H = 4 \times 10^3$  Э/с при  $H = 160$  Э на тех же радиусах /  $R_0$  и  $R_0 \pm 60$  см/.

Измерения проводились баллистическим гальванометром и двумя катушками, длина которых равнялась длине полюса в азимутальном направлении. Одна из катушек оставалась неподвижной /на опорном полюсе/, а вторая перемещалась по полюсам магнита на измеряемых радиусах. Постоянные катушек  $SW = 90000$  см<sup>2</sup>. вит.

Зависимость  $\frac{\Delta H}{H} = f(\theta)$  вычислялась по формуле

$$\frac{\Delta H}{H} \% = \frac{\Delta a}{a_{ур} K} \cdot 10^2,$$



где  $\Delta a$  - показания гальванометра, соответствующие разности средних значений магнитного поля  $\Delta H$  на измеряемом и опорном полюсах,  $a_{ур}$  - показания гальванометра, соответствующие среднему значению магнитного поля  $H$  на измеряемом полюсе;  $K$  - коэффициент шунтировки гальванометра.

Ошибка при измерении  $\frac{\Delta H}{H}$  % равнялась:

$$\frac{\delta \frac{\Delta H}{H}}{\frac{\Delta H}{H}} = \frac{\delta \Delta a}{\Delta a} + \frac{\delta a_{ур}}{a_{ур}} + \frac{\delta K}{K}, \quad \frac{\delta \Delta a}{\Delta a} = \pm \frac{1}{2} \frac{\delta \Delta a_1 + \delta \Delta a_2}{\Delta a}$$

При  $\Delta a = 100$  мм и  $\delta \Delta a_1 = \delta \Delta a_2 = \pm 0,25$  мм,  $\frac{\delta \Delta a}{\Delta a} = \pm 0,25\%$ ;

при  $a_{ур} = 150$  мм  $\frac{\delta a_{ур}}{a_{ур}} = \pm 0,17\%$ .

$$K = \frac{R^2_{внешн.}}{R_1 R_2}, \quad \frac{\delta K}{K} = 2 \frac{\delta R_{внешн.}}{R_{внешн.}} + \frac{\delta R_1}{R_1} + \frac{\delta R_2}{R_2}$$

$R_{внешн.}$  измерялось мостом сопротивлений с точностью  $\pm 0,5\%$ . Сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  устанавливались на штепсельных магазинах

с точностью  $\pm 0,1\%$ . Поэтому  $\frac{\delta K}{K} \leq \pm 1,2\%$ .

Гальванометр отключался от измерительной схемы с помощью специального устройства в момент подачи импульса от компаратора ведущего магнитного поля ускорителя. Ошибка при отключении достигала нескольких сотых долей процента.

Таким образом, ошибка в измерении  $\frac{\Delta H}{H}$  не должна быть хуже  $\pm 1,7\%$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Распределение магнитного поля по азимуту  $\frac{\Delta H}{H}$  % при  $H = 160$  Э

было измерено по всем полюсам магнита на радиусах  $R_0$  и  $R_0 \pm 60$  см при токе в цикле размагничивания  $800$  А. Раздельно измерялось рас-

пределение магнитного поля по азимуту  $\frac{H_{II}}{H}$  % от цикла с  $H = 4 \cdot 10^3$  Э/с

и от остаточного поля  $\frac{H_0}{H}$  % для  $H = 160$  Э после окончания цикла

размагничивания с тем же током.

