

В

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**ДУБНА**

*SW8104116*

9-80-792

**Ю.Г.Аленицкий, Н.Л.Заплатин, Н.А.Морозов**

**МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ФАЗОТРОНА  
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ ПОЛЯ**

**(Точность изготовления  
и возможности шиммирования)**

**1980**

Аленицкий Ю.Г., Заплатин Н.Л., Морозов Н.А.

9-80-792

Магнитная система фазотрона с пространственной вариацией поля.  
/Точность изготовления и возможности шиммирования/

Проведен анализ точности изготовления элементов магнитной системы фазотрона с пространственной вариацией поля /установка "Ф"/, оцениваются возмущения магнитного поля ускорителя и возможности их устранения. Целью работы является разработка и введение в магнитную систему установки "Ф" дополнительных элементов коррекции магнитного поля, с помощью которых возможно сформировать магнитное поле с требуемой точностью. Возмущения магнитного поля ускорителя и величины магнитных полей шиммирующих элементов оценивались по аналитическим формулам в условиях равномерного насыщения ферромагнетика, а также численными методами при использовании программы POISSON для расчета нелинейных дифференциальных уравнений сеточной методикой. Определены максимальные возмущения магнитного поля, ожидаемые в изготовленной магнитной системе фазотрона. Разработаны дополнительные ферромагнитные и токовые шиммирующие элементы. Показано, что имеющиеся в магнитной системе шиммирующие элементы позволяют сформировать требуемую конфигурацию магнитного поля с необходимой точностью.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1980

Alenitsky Yu.G., Zaplatin N.L., Morozov N.A.

9-80-792

The Magnetic System of a Phasotron with Field Spatial Variation (Precision of Manufacturing and Possibilities of Trimming)

The manufacturing errors of the magnetic system elements of the phasotron with field spatial variation ("F" installation) are considered. The accelerator magnetic field perturbation and various means of their removing are estimated. Designing and introducing into the phasotron magnetic system of additional magnetic field trimming elements for required accuracy of the magnetic field shaping is the main purpose of the paper. Correcting element field is calculated assuming their constant magnetization and using the POISSON code for solving the nonlinear partial differential equation. Expected maximum magnetic field perturbation into manufactures phasotron magnetic system are obtained. Additional iron and current trimming elements have been designed. It is shown that with the whole set of the magnetic field correcting elements the required performance of the magnetic field could be obtained with necessary accuracy.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1980

Фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля создается для ускорения протонов до энергии 680 МэВ с интенсивностью /10-50/ мкА на базе синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Получение пространственной вариации и растущего с радиусом среднего магнитного поля ускорителя достигается за счет профилирования системы спиральных шимм и полюсов магнита. Выбор параметров и моделирование магнитной системы ускорителя описаны в работах /1-4/.

В настоящем сообщении рассматриваются особенности конструкции магнитной системы. При использовании аналитических формул и численных методов расчета найдены возможные возмущения магнитного поля, ожидаемые в изготовленной магнитной системе. На основании этих расчетов в магнитную систему введены дополнительные корректирующие токовые и ферромагнитные элементы для формирования заданного магнитного поля с необходимой точностью.

### МАГНИТНАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ "Ф"

Магнитное поле фазотрона с пространственной вариацией в цилиндрической системе координат для плоскости симметрии ( $z = 0$ ) описывается формулой /5/

$$B_z(r, \phi) = \bar{B}_z(r) \sum_{K=1,2} [1 + \epsilon_{NK}(r) \cos(\frac{r}{\lambda} - NK\phi)], \quad /1/$$

где  $B(r)$  - аксиальное среднее магнитное поле,  $\epsilon_{NK}(r) = B_{NK}(r) / \bar{B}_z(r)$  - относительная амплитуда  $N$ - $K$  гармоники поля,  $\frac{r}{\lambda}$  - радиальный шаг и периодичность структуры магнитного поля.

Графики зависимостей заданного среднего магнитного поля, амплитуды основной гармоники поля ( $N=4$ ) от радиуса и отклонение фазы максимума поля от линии спирали Архимеда  $r = N\lambda\phi$  / $\lambda = 150$  мм/, полученные при моделировании поля ускорителя ( $K=1; 5,22$ ), представлены на рис.1. Здесь же показаны зависимости частот свободных радиальных  $Q_r(r)$  и аксиальных  $Q_z(r)$  колебаний, рассчитанные для приведенных характеристик поля ускорителя. Магнитное поле ускорителя создается в зазоре электромагнита Е1-Б с Ш-образным магнитопроводом, диаметр полюсов которого равен  $\phi = 6000$  мм. В зазор электромагнита  $\delta = 1550$  мм помещается ускорительная камера, общий вид которой показан на рис.2.



