

10091

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



СЗ45е4

A-484

46/2-77

10/1-74

P9 - 10091

Ю.Г.Аленицкий, Д.П.Василевская, Н.Л.Заплатин,  
С.А.Ивашкевич, Ли Зун, Н.А.Морозов,  
П.Т.Шишлянников

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ  
ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА У-120М

**1976**

P9 - 10091

Ю.Г.Аленицкий, Д.П.Василевская, Н.Л.Заплатин,  
С.А.Ивашкевич, Ли Зун, Н.А.Морозов,  
П.Т.Шишлянников

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ  
ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА У-120М

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Аленицкий Ю.Г. и др.

P9 - 10091

Магнитное поле изохронного циклотрона У-120М

Изложены основные результаты работ по формированию магнитного поля изохронного циклотрона У-120М. Запуск ускорителя на двух режимах работы  $E_p = 40$  МэВ,  $E_p = 30$  МэВ показал, что сформированное поле удовлетворяет требованиям для данного ускорителя.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований  
Дубна 1976

Alenitsky Yu.G. et al.

P9 - 10091

The Magnetic Field of the Isochronous  
Cyclotron Y-120M

The main results of the works on formation of the magnetic field of the isochronous cyclotron Y-120M are presented. Starting-up of the accelerator in two regimes,  $E_p = 40$  MeV,  $E_p = 30$  MeV, has shown that the field formed satisfies the requirements for the given accelerator.

The investigation has been performed at the  
Laboratory of the Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research  
Dubna 1976

Изохронный циклотрон У-120М создан на базе электромагнита классического циклотрона У-120. Выбор параметров ферромагнитных и токовых элементов магнитной системы циклотрона /рис. 1/ рассмотрен в работах /1-4/.

В настоящей статье приводятся основные результаты работ по формированию и анализу магнитного поля ускорителя для трех уровней возбуждения основной обмотки электромагнита  $I_0 = 610, 350, 175$  А, соответствующих получению максимальной энергии протонов  $E_k = 39,9; 30,0; 13,0$  МэВ на конечном радиусе  $r_k = 51$  см. В отличие от циклотрона У-120, в магнитную систему У-120М введены семь основных элементов, параметры которых приведены ниже.

### ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ У-120М

1. Центральная часть спиральных шимм  $\Delta r = 2 \div 30$  / см

Внешняя граница -  $r$  / см / =  $18/57,3 \phi^\circ$ , внутренняя -  $r$  / см / =  $18/57,3 [\phi^\circ - \alpha(r)]$ , где

$$\alpha(r) = \sum_{k=1}^7 a_k r^k,$$

$a_0 = 31,06238$ ;  $a_1 = 2,20383$ ;  $a_2 = -4,20113$ ;  $a_3 = 4,50826$ ;  
 $a_4 = -2,14040$ ;  $a_5 = 0,53621$ ;  $a_6 = -0,06879$ ;  $a_7 = 0,00368$ ;  
 $a_{-1} = 8,8$ ;  $\alpha$  - угловая протяженность, град,  $r \cdot 10$  - текущий радиус, см.

Профиль спиральных шимм  $h_{1,2}(r) = a(r-r_0)^3 + b(r-r_0)^2 + c(r-r_0) + d$ , где  $h_{1,2}$  - расстояние от средней плоскости до нижней и верхней плоскостей шимм, а коэффициенты  $a, b, c, d, r_0$ ,

приведены в табл. 1,2. Геометрия радиальных пазов в спиральных шиммах приведена в табл. 3, где  $\Delta r = r_2 - r_1$  - радиальная ширина паза,  $h$  - расстояние от средней плоскости до дна паза.

Таблица 1

Коэффициенты для  $h_1(z)$

$\Delta Z(\text{см})$	2-4	4-8	8-10	10-21	21-30
a	$1,1458 \cdot 10^{-2}$	0	0	$-3,7566 \cdot 10^{-4}$	$-2,2539 \cdot 10^{-4}$
b	0	$3,4375 \cdot 10^{-2}$	0	$1,0744 \cdot 10^{-2}$	$-8,2644 \cdot 10^{-3}$
c	-1,375	$-4,5625 \cdot 10^{-1}$	0	0	0
d	4,283	5,65	4,1	4,1	5,6
$z_0$	4	0	0	10	32

Таблица 2

Коэффициенты для  $h_2(z)$

$\Delta Z(\text{см})$	2-3	3-5	5-21	21-25	25-30
a	0	$-1,9063 \cdot 10^{-2}$	0	$1,7969 \cdot 10^{-3}$	0
b	0	$1,0563 \cdot 10^{-1}$	0	$-1,3437 \cdot 10^{-2}$	0
c	0	0	$1,9375 \cdot 10^{-1}$	0	0
d	7,3	7,3	6,6	11	11
$z_0$	0	3	0	25	0