Полученные в процессе измерения результаты позволили устранить наиболее опасные локальные искажения магнитного поля, вызванные появлением контуров токов, охватывающих магнитопровод,

$\frac{\Delta H}{H}$  %, усредненное по квадрантам,  $A_H$  и  $A_R$  - при  $H = 160$  Э,  $r = R_0$  и  $R_0 \pm 60$  см,  $I_{ц.р} = 800$  А

кварт	$\frac{\Delta H}{H}$ %, $A_H$ , $A_R$	$R_0 + 60$ см	$R_0$	$R_0 - 60$ см
I	$\frac{\Delta H_{II}}{H}$ %	0	0	0
	$\frac{\Delta H_{HO}}{H}$ %	0	0	0
	$\frac{\Delta H}{H}$ %	0	0	0
II	$\frac{\Delta H_{II}}{H}$ %	+0,18	+0,11	+0,10
	$\frac{\Delta H_{HO}}{H}$ %	+0,03	+0,08	+0,11
	$\frac{\Delta H}{H}$ %	+0,21	+0,19	+0,21
III	$\frac{\Delta H_{II}}{H}$ %	0	-0,02	-0,07
	$\frac{\Delta H_{HO}}{H}$ %	+0,09	+0,10	+0,06
	$\frac{\Delta H}{H}$ %	+0,09	+0,08	-0,01
IV	$\frac{\Delta H_{II}}{H}$ %	-0,04	-0,08	-0,15
	$\frac{\Delta H_{HO}}{H}$ %	0	+0,01	+0,01
	$\frac{\Delta H}{H}$ %	-0,04	-0,07	-0,14
	$A_H$ (%)	0,11	0,12	0,15
	$A_R$ (мм)	57	59	77
	$\Delta \varphi^\circ$	+69°	+66°	+48°

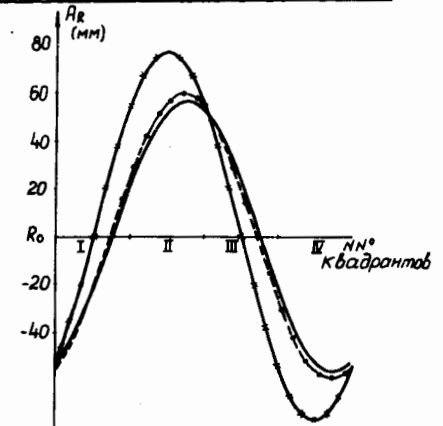


Рис.1. Первая гармоника искажения орбиты пучка по радиусу ( $A_R$ ) до коррекции.  $H = 160$  Э, ток размагничивания  $800$  А.

в основном из-за нарушения изоляции между деталями вакуумной камеры и магнитопроводом.

В табл.1 приведены значения  $\frac{\Delta H}{H}\%$ ,  $\frac{\Delta H_{II}}{H}\%$  и  $\frac{\Delta H_0}{H}\%$ , усредненные по

квадрантам, относительно квадранта I на измеренных радиусах при  $H = 160$  Э. В этой же таблице и на рис.1 приведены значения амплитуд первой гармоники азимутальной асимметрии магнитного поля  $A_H$ , искажения орбиты пучка по радиусу  $A_R$  и их распределение по азимуту при  $H = 160$  Э, полученные из данных измерений. Из них видно, что асимметрия в распределении магнитного поля по азимуту в момент инжекции приводит к появлению первой гармоники искажения орбиты пучка по радиусу с амплитудой 6-8 см.

Таблица 2

Величина тока в обмотках коррекции первой и второй гармоник азимутальной асимметрии с числом витков  $n = 2$ ,  $H = 160$  Э,  $I_{ц.р} = 800$  А

Обмотки	1-я гармоника		2-я гармоника	
	sin I	cos I	sin II	cos II
Ток /А/	+0,5*	+3,0	+0,25	+0,25

\* Знак + означает, что положительная добавка поля создается на I и II квадрантах обмотками первой гармоники, на I и III квадрантах - обмотками второй гармоники.

В табл.2 приведены расчетные значения токов в обмотках коррекции первой и второй гармоник Фурье с числом витков в них, равным 2. При такой коррекции с помощью измерительных электродов [3] определено положение пучка по радиусу в восьми точках азимута кольца магнита с шагом  $40^\circ - 50^\circ$  на радиусах  $R_0$  и  $R_0 + 45$  см на  $H = 170$  Э. Данные этих измерений приведены в табл.3, из которой видно, что искажение скорректированной орбиты пучка при  $H = 170$  Э составляет 3-5 см вместо 12-16 см до ее коррекции.