/3"/. Вариация магнитного поля создается четырьмя парами спиральных шимм /4/, сдвинутых друг относительно друга на угол  $90^\circ$ , которые крепятся на внутренних дисках /3/. Величина азимутальной протяженности спиральных шимм приведена в работе /1/. В центральной области фазотрона расположены четыре пары concentрических обмоток /5/ и обмотки для регулировки первой гармоники поля /9/.

Ускорительная камера в зазоре электромагнита крепится по периметру полюса с помощью скоб и клиньев /6/. На радиусе  $r = 1000$  мм для фиксации зазора между спиральными шиммами при воздействии вакуумных и магнитных усилий на камеру расположено расклинивающее устройство /11/.

Размеры ферромагнитных элементов системы в аксиальном направлении приведены в табл.1, где  $h_1$  и  $h_2$  - расстояния от средней плоскости магнитной системы до поверхностей, ограничивающих спиральные шиммы /см. рис.2/,  $h_M$  - полузазор между полюсами. Как видно из рис.2, поверхность  $h_2$  в центральной области ускорителя описывается конусами, профили полюса и поверхности  $h_2$  на больших радиусах имеют ступенчатый вид. В диапазоне радиусов  $\Delta r = /45-1044/$  мм профиль поверхности  $h_1(r)$  мм описывается полиномом вида

$$h_1(r) = \sum_{i=1}^7 a_i r^{(i-1)}. \quad /2/$$

Значения  $a_i$  даны в табл.2.

#### ИСТОЧНИКИ ВОЗМУЩЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Искажения магнитного поля ускорителя могут быть вызваны различием магнитных свойств, неточностью изготовления и монтажа ферромагнитных элементов магнитной системы. Кроме того, к искажению медианной плоскости и смещению магнитного центра относительно геометрического могут привести несимметрия расположения обмоток возбуждения, пустоты в местах стыковки элементов магнитопровода, размещение вблизи магнита больших масс стальных конструкций /корпус вариатора, головные линзы системы транспортировки пучка и др./.

Все элементы магнитной системы установки "Ф" сделаны из стали марки СТ-15, причем отдельные части верхних и нижних спиральных шимм, расположенные на одинаковых радиусах, изготавливались из одной заготовки. Химический состав заготовок отличается в пределах: углерод - 0,03%, марганец - 0,2%, кремний - 0,15%, хром - 0,1%. В соответствии с данными работы /8/ разброс магнитных характеристик  $B(H)$  составляет для индукции  $B = 10$  кГс - 10%, 15 кГс - 3%, 20 кГс - 1%.

Таблица 1

| $R$ (мм) | $h_1$ (мм) | $h_2$ (мм) | $h_M$ (мм)  |
|----------|------------|------------|-------------|
| 49,6     | 80,9       | 104,4      | 710,9       |
| 62,6     | 80,9-60    | -          | "-          |
| 78,3     | 60         | -          | "-          |
| 104,4    | 60,5       | -          | "-          |
| 130,5    | 61,6       | -          | "-          |
| 182,7    | 66,9       | -          | "-          |
| 208,8    | -          | 161,8      | "-          |
| 261,0    | 78,9       | -          | "-          |
| 313,2    | -          | 237,5      | "-          |
| 339,3    | 91,6       | -          | "-          |
| 365,4    | -          | -          | 710,9-658,7 |
| 417,6    | 103,7      | 305,4      | 658,7       |
| 522,0    | 118,0      | 357,6      | "-          |
| 626,4    | 130,9      | -          | "-          |
| 678,6    | -          | -          | 658,7-637,9 |
| 730,8    | 141,4      | -          | "-          |
| 783,0    | -          | -          | 637,9-575,2 |
| 835,2    | 149,4      | 388,9      | "-          |
| 939,6    | 154,3      | "-         | 575,2       |
| 1044,0   | 156,6      | "-         | "-          |
| 1513,8   | "-         | "-         | 575,2-539,2 |
| 1566,0   | "-         | "-         | 539,2-523,6 |
| 1644,3   | "-         | "-         | 523,6-519,4 |
| 1827,0   | "-         | "-         | 519,4-512,1 |
| 1905,3   | "-         | "-         | 512,1-503,7 |