Таблица 3

№ паза	1	2	3	4	5	6	7
$z_1$	5,0	8,5	11,5	14,0	16,5	19,0	21,5
$z_2$	6,0	9,5	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5
$h$	5,7	5,85	6,0	6,4	6,8	7,4	7,8

## II. Средняя часть спиральных шимм $\Delta r = /30-54/ \text{ см}$

Внешняя граница: радиус кривизны  $R = 41,73 \text{ см}$ , центр кривизны  $x = -17,22 \text{ см}$ ,  $y = -9,33 \text{ см}$ .

Внутренняя граница: радиус кривизны  $R = 37,49 \text{ см}$ , центр кривизны  $x = -8,1 \text{ см}$ ,  $y = -13,87 \text{ см}$ .

Профиль шимм:  $h_1 = 5,6 \text{ см}$ ,  $h_2 = 11,0 \text{ см}$ .

## III. Конечная часть спиральных шимм $\Delta r = /54-60/ \text{ см}$

Внешняя граница: прямая линия, соединяющая точки  $(x, y): /-52,31; 13,39/; /-59,98; 1,57/$ . Внутренняя граница: прямая  $\phi = 3,963 \text{ рад}$ .

Профиль шимм:  $h_1 = 4,7 + k/2-56/$ , где  $k=0$  для  $\Delta r = /54-56/ \text{ см}$ ,  $k=1$  для  $\Delta r = /56-60/ \text{ см}$ ,  $h_2 = 10,7 \text{ см}$ .

IV. Секторные шиммы  $\Delta r = /49-56/ \text{ см}$ . Боковые поверхности ограничены спиральными шиммами,  $h_1 = 8 \text{ см}$ ,  $h_2 = 10 \text{ см}$ .

V. Центральные стальные цилиндры  $\Delta r = /0,7-2/ \text{ см}$ ,  $h_1 = /4,9-4,3/ \text{ см}$ ,  $h_2 = /6,4-7,3/ \text{ см}$ .

VI. Токовые обмотки. Геометрические размеры концентрических обмоток приведены в табл. 4. Гармонические обмотки состоят из четырех секторных катушек  $R_1 = 8 \text{ см}$ ,  $R_2 = 15 \text{ см}$ ,  $\bar{h} = 4,7 \text{ см}$ ,  $\alpha = 52^\circ$  /угловая протяженность катушки/  $I_{\text{max}} = 300 \text{ А}$ .

VII. Отверстия: В полюсных наконечниках  $\phi 3 \text{ см}$ ,  $h_1 = 11 \text{ см}$ ,  $h_2 = 16,7 \text{ см}$ , в полюсах и ярмах магнита  $\phi /6 \div 7/ \text{ см}$  - сквозные.

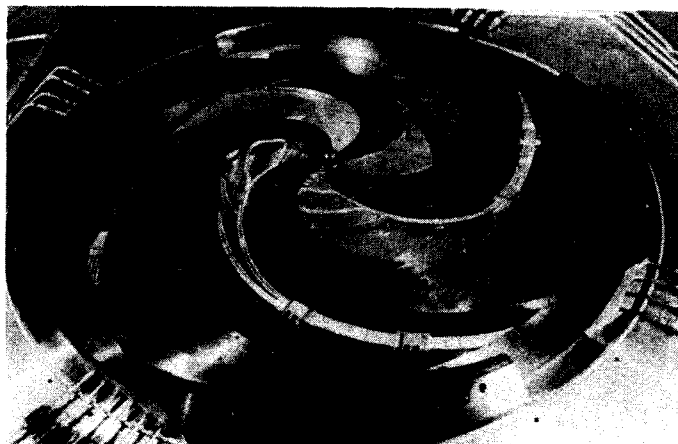
## ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

На схематическом разрезе магнитной системы /рис.2/ цифрами 1,2,8,13,14 отмечены новые элементы или элементы, параметры которых изменены в процессе тон-

Таблица 4. Параметры концентрических обмоток.

