

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

5516/2-81

9/41-81

9-81-539

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

ИССЛЕДОВАНИЕ
ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ
СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ
И ИХ ВЛИЯНИЯ НА УСКОРЯЕМЫЙ ПУЧОК

1981

В данной работе приведены результаты исследования и наладки магнитного поля синхрофазотрона за период 1960-74 г.г., которые проводились с целью повышения захвата пучка в режим ускорения на полях 160 и 230 Гс и уменьшения его потерь при ускорении.

1. ПОКАЗАТЕЛЬ НЕОДНОРОДНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОЛЯХ 160÷360 Гс

На 42 полюсах магнита измерено распределение по радиусу показателя неоднородности магнитного поля n при цикле с $H = 4 \cdot 10^8$ Гс/с в области $R_0 \pm 60$ см с шагом по радиусу 10 см на поле 160 Гс 1^4 . Измерения проводились с помощью баллистического гальванометра и катушек, длина которых равна размеру полюса по азимуту. Точность измерений не хуже $\pm 2\%$. Данные измерений, усредненные по квадрантам и кольцу магнита, приведены в табл.1. В этой же таблице представлены значения поправки Δn_0 в показатель неоднородности магнитного поля, полученной вследствие влияния остаточного поля при наличии одного цикла размагничивания с током 800 А, а также поправки Δn_1 , полученной вследствие искажений, вносимых материалом измерительных электродов, установленных на 8 полюсах магнита.

В табл.2 и на рис.1 приведено распределение по радиусу значений n , усредненных по квадрантам и кольцу магнита с учетом вышеуказанных поправок Δn_0 и Δn_1 , а в табл.3 представлено распределение по радиусу разницы между усредненными значениями n на квадрантах и по кольцу магнита.

Чтобы выбрать оптимальное значение n , с помощью обмоток коррекции было подобрано его распределение по радиусу на уровнях 0,56; 0,60; 0,62; 0,63; 0,64; 0,65; 0,66; 0,67; 0,70; 0,73; 0,75; 0,78.

Катушечный метод измерения распределения n по радиусу при отсутствии корректирования и при его корректировании до вышеуказанных уровней на полях 160, 240 и 360 Гс был продублирован и другим методом, основанным на измерении частоты вертикальных бетатронных колебаний ускоряемых частиц ν_z . Данные этих измерений, представленные в табл.2 и 5, показывают хорошее совпадение результатов обоих методов.

Таблица 1

R (см)	r _L					Δn _o	Δn _p
	I	II	III	IV	по кольцу		
+65	0,77	0,76	0,79	0,78	0,775	-0,03	-0,035
+60	0,78	0,77	0,80	0,775	0,78	-0,03	-0,03
+50	0,78	0,77	0,80	0,77	0,78	-0,04	-0,02
+40	0,765	0,76	0,78	0,76	0,765	-0,035	-0,01
+30	0,745	0,74	0,76	0,74	0,745	-0,03	0
+20	0,725	0,72	0,74	0,72	0,725	-0,02	-0,01
+10	0,71	0,70	0,71	0,705	0,705	-0,015	0
R _o	0,695	0,69	0,69	0,69	0,69	-0,01	0
-10	0,675	0,67	0,67	0,67	0,67	+0,01	0
-20	0,655	0,65	0,65	0,65	0,65	+0,015	+0,01
-30	0,63	0,63	0,62	0,625	0,625	+0,02	0
-40	0,61	0,61	0,60	0,605	0,605	+0,03	+0,01
-50	0,60	0,595	0,58	0,585	0,59	+0,04	+0,02
-60	0,59	0,59	0,57	0,58	0,58	+0,03	+0,03
-65	0,59	0,595	0,56	0,58	0,58	+0,03	+0,035

Таблица 2

R см кв.др.	I	II	III	IV	По кольцу	
					катодной	ν*
+65	0,705	0,695	0,725	0,715	0,71	
+60	0,72	0,71	0,74	0,715	0,72	
+50	0,72	0,71	0,74	0,71	0,72	
+40	0,72	0,715	0,735	0,715	0,72	0,73
+30	0,715	0,71	0,73	0,71	0,715	
+20	0,695	0,69	0,71	0,69	0,695	0,70
+10	0,695	0,685	0,695	0,69	0,69	
R _o	0,685	0,68	0,68	0,68	0,68	0,69
-10	0,685	0,68	0,68	0,68	0,68	
-20	0,68	0,675	0,675	0,675	0,675	0,68
-30	0,65	0,65	0,64	0,645	0,645	
-40	0,65	0,65	0,64	0,645	0,645	0,65
-50	0,66	0,655	0,64	0,645	0,65	
-60	0,65	0,65	0,63	0,64	0,64	
-65	0,655	0,66	0,625	0,645	0,645	

*Измерения проводились методом, основанным на измерении частоты вертикальных бетатронных колебаний ускоренных частиц.