Продолжение табл. 1

| $R$ (мм) | $h_1$ (мм) | $h_2$ (мм)  | $h_H$ (мм)  |
|----------|------------|-------------|-------------|
| 1983,6   | "-         | 388,9-378,4 | 503,7-482,8 |
| 2035,8   | "-         | 378,4-368,0 | 482,8       |
| 2088,0   | "-         | 368,0-357,6 | 482,8-441,1 |
| 2140,2   | "-         | 357,6-347,1 | "-          |
| 2192,4   | "-         | 347,1-336,7 | 441,1-409,8 |
| 2244,6   | "-         | 336,7-323,6 | "-          |
| 2296,8   | "-         | 323,6-309,5 | 409,8-382,6 |
| 2349,0   | "-         | 309,5-294,9 | "-          |
| 240,2    | 156,6      | 294,9-280,3 | 382,6-362,8 |
| 2453,4   | "-         | 280,3-268,8 | "-          |
| 2479,5   | "-         | "-          | 362,8-352,3 |
| 2505,6   | "-         | 268,8-257,3 | "-          |
| 2531,7   | "-         | "-          | 352,3-344,0 |
| 2557,8   | "-         | 257,3-250,6 | "-          |
| 2610,0   | "-         | 250,6-247,9 | 344,0-335,6 |
| 2714,4   | "-         | "-          | 335,6-325,2 |
| 2740,5   | "-         | "-          | 325,2-310,6 |
| 2766,6   | "-         | "-          | 310,6-305,4 |
| 2792,7   | "-         | "-          | 305,4-289,7 |
| 2818,8   | "-         | "-          | 289,7-274,0 |
| 2844,9   | "-         | "-          | 274,0-258,4 |
| 2871,0   | "-         | "-          | 258,4-247,9 |
| 3000,0   | 156,6      | 247,9       | 247,9       |

Таблица 2

| 1     | 1                   | 2                       | 3                      | 4                    |
|-------|---------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|
| $a_1$ | $6,8188 \cdot 10^1$ | $-1,3333 \cdot 10^1$    | $1,9113 \cdot 10^8$    | $-4,5478 \cdot 10^6$ |
| $i$   | 5                   | 6                       | 7                      |                      |
| $a_1$ | $5,6538 \cdot 10^9$ | $-3,6347 \cdot 10^{12}$ | $9,3876 \cdot 10^{16}$ |                      |

Каждая спиральная шимма состоит из пяти частей. Монтаж шимм на внутренних дисках проводился с помощью шаблона, описывающего промежуток между спиральными шиммами. Спиральные шиммы и шаблон по контуру изготавливались на станке с программным управлением, который обеспечивал точность по нормали  $\pm 0,3$  мм. Принятая технология монтажа спиральных шимм на дисках обеспечивает их установку по азимуту с усредненной по длине шимм точностью, равной  $\pm 0,01^\circ$ .

На рис. 3 приведены отклонения величин зазора между шаблоном и спиральными шиммами от заданного. Для верхних шимм это отклонение не превышает  $\pm 0,5$  мм, на нижнем диске имеются отклонения до  $\pm 1$  мм. Вертикальные и радиальные отклонения ступенчатых профилей ферромагнитных колец внутренних дисков и спиралей от заданных величин показаны на рис. 4. Заштрихованные области на этом рисунке показывают разброс в измеренных величинах для различных спиральных шимм на одном диске.