№ III	I	2	3	4	5	6	7	8	9
ЧИСЛО ВИТКОВ	5	5	5	4	3	3	3	3	2
$\bar{R}$ (мм)	55	90	120	145	195	243	277	313	337
$\bar{h}$ (мм)	75	76	80	80	87	47,5	47,5	47,5	47,5
$I$ (А) <small>max</small>	300	500	600	300	600	500	280	500	300

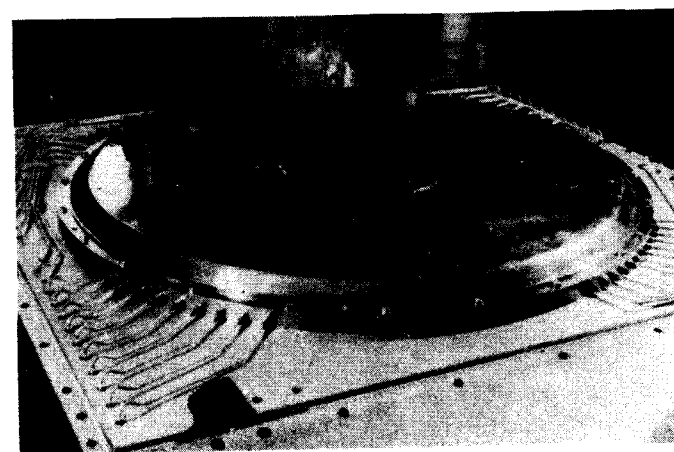
№ III	I0	II	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8
ЧИСЛО ВИТКОВ	2	2	2	2	3	3	4	4	4
$\bar{R}$ (мм)	357	385	405	425	457	479	497	515	533
$\bar{h}$ (мм)	47,5	47,5	47,5	47,5	47,5	47,5	49,5	49,5	49,5
$I$ (А) <small>max</small>	500	300	350	350	260	400	400	400	400



а/



б/



в/

Рис. 1. Магнитная система циклотрона. а/ Полюсной наконечник с системой спиральных и секторных шимм, пятью центральными концентрическими и одной гармонической обмотками. б/ Плакировка камеры с 13-ю концентрическими обмотками. в/ Нижний полюс магнитной системы в сборе.

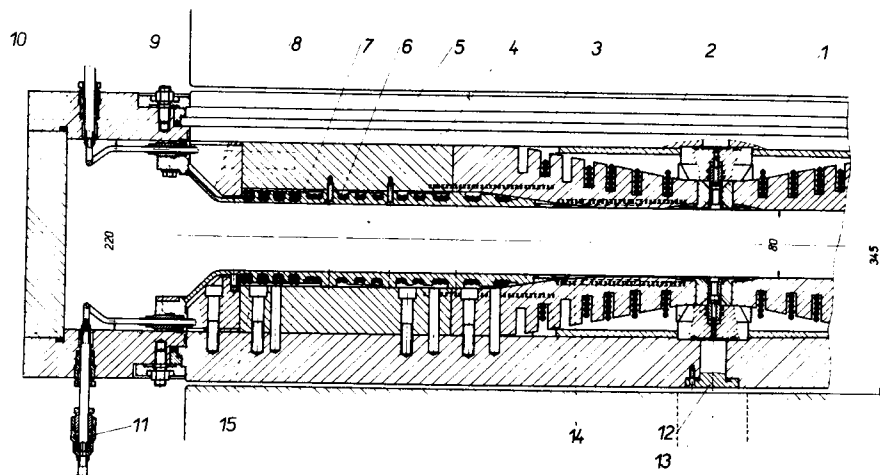


Рис. 2. Схематический разрез магнитной системы.

кого шиммирования поля. Эти изменения позволили обеспечить:

а/ Возможность аксиальной инжекции через отверстие  $\phi$  30 мм в крышке камеры и  $\phi$  60-70 мм в полюсе и ярме электромагнита. Возмущения среднего поля в центре ускорителя при этом составляют 30 А на высоком и 15 Э на низком уровнях поля.

б/ Снижение потребляемой мощности concentрических обмоток за счет изменения конфигурации поля, уменьшение амплитуды 4-ой гармоники, а следовательно, и значения частоты свободных аксиальных колебаний  $Q_z$  для низкого уровня поля путем изменения параметров  $h_1$  и  $h_2$  конечной части спиральных шимм.

в/ Изменение характера распределения среднего магнитного поля в центральной области так, что при последующем формировании изохронного поля с помощью concentрических обмоток были получены меньшие отклонения поля от требуемых зависимостей.

г/ Получение меньшего изменения среднего магнитного поля на радиусах /10-25/ см за счет использования шиммирующих элементов в виде прутков  $\phi$  2 мм, которые

могут размещаться в пазах между спиральными шиммами в два слоя по высоте и с шагом по радиусу 5 мм. Такая система позволила снизить токи в обмотках №3 и №5 /рис. 2/ с величин  $I = 700$  А до  $I = 600$  А для получения среднего магнитного поля в заданных допусках.