Определенный интерес представляет информация о распределении магнитного поля по азимуту на различных радиусах в линейных промежутках и на краях квадрантов. На малых полях это распределение нужно знать для определения его влияния на орбиту инжектируемого и ускоряемого пучка, а на больших полях - для учета влияния распределения на пучок, выводимый из камеры ускорителя и транспортируемый к физическим установкам.

В табл.4 и на рис.2 приведено  $\frac{H_i}{H}\% = f(\theta)$  при  $H = 160$  Э у края квадранта I и на вводимом линейном промежутке на радиусах  $R_0$  и  $R_0 + 70$  см.

Положение пучка по радиусу /мм/ после коррекции азимутальной асимметрии магнитного поля.  $H = 170$  Э,  $I_{ц.р} = 800$  А

квадр.	I		II		III		IV	
азимут (град)	27°	66°	18°	63°	27°	66°	27°	72°
Радиус								
$R_0 + 45$ см	0	0	-20	-40	-50	-40	-40	-20
$R_0$	+20	+10	-10	-10	-10	0	-10	0
$R_0 - 45$ см	-50	-10	-10	-10	-10	0	-10	-50

Таблица 4

$\frac{H_i}{H}\% = f(\theta)$  на краю квадранта I и в промежутке ввода.

$H = 160$  Э,  $r = R_0$  и  $R_0 + 70$  см

L (см)	Край квадрант I		Промеж. ввода (к квадранту IV)		
	$R_0$	$R_0 + 70$ см	L (см)	$R_0$	$R_0 + 70$ см
200	100	-	8,7	62,5	63,5
110	97,5	96	17,5	50	50,7
80	96,5	94,5	27,5	37,8	38
60	94,5	92,5	37,5	31	30,5
40	94,3	92,3	57,5	21,3	21
30	94	92	77,5	16	15
20	92,8	91,2	107,5	7,8	8,5
10	88	87,5	137,5	3,4	3,9
0	77	78,5	180	0,5	0,6

Рис.2.  $\frac{H_i}{H}\% = f(\theta)$  в промежутке ввода и у края квадранта  $H = 160$  Э; 1 -  $r = R_0$ , 2 -  $r = R_0 + 70$  см.

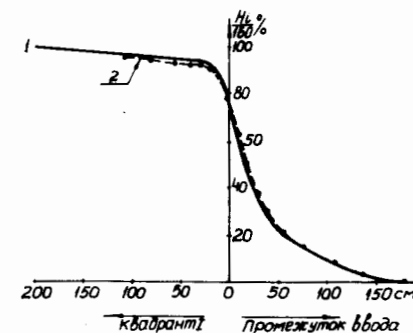


Таблица 5

$\frac{H_1}{H} \% = f(\theta)$  в линейных промежутках и на краях квадрантов,

$H = 160$  и  $11500$  Э,  $r = R_0$

Квадр. IV, I, II, III	Промеж. L (см)	ввод		Ускоряющ. I		вывод		Ускоряющ. II	
		H(Э)	I60	II500	I60	II500	I60	II500	I60
Квадр. IV, I, II, III	192,3	100	100	100	100	100	100	100	100
	100,8	99,4	98,1	99,4	97,8	99,9	98,1	99,8	98,1
	0	78,2	76,5	79,3	76,3	79,3	76,3	79	76,7
Промежутки	89,2	15,4	17,6	13,5	16,9	15,5	17,2	15,1	17
	178,4	2	2,7	0,1	2,4	2,2	2,3	0,2	2,3
	267,6	-0,1	0	-0,2	0	0	0	-0,1	0
	356,8	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0	-0,1
	356,8	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
	267,6	-0,3	0	0,1	0	0	0	-0,1	0
Квадр. I, II, III, IV	178,4	1,3	2,7	2,7	2,4	1,8	2,3	2	2,3
	89,2	16	17,7	17,8	17	16,0	17,8	15,4	17,2
	0	78,1	76,7	82,3	76,4	78,6	77,8	78,2	77
Квадр. I, II, III, IV	100,8	99,3	98	99,4	97,6	99,5	99	99,4	98,2
	192,3	100	100	100	100	100	100	100	100