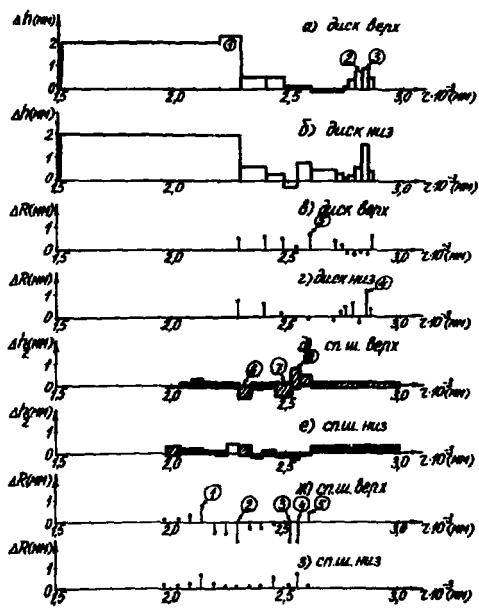
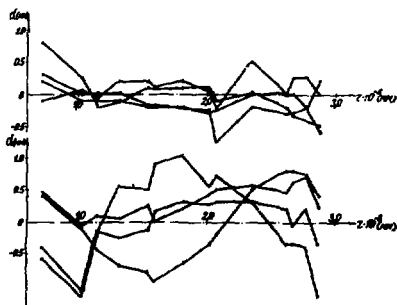
Разброс значений параметра  $h_1$  спиральных шимм относительно заданного для  $r > 1044$  мм дается на рис. 5. Отклонения проекций контуров верхних шимм от контуров нижних /зеркальность/ в собранной камере показаны на рис. 6. Заштрихованная область на этом рисунке характеризует превышение азимутальной толщины нижних спиралей относительно верхних  $\sim 1$  мм/. При повороте дисков друг относительно друга величина этой области не меняется, а положение ее вблизи оси  $\Delta = 0$  означает, что отклонения осевых линий верхних спиральных шимм от нижних не превышают  $\pm 1,0$  мм.

#### МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВОЗМУЩЕНИЙ МАГНИТНОЙ ПОЛЯ

Величины возмущений магнитного поля для описанных выше искажений геометрии магнитной системы установки "Ф" и разброса магнитных характеристик материалов оценивались расчетным способом, как по аналитическим формулам, так и методом сеток с использованием системы программ POISSON [7]. Для получения



**Рис.3.** Величины отклонений положений контуров установленных спиральных шимм от требуемых.



**Рис.4.** Величины ошибок в изготовлении ступенчатого профиля внутренних дисков и спиральных шимм /СП.Ш./.

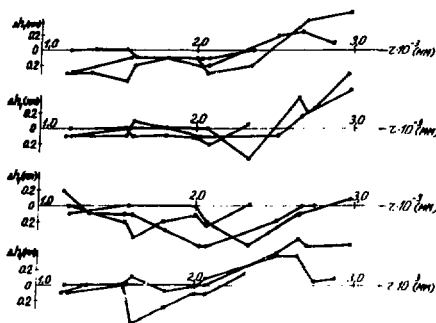


Рис.5. Разброс значений параметра  $h_1$  спиральных шимм. ●—●—●— — верхний диск, наружный контур / Н, рис.2/; ○—○—○— — верхний диск, внутренний контур / В, рис.2/; —×—×—×— — нижний диск, наружный контур / Н, рис.2/.

Рис.6. Отклонение проекции контура верхних шимм от контура нижних. ○—○—○— — внутренний контур / В, рис.2/; —×—×—×— — наружный контур / Н, рис.2/.

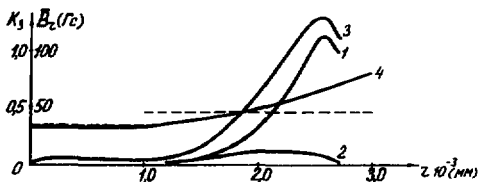
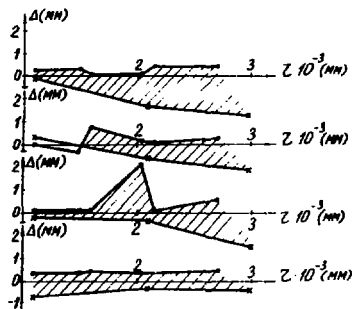


Рис.7. Радиальная компонента магнитного поля, вызываемая разбросом магнитных характеристик. 1 — кольцевые шиммы; 2 — наружные диски; 3 — сумма всех возмущений радиальной компоненты; 4 — коэффициент заполнения для области спиральных шимм; --- — расчетный коэффициент заполнения.

радиальной компоненты магнитного поля по программе POISSON в средней плоскости установки  $\psi$  в качестве области расчета была выбрана половина сечения магнитной системы. Для полного описания системы, как показано на рис. 2, максимального количества узлов сетки, которое может использоваться программой, недостаточно, поэтому в расчетной модели были сделаны упрощения. Коэффициент заполнения спиралей показан пунктирной линией на рис. 7 /расчет/, а кривая 4 характеризует азимутальную протяженность спиральных шимм. Точность рассчитанного среднего магнитного поля составляет  $\sim 7\%$  /кривая  $V_{\text{риск.}}$  на рис. 1/. Для оценки радиальной компоненты магнитного поля этого достаточно, так как при симметрии верхней и нижней частей расчетной геометрии вычисляемая по программе величина  $B$  не превышает  $0,2$  Гс.