На рис. 3 представлены основные характеристики магнитного поля циклотрона, сформированного с помощью ферромагнитных элементов магнитной системы. Из кривых  $\Delta \bar{H}(r)$  видно, что максимальный разброс среднего магнитного поля относительно характерной точки  $r = 16$  см составляет 200 Э в центре и 1000 Э на конечном радиусе  $r_k = 51$  см.

Характерным для зависимостей амплитуды  $H_4(r)$  и отклонения фазы максимума 4-ой гармоники от линии спирали Архимеда  $\Delta \phi_4 = \phi_{4\max} - \frac{r}{4\lambda}$  являются изменения в области конечных радиусов. Эти изменения обусловлены

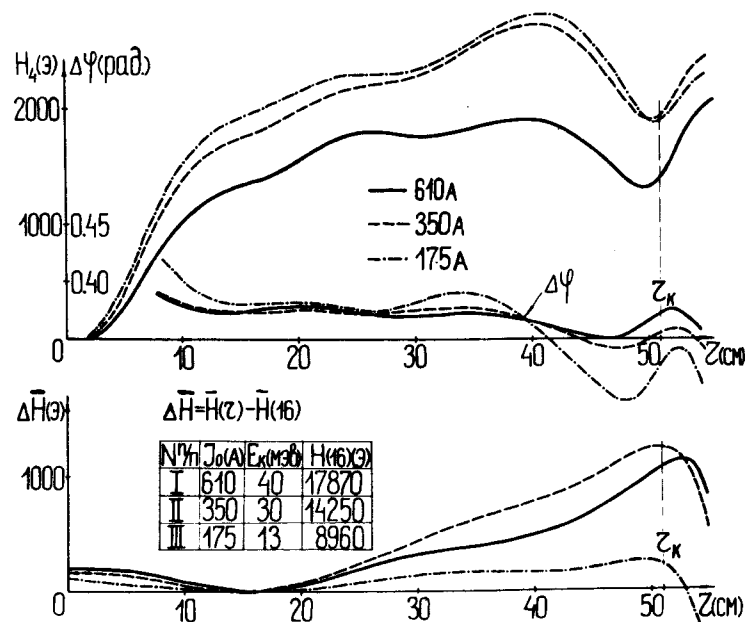


Рис. 3. Основные характеристики поля, полученные с помощью ферромагнитных элементов магнитной системы.

сложной конфигурацией спиральных и секторных шимм, обеспечивающих минимальный разброс среднего магнитного поля и максимально возможный радиус формирования поля. Следует отметить также существенно нелинейную зависимость амплитуды вариации поля от уровня внешнего магнитного поля в принятом диапазоне.

Изохронное среднее магнитное поле рассчитывалось по формуле

$$\bar{H}(r) = \frac{H_0(1+\sigma)}{\sqrt{1 - \left[\frac{r}{r_\infty}(1+\sigma)\right]^2}}, \quad /1/$$

где  $H_0$  - поле на  $r=0$ ,

$$r_\infty = \frac{E_0}{z e H_0},$$

$$\sigma(r) = -\frac{\xi_4^2(r)}{2(N^2-1-n)(1+n)} \left[ 2 - \frac{N^2}{2(N^2-1-n)} + n + r \frac{\xi_4'(r)}{\xi_4(r)} \right] +$$

$$+ \frac{\xi_4^2(r) N^2}{4(N^2-1-n)^2},$$

$$n = \frac{r}{\bar{H}} \frac{d\bar{H}}{dr}, \quad \xi_4(r) = \frac{H_4(r)}{\bar{H}(r)}.$$

Для У-120М учет коэффициента  $\delta(r)$  дает поправку к среднему полю  $\sim 20$  Э /рис. 4/, причем изменение знака  $\Delta\bar{H} = \bar{H}(\sigma \neq 0) - \bar{H}(\sigma = 0)$  в зоне конечных радиусов обусловлено характером зависимости производной вариации  $\xi_4'(r)$  от радиуса. Расчет частот обращения ускоренных частиц по равновесным орбитам, с использованием программы интегрирования уравнений движения в реальном магнитном поле (CYCLOPS<sup>15</sup>), показал, что точность расчета  $\bar{H}(r)$  по /1/ составляет  $\sim \pm 1,0$  Э.