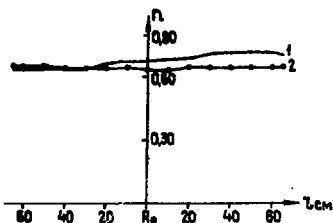


Рис. 1. Распределение по радиусу показателя магнитного поля, усредненного по 42 полюсам магнита, на поле 160 Гс до корректирования /1/ и после /2/ при токе в цикле размагничивания 800 А.



Рис. 2. Зависимость интенсивности /1/ и потерь пучка протонов /2/ при ускорении от уровня показателя магнитного поля.

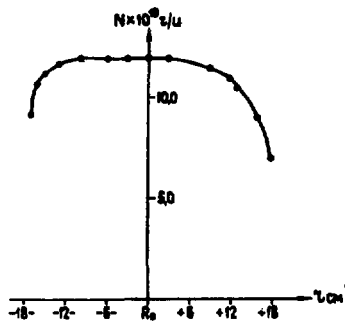


Рис. 3. Зависимость интенсивности ускоренного пучка протонов от его положения в камере ускорителя в интервале ускорения от 20 мс до 100 мс при скорректированном показателе магнитного поля на уровне 0,65 /до 20 мс пучок ускоряется по радиусу R_0 /.

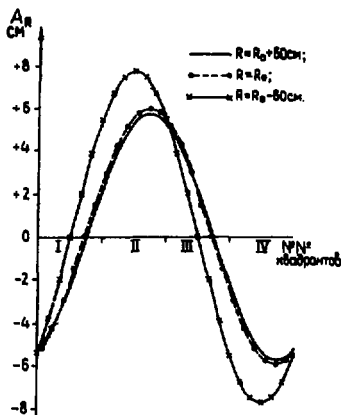


Рис. 4. Первая гармоника искажения орбиты пучка по радиусу на поле 160 Гс до ее корректирования при токе в цикле размагничивания 800 А.

Таблица 3

R _{с.н} \ № квадр.	I	II	III	IV
	+65	-0,055	-0,015	+0,015
+60	0	-0,01	+0,02	-0,005
+50	0	-0,01	+0,02	-0,01
+40	0	-0,005	+0,015	-0,005
+30	0	-0,005	+0,015	-0,005
+20	0	-0,005	+0,015	-0,005
+10	+0,005	-0,005	+0,005	0
R _с	+0,005	0	0	0
-10	+0,005	0	0	0
-20	+0,005	0	0	0
-30	+0,005	+0,005	-0,005	0
-40	+0,005	+0,005	-0,005	0
-50	+0,01	+0,005	-0,01	-0,005
-60	+0,01	+0,01	-0,01	0
-65	+0,01	+0,015	-0,02	0

Таблица 4

Время (мс)	N x 10 ¹⁰ ч/л				Потери			
	3	20	100	3000	от 3 до 20	от 20 до 100	от 3 до 100	от 100 до 3000
0,56	3	1,5	1,0	0,9	2	1,5	3	1,1
0,60	6	3,0	1,5	1,3	2	2	4	1,2
0,62	6	3,4	2,6	2,4	1,7	1,4	2,3	1,1
0,63	11	6,5	4,7	4,3	1,7	1,4	2,3	1,1
0,64	18	9,0	7,5	6,8	2,0	1,2	2,4	1,1
0,65	30	14,0	11,0	10,0	2,1	1,2	2,7	1,1
0,66	27	13,0	8,4	7,7	2,1	1,6	3,2	1,1
0,67	24	9,0	5,6	5,0	2,3	1,6	4,2	1,1
0,70	19	5,5	2,0	1,8	3,4	2,8	9,5	1,1
0,73	10	3,0	1,5	1,3	3,3	2,0	6,7	1,2
0,75	5	1,5	0,7	0,6	3,4	2,1	7,1	1,2
0,78	0,15	0,11	0,09	0,09	1,4	1,2	1,7	1,0
без корре- кции	22	4,6	1,6	1,5	4,8	2,9	13,8	1,1