Для анализа локальных возмущений среднего магнитного поля использовались аналитические формулы, описывающие поле тонких кольцевых шимм в предположении их равномерного намагничивания  $B$ . В случае, если радиальная протяженность кольцевых шимм меньше высоты ( $\Delta h \ll \Delta R$ ), формула имеет вид:

$$\bar{B}_z = 8M\Delta R \frac{1}{(R-r)^2 - h^2} \left| \begin{matrix} h_1 \\ h_2 \end{matrix} \right. \quad /3/$$

Если  $\Delta h \ll \Delta R$ , то используется формула:

$$\bar{B}_z = 4\pi M \Delta h \frac{1}{R} \frac{d}{dh} \psi \left( \frac{r}{R}, \frac{h}{R} \right) \Big|_{R_1}^{R_2} \quad /4/$$

где  $\Delta h = h_2 - h_1$ ,  $M$  - намагниченность ферромагнетика /принимается  $4\pi M = 20000$  Гс/,  $\frac{d}{dh} \psi$  - табулированная функция '8'.

Расчет первой гармоники возмущения аксиальной составляющей поля, вызванной неточностью монтажа и изготовления спиральных шимм, можно провести по формуле

$$B_{z1}^j = \frac{\partial}{\partial \eta} B_1 \sum_{K=0}^{N-1} \cos \left( \frac{R}{N\lambda} - \psi - \frac{k\pi}{2} \right) \cdot \Delta \eta, \quad /5/$$

где  $\eta$  соответствует одному из параметров  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $\alpha$ ,  $N\lambda$ ;  $B_1$  - амплитуда первой гармоники поля, которая в предположении равномерного намагничивания шимм описывается формулой

$$B_1 = 8M \sin \frac{\alpha}{2} \left( e^{-\frac{h_1}{N\lambda}} - e^{-\frac{h_2}{N\lambda}} \right). \quad /6/$$

## ВОЗМУЩЕНИЯ АКСИАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Для определения влияния разброса магнитных характеристик материала на характер зависимости среднего магнитного поля от радиуса при расчетах методом сеток вычислялось поле различных элементов с использованием кривых намагничивания, соответствующих максимальному разбросу химического состава заготовки. На рис.8 показано изменение среднего магнитного поля, обусловленное разбросом магнитных характеристик различных частей спиральных шимм /кривые 1,2,3/ и кольца /кривая 4/. Аналогичные расчеты дают изменение среднего магнитного поля диска наружного /2/ -  $\Delta B_z \sim /10-25/$  Гс и полюсного наконечника /1/ -  $\Delta B_z \sim /6-10/$  Гс. Перечисленные элементы могут вызвать появление первой гармоники аксиальной составляющей магнитного поля, причем амплитуды их приблизительно равны величинам возмущений среднего поля. Исключением являются спиральные шиммы, т.к. их части, расположенные на одинаковых радиусах, выполнены из стали одинакового химического состава.

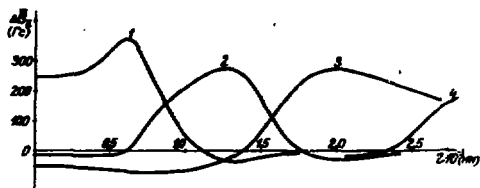


Рис.8. Изменение среднего магнитного поля из-за разброса магнитных характеристик. Спиральные шиммы: 1 -  $\Delta R = /0-1/$  м, 2 -  $\Delta R = /1-1,6/$  м, 3 -  $\Delta R = /1,6-3/$  м, 4 - кольцевая шимма.

Результаты расчета по формулам /3,4/ локальных возмущений магнитного поля, вызванных кольцевыми шиммами, отмеченными на рис.4 соответствующими номерами, приведены в табл.3.

На основании этих расчетов можно заключить, что ступенчатый профиль спиральных шимм и дисков выполнен удовлетворительно. Возмущение  $\Delta B = 15$  Гс, вызванное увеличением на 2 мм высоты полюса в интервале радиусов  $\Delta r = /1500-2300/$  мм, имеет большую радиальную протяженность. На радиусе расположения стыка первой и второй частей спиральных шимм  $r = 1044$  мм зазор между кусками шимм составляет 1 мм, что создает провал поля - 45 Гс с небольшой радиальной протяженностью.