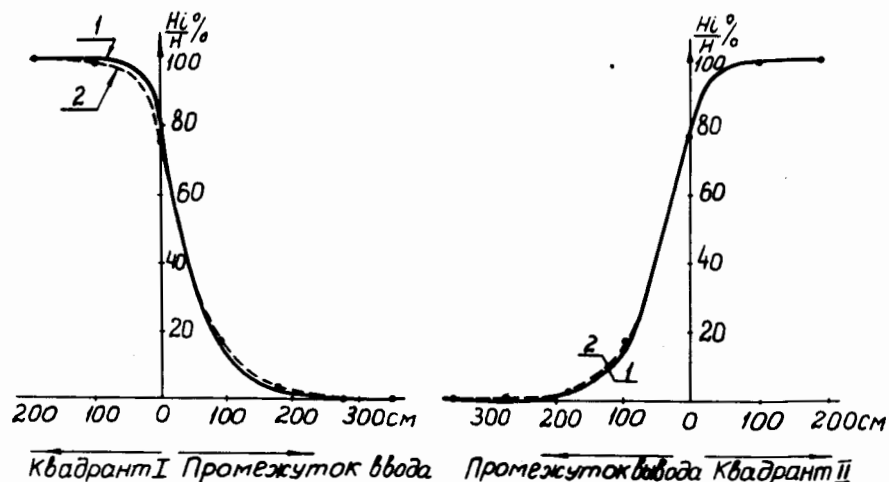


Рис. 3.  $\frac{H_1}{H} \% = f(\theta)$  в промежутке ввода и в промежутке вывода,  
1 -  $H = 160$  Э, 2 -  $H = 11500$  Э.

В табл. 5 и на рис. 3 приведено  $\frac{H_1}{H} \% = f(\theta)$  при  $H = 160$  и  $11500$  Э в линейных промежутках на радиусе  $R_0$ .

Таблица 6

$\frac{H_1}{H} \% = f(\theta)$  в промежутке вывода и на краю квадранта II  
 $H = 11500$  Э,  $r = R_0$ ,  $R_0 + 50$  см и  $R_0 + 125$  см

L (см)	$R_0$	$R_0 + 50$ см	L (см)	$R_0 + 125$ см
135	100		146,5	46
115	99,8		126,5	45,7
95	99,5	98,5	101,5	45,2
75	98	96,5	81,5	45
55	96	94,5	56,5	44,3
45	95	93,5	26,5	41,5
35	94	92,7	16,5	40,5
25	92,6	91,5	6,5	38,5
15	90	89		
5	84	84		
5	72	72,5	3,5	35,6
15	56	56,7	13,5	31,6
25	43	43,5	23,5	27,2
35	34	34	33,5	23,4
45	28	28,2	43,5	20,4
55	24	23,5	53,5	18
65	20	20,2	63,5	15,8
75	17,5	17,1	73,5	13,7
85	14,8	14,8	83,5	11,8
95	12,4	12,4	93,5	10,2
105	10,5	10,6	103,5	8,4
115	8,5	8,8	113,5	6,8
125	6,9	6,9	123,5	5,4
135	5,5	5,5	133,5	4,3
145	3,2	-	143,5	3,2

В табл. 6 и на рис. 4 приведено  $\frac{H_1}{H} \% = f(\theta)$  на  $H = 11500$  Э у края квадранта II и в промежутке вывода на радиусах  $R_0$ ,  $R_0 + 50$  см и  $R_0 + 125$  см.