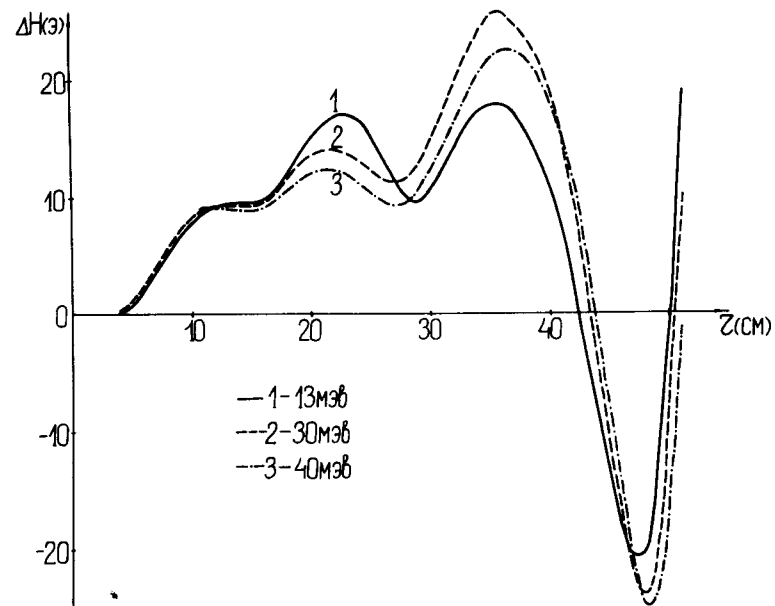


Рис. 4. Величина  $\Delta\bar{H}(r) = \bar{H}(\sigma \neq 0) - \bar{H}(\sigma = 0)$  для реального распределения вариации поля.

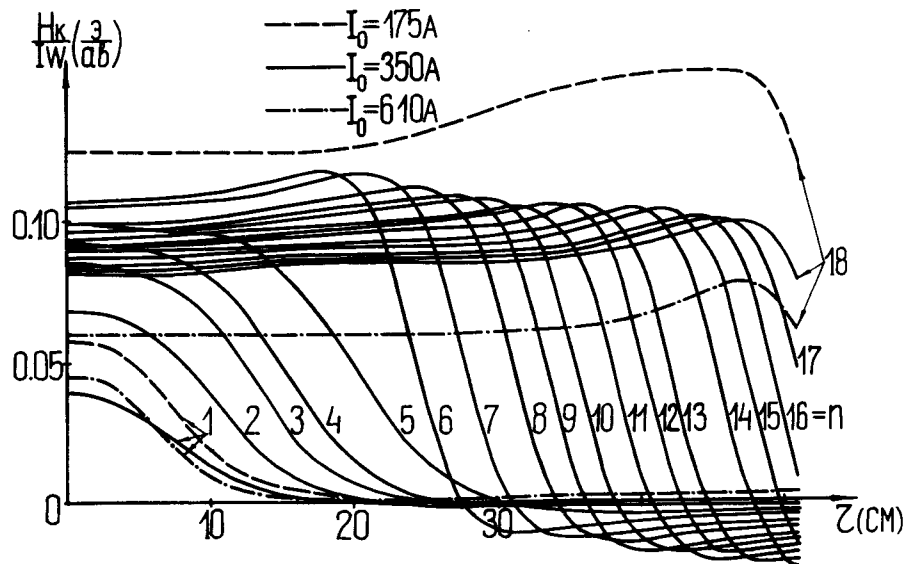


Рис. 5. Экспериментальное распределение магнитного поля concentрических обмоток.

Таблица 5. Значения токов в обмотках для ускорения

$p$ ,  $d$ ,  $He_3^{+2}$  и  $\alpha$ - частиц.

№ обмотки	Протоны			Дейтроны $d$ - частицы			$He_3^{+2}$		
	I75	350	610	210	350	610	I75	350	610
I	-70	-35	-300	-300	-206	-224	-118	-196	-226
2	-500	-500	104	-500	-500	71	-487	-500	57
3	-313	-179	-294	-101	-102	-106	-231	-149	-115
4	300	88	75	300	300	-25	300	295	-50
5	600	600	-335	600	600	41	600	600	-42
6	398	299	101	500	406	159	448	370	137
7	80	242	-69	280	278	39	18	279	13
8	300	404	-8	482	497	198	428	450	142
9	-68	39	-226	53	30	-293	-300	50	-291
10	166	283	216	86	500	141	349	429	61
11	94	194	-300	300	151	-156	82	163	-239
12	20	23	-243	153	305	-10	105	224	44
13	350	322	-350	236	350	-174	232	350	-350
14	140	116	-260	260	260	3	218	217	-11
15	152	307	72	302	400	153	177	395	99
16	400	160	-37	264	84	63	400	83	54
17	400	-295	-400	400	-150	-400	400	-197	-400
18	-362	400	-173	-252	400	167	-356	400	65
$E$ (МэВ)	12,5	29,6	40,0	8,4	15,0	20,3	16,9	40,1	54,4
$f$ (МГц)	15,136	22,971	26,497	8,816	11,754	13,665	10,256	15,714	18,229
$H$ (кэ)	9,912	15,042	17,352	11,546	15,394	17,898	9,984	15,296	17,745
$H$ (кэ)	10,044	15,517	18,091	11,598	15,517	18,091	10,044	15,517	18,091

Расчет требуемых токов в концентрических обмотках для формирования изохронного поля выполнялся на ЭВМ, с использованием метода наименьших квадратов. При этом в качестве исходных данных брались: а/ результаты измерений поля ферромагнитных элементов, представленные на рис. 3; б/ изохронное поле считается по  $1/\lambda$ , где константа  $H_0$  выбирается из условия равенства поля железа - изохронному на радиусе  $r_k = 51$  см; в/ выделенные величины полей обмоток.