Таблица 3

| № п/п                     | 1    | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
|---------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Диск<br>ΔВ /Гс/           | 15,0 | 1,6 | 3,0 | 3,0 | 1,0 |     |     |     |
| Спир.<br>ΔВ /Гс/<br>ширма | 0,7  | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 0,5 | 2,0 | 4,0 | 2,5 |

Таблица 4

| г /мм/ | $V_1(\Delta h_1)$ | $V_1(\Delta \alpha)$ | $V_1(\Delta N\lambda)$ | $V_1(\Delta(2\pi\lambda))$ | $\delta^\circ$ |
|--------|-------------------|----------------------|------------------------|----------------------------|----------------|
| 1500   | 13,0              | 1,7                  | 21,0                   | 13,4                       | 21,5           |
| 2000   | 14,2              | 2,2                  | 27,0                   | 17,2                       | 16,3           |
| 2500   | 17,2              | 2,5                  | 33,0                   | 21,0                       | 14,0           |

В работе /9/ показано, что зазор между полюсом /1/ и диском /2/, которого не было на модели, а также прогиб диска /2/, выполненный для создания напряженной конструкции, могут вызвать уменьшение перепада среднего поля на величину ~200 Гс. Результаты расчетов амплитуд первой гармоники по формулам /5,6/ для линейных отклонений 1 мм в параметрах  $h_1$ ,  $\alpha$ ,  $N\lambda$ ,  $2\pi\lambda$  на различных радиусах приведены в табл.4. Азимутальное распределение ошибок считается таким, при котором величина гармоники максимальна. Отклонения  $\Delta\alpha$  и  $\Delta(2\pi\lambda)$ , полученные в изготовленной магнитной системе, выражаются через величину /рис.3/ формулами

$$\Delta\alpha = d \sin \delta, \quad \Delta(2\pi\lambda) = d \cos \delta, \quad //7/$$

где  $\delta = \arctg(N\lambda/R)$  приведено в табл.4.

Сопоставляя результаты расчетов, приведенных в табл.4, и величины, представленные на рис.3,5, можно заключить, что амплитуда первой гармоники аксиальной компоненты поля, обусловленная неточностью обработки и установки спиральных шимм, будет составлять /10-30/ Гс при допуске  $\Delta V_1 \sim 3-10/$  Гс. Радиальная протяженность возмущений составляет величину ~1 м.

## ВОЗМУЩЕНИЕ РАДИАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Для ускорителей с пространственной вариацией поля постоянное смещение орбиты в вертикальном направлении в случае существования в средней плоскости ( $Z=0$ ) отличной от нуля средней составляющей радиальной компоненты магнитного поля определяется выражением <sup>/10/</sup>

$$\bar{Z} = \frac{r}{Q_z^2 \cdot \bar{B}_z(r)} \cdot \bar{B}_r(r) \quad /8/$$

Если считать, что для установки "Ф" допустимое отклонение составляет  $\bar{Z} = 5$  мм, то величина  $\bar{B}_r$  не должна превышать  $/2-4/$  Гс.

Оценка возможных величин радиальной компоненты магнитного поля, вызванная различием в магнитных свойствах материала верхних и нижних элементов системы проводилась путем расчета  $\bar{B}_r$  методом сеток. В соответствующих верхних и нижних частях шимм разница намагниченности материала определялась по максимальному разбросу химического состава заготовок. На рис.7 представлены результаты расчета  $\bar{B}_r$  кольцевых шимм  $/\bar{B}_{r\max} = 110$  Гс/, кривая 1, и дисков  $/\bar{B}_r \approx 15$  кГс/, кривая 2. Для полюсных дисков расчет дал величину  $\bar{B}_r \approx 5$  Гс.

Оценка влияния различных угловых протяженностей верхних и нижних спиральных шимм на величину  $B$  проводилась путем введения различных коэффициентов заполнения в расчетной схеме для верхних и нижних дисков с соответствующими спиральным шиммам поперечными сечениями. При относительной разнице коэффициентов заполнения  $5 \cdot 10^{-3}$  радиальная компонента получалась равной  $\bar{B}_r \approx /3-6/$  Гс. По экспериментальным данным /рис.6/ нижние шиммы полнее верхних на величину  $/1-2/ \cdot 10^{-3}$ . Отклонение параметров спиральных шимм  $h_1$  и  $h_2$  на величину  $0,5$  мм приводит к появлению  $\bar{B}_r$ - составляющей поля, равной 3 и 1 Гс соответственно.