Таблица 5

H (Гс) метод	160		240		360	
	катуш.	ν_z^*	катуш.	ν_z^*	катуш.	ν_z^*
+65	0,65		0,66		0,67	
+60	0,65		0,66		0,67	
+50	0,65	0,65	0,66	0,66	0,67	0,665
+40	0,65	0,65	0,65	0,66	0,66	0,66
+30	0,65	0,65	0,65	0,66	0,66	0,66
+20	0,65	0,65	0,65	0,655	0,65	0,66
+10	0,64	0,645	0,64	0,65	0,65	0,655
R_6	0,64	0,645	0,64	0,65	0,65	0,65
-10	0,65	0,65	0,64	0,65	0,65	0,65
-20	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,645
-30	0,65	0,65	0,65	0,645	0,65	0,64
-40	0,65	0,66	0,64	0,645	0,64	0,64
-50	0,66	0,66	0,65	0,645	0,64	0,635
-60	0,66		0,65		0,64	
-65	0,66		0,65		0,64	

* Измерено методом, основанным на измерении частоты вертикальных бетатронных колебаний.

Для каждого из уровней μ измерена величина интенсивности пучка на 3, 20 и 100 мс с начала ускорения при одном и том же числе инжектируемых частиц $/ 8 \cdot 10^{12}$ ч/и/ и при неизменном законе связи частоты ускоряющего напряжения с магнитным полем. Результаты приведены в табл. 4 и на рис. 2; анализируя их, можно сделать следующее заключение:

1. Максимальный захват пучка в ускорение и его минимальные потери при этом получаются при значении $\mu=0,65$, которое следует сохранять неизменным по крайней мере в течение первых 100 мс ускорения.

2. Отрицательное воздействие на захват и потери пучка при ускорении оказывают резонансы $\nu_r = \nu_z$ /при $\mu=0,50$ /, $\nu_r = 2/3$ ($\mu=0,62$), $3\nu_r - \nu_z = 1$ ($\mu=0,67$), $3\nu_r = 2\nu_z$ ($\mu=0,69$) и $\nu_r = 1/2$ ($\mu=0,79$), а также суммовые резонансы выше второго порядка при $\mu=0,73$ и $0,77$. Особенно сильное воздействие оказывают резонансы $\nu_r = \nu_z$, $\nu_r = 1/2$ и $\nu_r = 2/3$.

Из табл. 3 видно, что распределение по радиусу значений μ , усредненных по квадрантам с точностью до ошибки измерения, совпадает с распределением, усредненным по кольцу магнита. Не-

Таблица 6

$R_{\text{см}}$	-6I	-53,5	-12,5	+2,5	+17,5	+33,5	+43,5	+53,5	+67
маркир.	П10,23	П8,2I	П3,16	П1,14	П4,17	П6,19	П7,20	П8,2I	П11,24
(A)	+0,3	+0,3	-0,6	-0,6	-0,6	-0,8	-0,8	-0,8	-1,2
№ № обм.	I			2			3		4

Таблица 7

Положение пучка в камере (см)	$N \times 10^{10} \text{ч/л}$			Потери от 3 до 100 мс
	3	20	100 мс	
+18			7,0	4,3
+16			9,0	3,3
+13			10,5	2,8
+12			11,0	2,7
+9			11,5	2,6
+6			12,0	2,5
R_0	30	15	12,0	2,5
-6			12,0	2,5
-10			12,0	2,5
-13			11,7	2,6
-15			11,2	2,7
-16			10,8	3,0
-17			9,1	3,3

Таблица 8

№ № квадр. Радиус (см)	I	II	III	IV
$R_0 +60$	0	+0,21	+0,09	-0,04
R_0	0	+0,19	+0,08	-0,07
$R_0 -60$	0	+0,21	-0,01	-0,14

смотря на это, было проверено влияние первой и второй гармоник в Δ с амплитудой $0,01 \pm 0,04$ в области $R_0 \pm 15$ см на захват и потери пучка при ускорении. Оказалось, что только при амплитуде более $0,02$ в обоих случаях потери пучка несколько увеличивались.