Для выделения магнитного поля обмоток, параметры которых приведены в табл. 4, были проведены измерения

19 топографий для каждого уровня поля при максимальных токах в катушках. В экспериментах также было показано, что при расчетах распределения токов в обмотках зависимость поля обмотки от тока в ней может быть принята линейной.

На рис. 5 представлены распределения полей обмоток, нормированных на ампервитки для  $I_0 = 350$  А. На этом же рисунке приведены кривые для обмоток  $n = 1,18$  при  $I_0 = 610$  А и  $I_0 = 175$  А. Видно, что поля обмоток существенно изменяются как по величине, так и по характеру зависимости от радиуса при изменении уровня поля. Следует отметить, что расчеты поля обмотки по формулам токовой петли с учетом отражений дают отклонения  $\sim 10-15\%$  по величине и  $\sim 20-30\%$  по градиенту магнитного поля от экспериментальных зависимостей.

На рис. 6 приведена зависимость величины поля для концентрических обмоток при  $r = 0$  от тока возбуждения электромагнита  $I_0$ . Отметим, что уменьшение  $H_k/IW$  с ростом  $I_0$  для обмоток  $n=(6-18)$ , расположенных по поверхности шимм, обусловлено уменьшением магнитной проницаемости спиральных шимм. Однако для обмоток №1-5, расположенных в пазах спиральных шимм /рис. 2/, этот эффект ослабляется изменением экранирующего действия шимм.

Результаты формирования изохронного среднего поля с помощью токовых обмоток представлены на рис. 7. Максимальные отклонения поля от требуемых зависимостей в центральной области  $r < 4$  см составляют  $\sim \pm 30$  Э, а в диапазоне радиусов  $\Delta r = 4-51$  см не превышают  $\sim \pm 6$  Э.

Постоянные составляющие отклонений обусловлены изменением уровня поля ( $\Delta H/H = \pm 2 \cdot 10^{-4}$ ) при проведении двух серий измерений по выделению топографий магнитного поля. Соответствующие значения токов в концентрических обмотках приведены в табл. 5. В той же таблице даны значения токов в обмотках для формирования среднего поля при ускорении  $d$ ,  $He_3^{+2}$  и  $\alpha$ -частиц.

Анализ сформированных магнитных полей циклотрона приводился на основании расчетов динамических характеристик ускоряемых частиц. Расчеты фазового



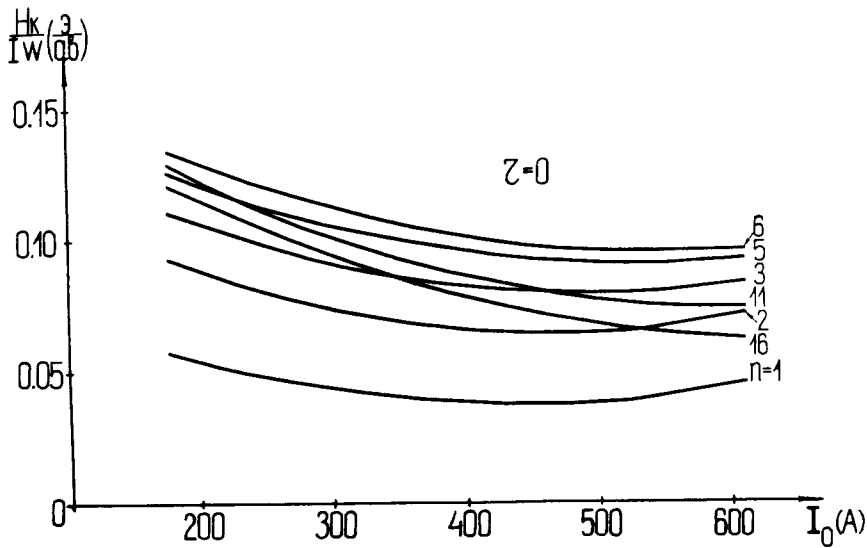


Рис. 6. Магнитное поле concentрических обмоток при  $r=0$ .