Из приведенных данных видно, что асимметрия в распределении магнитного поля по азимуту в линейных промежутках сравнительно незначительна и не представляет опасности для искажения орбиты



пучка. Это подтвердилось и экспериментальной проверкой, путем создания добавочного магнитного поля того и другого знака обмотками, уложенными на половинах промежутков, а также вокруг двух крайних сердечников квадрантов. При этом увеличения захвата в квазибетатронный и синхротронный режимы ускорения не наблюдалось.

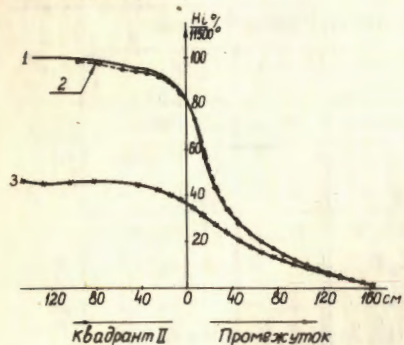


Рис. 4.  $\frac{H_i}{H_0} \% = f(\theta)$  в промежутке вывода и у края квадранта II,  $H = 11500$  Э; 1 -  $r = R_0$ , 2 -  $r = R_0 + 50$  см, 3 -  $r = R_0 + 125$  см.

Проведенные исследования позволили:

1. Получить подробную карту распределения магнитного поля по азимуту в рабочей области камеры в начальный период ускорения, а на выводном промежутке и вне рабочей области - при  $H = 11,5$  кЭ

2. Выявить и устранить опасные локальные искажения.

3. Установить, что асимметрия в распределении магнитного поля по азимуту в линейных промежутках незначительна и не вносит ощутимых искажений в положение орбиты пучка по радиусу.

4. Рассчитать необходимые токи в обмотках коррекции первой и второй гармоник асимметрии магнитного поля по азимуту, которые позволили уменьшить искажение орбиты пучка по радиусу с 15 до 5 см.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коломенский А.А., Лебедев А.Н. Теория циклических ускорителей. ГИФМЛ, М., 1962.
2. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, Б1-9-8374, Дубна, 1974.
3. Конский Г.Н., Царенков А.П., Штырляев В.А. ОИЯИ, 9-5419, Дубна, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 мая 1983 года.

Заболотин В.П. и др.

9-83-335

Азимутальная неоднородность магнитного поля в синхрофазотроне ОИЯИ и коррекция орбиты пучка по радиусу в начальный период ускорения

Приведены данные о распределении магнитного поля  $H = 160$  Э по азимуту квадрантов магнита на радиусах  $R_0$  и  $R_0 \pm 60$  см при токе в цикле размагничивания 800 А, о величине амплитуды и положении первой гармоники азимутальной асимметрии магнитного поля, искажении орбиты пучка по радиусу, а также о величинах тока в обмотках коррекции, служащих для компенсации искажений. Представлено распределение магнитного поля по азимуту в линейных промежутках, а также на краях квадрантов в рабочей области и вне ее при  $H = 160, 3000$  и  $11500$  Э. Показана результативность коррекции искажений орбиты пучка по радиусу в начальный период ускорения.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Zabolotin V.P. et al.

9-83-335

Azimuthal Inhomogeneity of Magnetic Field in JINR Synchrophasotron and Correcting of Beam Orbit over Radius at the Initial Stage of Acceleration

Information is presented on the distribution of magnetic field  $H = 160$  Oe over magnet quadrant azimuth on  $R_0$  and  $R_0 \pm 60$  cm radii for 800 A current in demagnetization cycle, on amplitude value and position of the first harmonics of azimuthal symmetry of the magnetic field and beam orbit distortion over radius, as well as on current values in correction coils which serve to compensate distortions. The magnetic field distribution over azimuth in linear gaps and on edges of the quadrants in the working region and outside it at  $H = 160, 3000$  and  $11500$  Oe is presented. The possibilities are shown of correcting the beam orbit distortions over radius at the initial stage of acceleration.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.