В табл. 6 представлено распределение по радиусу проводников обмоток коррекции показателя неоднородности магнитного поля и величины токов в них на поле 160 Гс для $\mu = 0,65$ при токе в цикле размагничивания 800 А.

В табл. 7 и на рис. 3 приведена зависимость интенсивности ускоренного пучка N протонов от его положения в камере ускорителя в интервале ускорения от 20 до 100 мс при откорректированном μ до уровня $0,65$ /поле инъекции 160 Гс/.

В интервале ускорения до 20 мс наименьшие потери пучка получаются при его ускорении по центральному радиусу R_0 , а в интервале от 20 до 100 мс с наименьшими потерями пучок можно ускорять в области $R_0 \pm 10$ см.

Исходя из данных, приведенных в табл. 5 и 7, и учитывая, что пучок инжектировался в камеру на радиусе $R = R_0 + 63$ см, а также что искажение орбиты пучка по радиусу составляет не менее 6 см и что возможность измерения μ методом измерения частоты вертикальных колебаний ускоренных частиц в пределах радиуса $R = R_0 \pm 50$ см /см. табл. 5/, можно заключить, что в начале ускорения / 160 Гс/ и через 50 мс / 360 Гс/ после него, в пучке содержится достаточно большое число частиц с малыми амплитудами колебаний / $1-4$ см/. Это указывает на отсутствие заметной раскочки колебаний частиц при ускорении.

Получение максимальной величины захвата и минимальных потерь при ускорении пучка только по среднему радиусу R_0 и плавность потерь в интервале ускорения от 20 до 100 мс при смещении пучка в ту и другую сторону от области $R_0 \pm 6$ см $\div R_0 - 10$ см, подтверждает это заключение.

2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО АЗИМУТУ НА ПОЛЕ 160 Гс И ПОЛОЖЕНИЕ ОРБИТЫ ПУЧКА ПО РАДИУСУ

В 1974 г. было измерено распределение магнитного поля по азимуту $\Delta H_{\perp} / H$ при $H = 160$ Гс и $\dot{H} = 4 \cdot 10^8$ Гс/с с помощью катушек и гальванометра /см. выше/. Измерения производились на каждом полюсе магнита на радиусах R_0 и $R_0 \pm 60$ см^{1/5}. Точность измерений не хуже $\pm 1,6\%$.

Было измерено и распределение по азимуту остаточного магнитного поля для $H = 160$ Гс при токе в цикле размагничивания 800 А.

Таблица 9

ампл. I-й гарм. Радиус (см)	A_1 (%)	A (см)
$R_0 + 60$	0,11	5,7
R_0	0,12	5,9
$R_0 - 60$	0,15	7,7

Таблица 10

# № квадр. угол в град. Радиус (см)	I		II		III		IV	
	27	66	18	63	27	66	27	72
$R_0 + 45$	0	0	-2	-4	-5	-4	-4	-2
R_0	+2	+1	-1	-1	-1	0	-1	0
$R_0 - 45$	-5	-1	-1	-1	-1	0	-1	-5

Таблица 11

# № квадр.	Год измер.	$R_0 + 63$ см	$R_0 + 30$ см	R_0	$R_0 - 30$ см	$R_0 - 63$ см
		I	1974	14,5	19,5	21,5
	1960	18,3	-	17,5	-	21,8
II	1974	34,5	32,7	33,0	36,9	39,8
	1960	18,2	-	22,0	-	26,4
III	1974	-0,5	3,5	9,2	13,0	17,0
	1960	6,5	-	7,4	-	13,2
IV	1974	14,5	16,0	15,0	16,8	22,6
	1960	13,7	-	13,3	-	20,6

Данные этих измерений приведены в табл. 8. На основании этих данных рассчитана амплитуда первой гармоники азимутальной асимметрии магнитного поля и амплитуда первой гармоники искажения орбиты пучка по радиусу на поле 160 Гс A_R , которая составляет на радиусах R_0 и $R_0 + 60$ см около 6 см, а на радиусе $R_0 - 60$ см около 8 см /табл. 9 и рис. 4/.

С помощью обмоток коррекции искажение орбиты пучка по радиусу уменьшается до 5-9 см /табл.10 и рис.7/.