Ошибки в радиусах проточек на спиральных и кольцевых шиммах и толщинах наружных дисков на величину  $\sim 1$  мм вызывают появление средней составляющей горизонтальной компоненты поля  $\sim 3$  Гс. Сумма всех возмущений показана на рис.7 /кривая 3/. Видно, что во всем диапазоне рабочих радиусов возможна радиальная компонента магнитного поля, значительно превышающая допустимую величину  $/\sim 2-4$  Гс/.

## ШИММИРОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

С целью формирования магнитного поля установки "Ф" с требуемой точностью в магнитной системе предусмотрены различные элементы коррекции поля.

1. Секторные шиммы тонкой коррекции /3/ представляют собой ферромагнитные прутки  $\phi 10$  мм, расположенные по азимуту в долине между шиммами во всем диапазоне рабочих радиусов в непосредственной близости от средней плоскости с шагом по радиусу 50 мм, по три штуки по высоте. Экспериментальная проверка такого шиммирования проводилась на модели /8/, откуда следует, что этими шиммами допустима коррекция среднего магнитного поля на величину до 100 Гс, при этом возможно шиммирование возмущений магнитного поля малой радиальной протяженности. Недостаток этого способа шиммирования состоит в том, что пропорционально вносимому среднему полю уменьшается амплитуда вариации поля. В диапазоне радиусов  $\Delta r = /140-460/$  мм на этих же элементах крепления возможно установить дополнительные секторные шиммы толщиной до 10 мм, что соответствует максимальному создаваемому полю  $\sim 100$  Гс.

2. В центральной области фазотрона, где к точности формирования предъявляются повышенные требования, сделаны концентрические обмотки коррекции среднего магнитного поля /рис.2/. Магнитное поле от корректирующих обмоток по расчетным данным /9/ составляет 60 Гс. Возможна коррекция радиальных градиентов поля на величину 2 Гс/см.

3. Обмотки коррекции первой гармоники поля устанавливаются в центре ускорителя в диапазоне радиусов  $\Delta r = /120-400/$  мм. При максимальном токе 300 А величина первой гармоники составляет  $B_1 = 30$  Гс.

4. Предусмотрена возможность установки накладок на боковую поверхность спиральных шимм на радиусах  $r = /500-2300/$  мм. Эти накладки могут быть использованы для формирования как среднего магнитного поля, так и первой гармоники его аксиальной составляющей. Величины полей, создаваемые накладками с радиальной протяженностью  $\sim 500$  мм, вычислены в работе /9/ и составляют /200-250/ Гс.

5. Между внутренним /3/ и внешним /2/ дисками камеры /см. рис.2/ могут быть установлены шиммирующие ферромагнитные элементы /7/ азимутальной протяженностью  $12^\circ$  по 24 шт. сверху и снизу. Эти шиммы имеют вид трапеций переменной толщины /от 5 до 25 мм/ с шагом по радиусу 500 мм. Расчет магнитного поля этих шимм /9/ показал, что возможно создание поля до 300-350 Гс с радиальной протяженностью 1000 мм. Формирование поля с помощью этих шимм возможно без выкатки камеры из зазора электромагнита.

Шиммы, описанные в пунктах 4 и 5, следует использовать для формирования среднего магнитного поля или устранения первой гармоники поля большой радиальной протяженности. Для фор-

мирования радиальной компоненты магнитного поля могут быть использованы любые шиммирующие элементы, однако для того, чтобы создать требуемую конфигурацию радиальной компоненты поля и при этом минимально изменить аксиальное поле, следует пользоваться секторными шиммами тонкой коррекции, расположенными в непосредственной близости от средней плоскости ускорителя, с помощью которых можно создавать поля величиной  $\bar{B}_r \approx 50$  Гс. Использование боковых накладок на спиральные шиммы позволяет скорректировать  $\bar{B}_r \approx 100$  Гс. Для коррекции  $\bar{B}_r$  в центральной области возможно перераспределять величины токов концентрических токовых обмоток. Расчеты показывают, что увеличение тока в верхней обмотке относительно нижней на 30% максимальной величины дает  $\bar{B}_r \approx 2$  Гс.