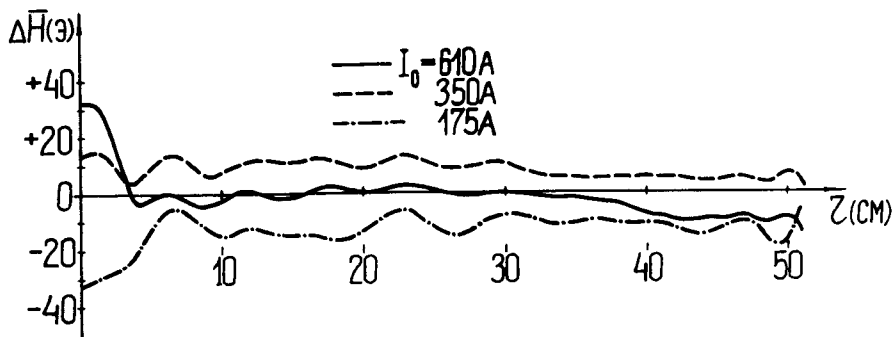


Рис. 7. Отклонение сформированного с помощью системы 18 пар concentрических обмоток среднего поля от изохронного.

режима работы ускорителя показали, что смещение фазы пучка относительно ускоряющего напряжения не превышает  $\pm 5^\circ$ . На рис. 8 и 9 представлены графики зависимостей частот свободных колебаний от радиуса, рассчитанных по формулам:

$$Q_z^2(r) = -n + \frac{\epsilon_N^2 N^2}{2(N^2-1-n)} + \frac{2\epsilon_{2N}^2 N^2}{(4N^2-1-n)} + \frac{\epsilon_N^2 r^2 \phi_N'^2}{2(N^2-1-n)} +$$

$$+ \frac{\epsilon_{2N}^2 r^2 \phi_{2N}'^2}{2(4N^2-1-n)} + \frac{\epsilon_N^2 r^2 \phi_N'^2}{2N^2} + \frac{\epsilon_{2N}^2 r^2 \phi_{2N}'^2}{8N^2} +$$

$$+ \frac{(\epsilon_N' r)^2}{2N^2} - \frac{\epsilon_N \epsilon_N' r}{(N^2-1-n)(1+n)} (1+n+n^2-d) - \frac{\epsilon_N \epsilon_N' r^2}{2(N^2-1-n)},$$

/2/

$$Q_r^2(r) = (1+n) \left[ 1 + \frac{3}{2N^2} (\epsilon_N r \phi_N')^2 \right] + \frac{\epsilon_N^2}{2(N^2-4-4n)} \times$$

$$\times \left[ 2 - \frac{N^2}{2(N^2-1-n)} + r \frac{\epsilon_N'}{\epsilon_N} + n \right]^2 + \frac{0,7 \epsilon_N^2}{N^2-1-n} +$$

$$+ \frac{(\epsilon_N' r)^2}{2N^2} + \frac{\epsilon_N \epsilon_N' r^2}{2(N^2-1-n)},$$

/3/

где  $d = \frac{1}{2} \frac{r^2}{H} \frac{d^2 \bar{H}}{dr^2}$ ,  $\phi_N$  - фаза максимума поля  $N$ -ой гармоники.

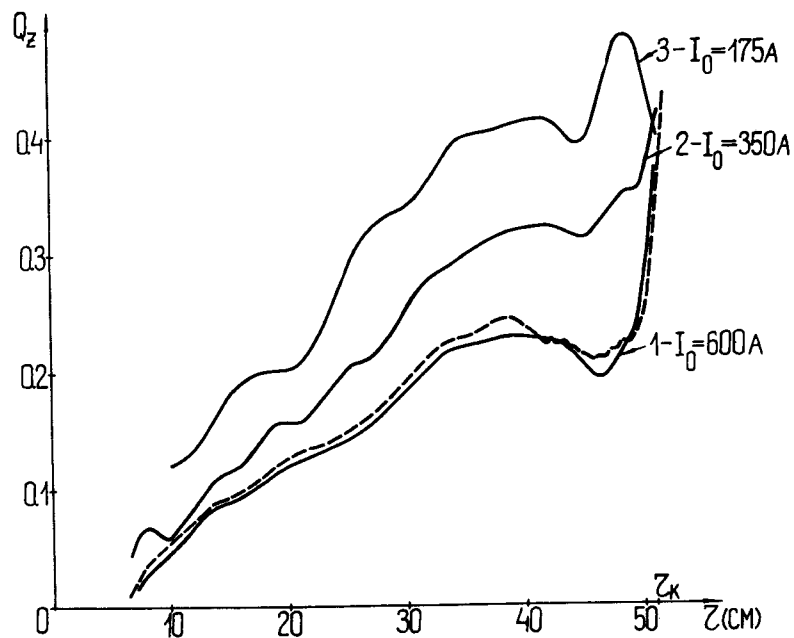


Рис. 8. Зависимость частоты аксиальных колебаний  $Q_z(r)$  от радиуса.