3. ПОЛОЖЕНИЕ МАГНИТНОЙ МЕДИАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТЕ СИНХРОФАЗОТРОНА ОТНОСИТЕЛЬНО СРЕДНЕЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПЛОСКОСТИ

В 1968 г. были тщательно скорректированы искажения в распределении магнитной медианной поверхности /ММП/ по азимуту и радиусу. В 1970 г. была задействована система измерения положения ускоренного пучка по вертикали в начальный период ускорения^{/8/}. Она показала, что искажение орбиты пучка по вертикали не превышало 15 мм. В дальнейшем не допускалось ее искажения больше, чем на 20 мм, так как многократные наблюдения показали, что искажения орбиты пучка по вертикали до 25 мм не уменьшают величины захвата пучка в ускорение и не увеличивают его потерь при ускорении.

Чтобы доказать отсутствие нескорректированных больших искажений ММП и сравнить полученные результаты с результатами 1960 г., установить причину появившихся искажений и сравнить первую гармонику искажения орбиты пучка по вертикали, рассчитанной по данным магнитных измерений, с положением пучка по вертикали, зарегистрированным измерительными электродами^{/8/}, в 1974 г. было измерено распределение ММП по азимуту и радиусу. Измерение проведено катушками и баллистическим гальванометром на каждом полюсе магнита /на 176 полюсах/ на радиусах R_0 , $R_0 \pm 30$ см, $R_0 \pm 63$ см на поле 230 Гс /поле инжекции/. Точность измерения не хуже $\pm 0,75$ мм.

В табл.11 приведены значения положения ММП, усредненные по квадрантам, на радиусах R_0 , $R_0 \pm 30$ см и $R_0 \pm 63$ см на поле 230 Гс, а в табл.12 и на рис.5 - значения амплитуд первой гармоники искажения магнитной медианной поверхности $A_{ММП}$ и искажения орбиты пучка по вертикали A_z на этих радиусах. Там же для сравнения приведены результаты измерений положения ММП, проведенные в 1960 г.

Из сравнения результатов измерений 1974 г. и 1960 г. видно, что значительное изменение положения ММП произошло на II квадранте. Характер этого изменения позволяет заключить, что причиной является просадка фундамента магнита под вторым квадрантом с перекосом фундамента по радиусу из-за распределенной нагрузки по наружному радиусу квадранта магнита вследствие построенного в 1963 г. здания экспериментального корпуса. Факт просадки фундамента под вторым квадрантом был установлен в 1969 г..

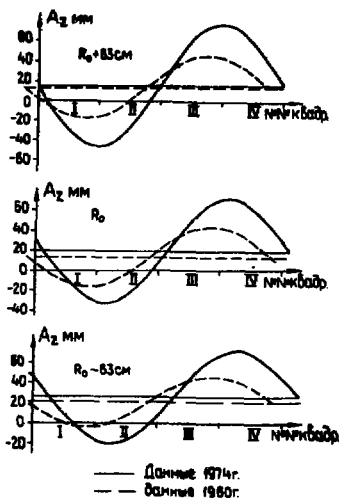


Рис. 5. Значения амплитуд первой гармоники искажения орбиты пучка по вертикали A_2 на поле 230 Гс на радиусах R_0 и $R_0 \pm 63$ см по данным магнитных измерений в 1960 и 1974 гг.

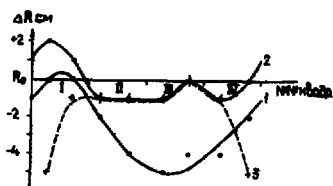


Рис. 6. Положение орбиты пучка по радиусу после ее корректирования на поле 170 Гс, измеренное измерительными электродами на радиусах: $R_0 + 45$ см /1/, $R_0 / 2$ и $R_0 - 45$ см /3/.

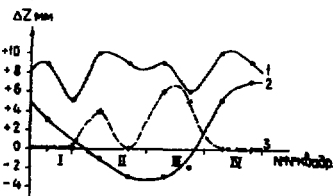


Рис. 7. Положение скорректированной орбиты по вертикали на радиусах $R_0 + 50$ см /1/, $R_0 / 2$, $R_0 - 45$ см /3/ на поле 240 Гс, полученное с помощью измерительных электродов.