На основании изложенного видно, что имеющиеся элементы шиммирования магнитного поля позволяют устранить в созданной магнитной системе установки "Ф" возможные отклонения магнитного поля от заданного.

Авторы выражают благодарность С.Б.Ворожцову за обсуждение изложенных материалов, И.А.Голубеву и Н.Н.Жукову за проведение большого объема монтажных и измерительных работ на магнитной системе ускорителя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяков Н.И., Ворожцов С.Б., Заплатин Н.Л. ОИЯИ, 9-4517, Дубна, 1969.
2. Аленицкий Ю.Г. и др. ОИЯИ, Р9-5246, Дубна, 1970.
3. Аленицкий Ю.Г., Ворожцов С.Б., Заплатин Н.Л. ОИЯИ, Р9-5590, Дубна, 1971.
4. Аленицкий Ю.Г. и др. Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", 1972, с.165.
5. Глазов А.А. и др. ОИЯИ, 9-3211, Дубна, 1967.
6. Ricken H.G., Thimmel H.M. Proc. II Int. Conf. on Magnet Technology. Oxford, 1967, p.256.
7. Ворожцов С.Б. и др. ОИЯИ, Б1-11-12070, Дубна, 1978.
8. Данилов В.И. и др. ОИЯИ, Р-702, Дубна, 1961.
9. Заплатин Н.Л., Морозов Н.А. ОИЯИ, Р9-12587, Дубна, 1979.
10. Дмитриевский В.П. и др. ОИЯИ, 1057, Дубна, 1962.

Рукопись поступила в издательский отдел  
5 декабря 1980 года.



# Нет ли пробелов в Вашей библиотеке?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги,  
если они не были заказаны ранее.

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| Д1,2-8405  | Труды IV Международного симпозиума по физике высоких энергий и элементарных частиц. Варна, 1974.                            | 2 р. 05 к. |
| P1,2-8529  | Труды Международной школы-семинара молодых ученых. Актуальные проблемы физики элементарных частиц. Сочи, 1974.              | 2 р. 60 к. |
| Д6-8846    | XIV совещание по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1975.  | 1 р. 90 к. |
| Д13-9164   | Международное совещание по методике проволочных камер. Дубна, 1975.   | 4 р. 20 к. |
| Д1,2-9234  | IV Международный семинар по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1975.  | 3 р. 60 к. |
| Д-9920     | Труды Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра. Дубна, 1976.  | 3 р. 50 к. |
| Д9-10500   | Труды II Симпозиума по коллективным методам ускорения. Дубна, 1976.   | 2 р. 50 к. |
| Д2-10533   | Труды X Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Баку, 1976.   | 3 р. 50 к. |
| Д13-11182  | Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.   | 5 р. 00 к. |
| Д17-11490  | Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.                                | 6 р. 00 к. |
| Д6-11574   | Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.   | 2 р. 50 к. |
| Д3-11787   | Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.   | 3 р. 00 к. |
| Д13-11807  | Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.                                    | 6 р. 00 к. |
|            | Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна 1978. /2 тома/                                       | 7 р. 40 к. |
| Д1,2-12036 | Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна 1978.  | 5 р. 00 к. |
| P18-12147  | Труды III совещания по использованию ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. | 2 р. 20 к. |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| Д1,2-12450 | Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.                                       | 3 р. 00 к. |
| P2-12462   | Труды V Международного совещания по неклассическим теориям поля. Алушта, 1979.  | 2 р. 25 к. |
| Д-12831    | Труды Международного симпозиума по фундаментальным проблемам теоретической и математической физики. Дубна, 1979.                    | 4 р. 00 к. |
| Д-12965    | Труды Международной школы молодых ученых по проблемам ускорителей заряженных частиц. Минск, 1979.                                   | 2 р. 00 к. |
| Д11-80-13  | Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1979. | 3 р. 50 к. |
| Д4-80-271  | Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.  | 3 р. 00 к. |
| Д4-80-385  | Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.  | 5 р. 00 к. |

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:

101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79.

издательский отдел Объединенного института ядерных исследований



Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.  
Заказ 29052. Тираж 290. Уч.-изд. листов 1,27.  
Редактор Н.Н.Зрелова.  
Набор В.С.Румянцевой, Е.М.Границкой.  
Макет Р.Д.Фоминной. Подписано к печати 05.01.61.