На этом же рисунке приведены результаты расчета частот по программе CYCLOPS. Отклонение проведенных расчетов не превышает 5%. Следует отметить, что для полученных характеристик магнитного поля У-120М /рис. 4/ значительный вклад в величину  $Q_z$  /-40%/ и  $Q_r$  /-15%/ на конечных радиусах, рассчитываемых по формулам /2/ и /3/, дают члены с  $\epsilon_N''$ .

Анализ полученных характеристик  $Q_z$  и  $Q_r$  показывает, что пространственная устойчивость ускоряемых протонов будет обеспечена во всем диапазоне рабочих радиусов за исключением центральной зоны  $r < 5$  см. Как показано в работе /6/, эта область будет проходиться частицами при незначительном росте амплитуд свободных колебаний.

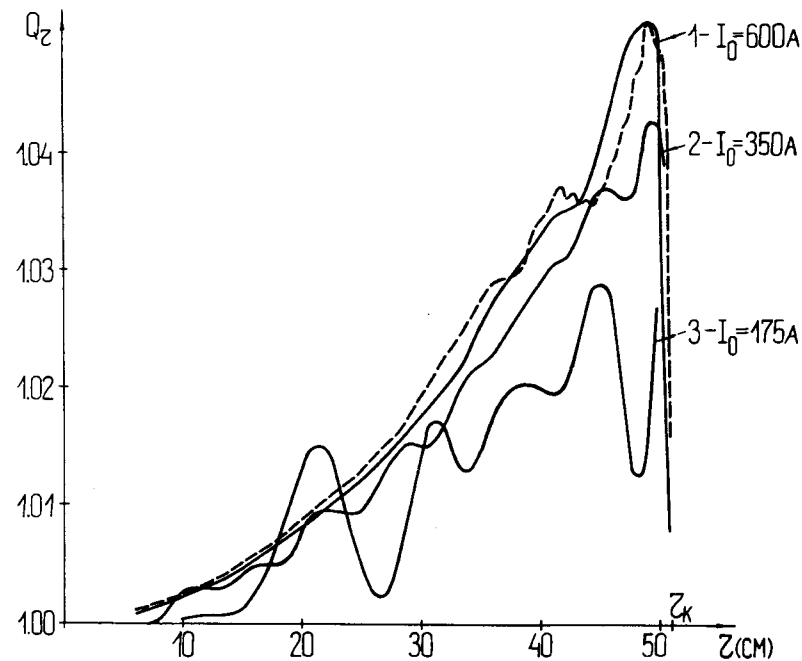


Рис. 9. Зависимость частоты радиальных колебаний  $Q_r(r)$  от радиуса.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложены основные результаты работ по формированию магнитного поля изохронного циклотрона.

1. Сформированы магнитные поля для ускорения протонов до энергий 40, 30, 13 МэВ.

2. Рассчитаны распределения токов в концентрических обмотках, обеспечивающих ускорение  $d$ ,  $He^2$ , и  $\alpha$ -частиц до энергий, 8, 15, 20 МэВ; 17, 40, 54 МэВ; 17, 30, 41 МэВ соответственно.

3. Путем некоторых изменений параметров ферромагнитных элементов магнитной системы получены условия создания заданных зависимостей среднего поля

в требуемых допусках для всех режимов работы ускорителя с помощью запланированной системы концентрических обмоток.

Физический запуск /июнь 1976 г./ и исследования двух режимов работы / $E = 40 \text{ МэВ}$  и  $E_p = 30 \text{ МэВ}$ / показали, что сформированное магнитное поле удовлетворяет требованиям для данного ускорителя.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Г.Аленицкий, А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов и др. ОИЯИ, 9-5292, Дубна, 1970.
2. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин. ОИЯИ, Р9-5498, стр. 33-43, Дубна, 1971.
3. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин. ОИЯИ, Р9-6241, стр. 15-25, Дубна, 1972.
4. Ю.Г.Аленицкий, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин, Н.А.Морозов. ОИЯИ, Р9-7339, стр. 48-61, 82-92, Дубна, 1973.
5. R.Cohen, J.H.Mackenze, IEEE Trans. on Nucl.Sci., V NS-18, No.3, June 1971.
6. В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, Н.И.Полумордвинова. ОИЯИ, Р9-5498, стр. 24-32, Дубна, 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 сентября 1976 года.