Таблица 12

год измер.	Парам.	$R_0 + 63$ см	$R_0 + 30$ см	R_0	$R_0 - 30$ см	$R_0 - 63$ см
1974	$A_{ММП}$	11,5	10,4	9,9	9,7	8,7
	A_z	61	55	52	51	46
	Постоян. составл.	16	19	20	22	26
	$\Delta\varphi$	0°	0°	$+12^\circ$	$+21^\circ$	$+24^\circ$
1960	$A_{ММП}$	5,8	-	5,6	-	4,8
	A_z	31	-	30	-	25
	Постоян. составл.	14	-	14	-	21
	$\Delta\varphi$	-21°	-	-12°	-	-12°

Таблица 13

год измер.	Наличие коррекции	$N \times 10^{10} \text{ ч/н на} :$			Потери до :		
		3	20	100	3000 мс	100	3000 мс
1974	коррекция включена	80	40	32	30	2,5	2,7
	коррекция отключена	20	3	1	0,9	20	22
1967	коррекция включена	18	12	10	9	1,8	2,0
	коррекция отключена	6	1,5	0,6	0,5	10	12

Таблица 14

№ № квадр.	I		II		III		IV	
угол (град.)								
Радиус (см)	27	66	18	63	27	66	27	72
$R_0 + 50$	+9	+5	+10	+9	+9	+6	+10	+9
R_0	+3	0	-1	-3	-3	-2	+5	+7
$R_0 - 45$	0	0	+4	0	+6	+5	0	0

Таблица 15

№ № квадр.	I		II		III		IV	
угол(град.)								
$H(\text{Гс})$	27	66	18	63	27	66	27	72
240	+3	0	-1	-3	-3	-2	+5	+7
280	+3	0	+1	0	+1	+2	+6	-7
320	+2	+2	+5	+5	+6	+4	+6	+8
440	0	+2	+9	+12	+15	+12	+7	+7
540	0	0	+10	+14	+19	+18	+15	+6
640	0	-1	+8	+15	+21	+19	+10	+2

В табл.13 приведены данные о величине захвата пучка в режим ускорения и о его потерях при ускорении при отсутствии и наличии коррекции магнитной плоскости. Как видно, благодаря коррекции магнитной плоскости интенсивность ускоренного пучка возрастает более чем в 30 раз.

В табл.14,15 и на рис.7 показано положение пучка по вертикали на разных радиусах и разных полях после корректирования магнитной плоскости. Из этих данных видно, что при подоб-

ранной коррекции искажение орбиты пучка по вертикали не превышает 10 мм в момент инжекции и 25 мм через 80 мс с начала ускорения /560 Гс/.

ВЫВОДЫ

Благодаря проведенным исследованиям характеристик магнитного поля и их влияния на ускоренный пучок:

- подобрана коррекция искажений характеристик магнитного поля, вносимых остаточным магнитным полем, путем замены пяти циклов размагничивания на один цикл, что позволило увеличить частоту повторения импульсов, а соответственно и эффективность работы синхрофазотрона в 1,5 раза;

- подобрано оптимальное значение показателя неоднородности магнитного поля, равное 0,65, и его распределение по радиусу таким, что в этом случае получается максимальный захват пучка в режим ускорения и минимальные его потери при ускорении в области $R_0 \pm 10$ см. Это позволило заметно увеличить интенсивность ускоренного пучка при его инжекции на поле 160 Гс;

- корректированием положения магнитной медианной поверхности по азимуту и радиусу уменьшено искажение орбиты пучка по вертикали с 110-140 мм до 10-25 мм, что позволило значительно повысить интенсивность ускоренного пучка;

- подтверждено, что положение магнитной медианной поверхности было достаточно тщательно скорректировано в 1968 г., и причиной дополнительных искажений в положении магнитной медианной поверхности, появившихся после 1960 г., является дополнительная деформация фундамента магнита, особенно его перекос под вторым квадрантом вследствие нагрузки от построенного в 1963 г. экспериментального корпуса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, 52-9-8513, Дубна, 1974.
2. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, 52-9-8999, Дубна, 1975.
3. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, 52-9-9203, Дубна, 1975.
4. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, 52-9-9581, Дубна, 1975.
5. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, 51-9-8374, Дубна, 1974.
6. Конский Г.Н., Царенков А.П., Штырляев В.А. ОИЯИ, 9-5419, Дубна, 1970.
7. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, 52-9-8775, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 августа 1981 года.