

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

P-12

ИСПРАВЛЕНИЕ МЕДИАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МАГНИТНОГО  
ПОЛЯ ШЕСТИМЕТРОВОГО СИНХРОЦИКЛОТРОНА

*ЖТЭ, 1956, № 3, с 17-22.*

В.И.ДАНИЛОВ, В.П.ДМИТРИЕВСКИЙ,  
Б.И.ЗАМОЛОДЧИКОВ, В.С.КАТЫШЕВ,  
А.А.КРОПИН, А.В.ЧЕСТНОЙ.

---

Опубликовано в ЖТЭ, 3, 1956 г.

# ИСПРАВЛЕНИЕ МЕДИАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

## ШЕСТИМЕТРОВОГО СИНХРОЦИКЛОТРОНА

### В в е д е н и е .

При сооружении циклических ускорителей заряженных частиц по соображениям экономического и технического характера ограничивается объем магнитного поля, в котором частицы могут двигаться. Поэтому к конфигурации магнитного поля предъявляются более жесткие требования, чем это необходимо по условиям пространственной устойчивости движения частиц в азимутально-симметричном поле  $|0 < n = -\frac{c}{H_z} \frac{\partial H_z}{\partial r} < 1|$ .

В частности, в синхроциклотроне высота ускоряющих электродов (дуант, рамка) определяет максимально-допустимое отклонение частиц от средней геометрической плоскости зазора электромагнита. Эти отклонения, в основном, вызываются вертикальными свободными и вынужденными колебаниями. Появление вынужденных вертикальных колебаний в синхроциклотроне связано с тем, что "медианная поверхность магнитного поля", т.е. поверхность, где радиальная составляющая напряженности магнитного поля равна нулю, не совпадает со средней геометрической плоскостью зазора. Искажение медианной поверхности магнитного поля в зазоре практически имеет место во всех электромагнитах по многим причинам: неоднородность материала полюсных наконечников, недостаточная точность изготовления и установки шимм, наличие несимметрично расположенных вокруг магнита больших железных масс и т.д.

Предполагалось, что в электромагните шестиметрового синхроциклотрона Института ядерных проблем АН СССР искажение

медианной поверхности магнитного поля может быть значительным из-за того, что стальные крышки камеры (полюсные накопители) выполнены сварными, а для получения необходимого спада магнитного поля по радиусу внутренние поверхности их образованы набором кольцевых секторов. Произведенное обследование медианной поверхности магнитного поля в зазоре действительно показало очень сложную форму ее со значительными отклонениями от средней геометрической плоскости зазора.

Медианная поверхность магнитного поля была исправлена так, что наибольшее отклонение пучка ускоренных частиц от средней геометрической плоскости из-за оставшегося искажения не превышает  $\pm 1$  см.

Использованные методы определения положения медианной поверхности, а также методы ее исправления и являются предметом настоящей статьи.

## 2. Медианная поверхность магнитного поля и вынужденные вертикальные колебания ионов в синхроциклотроне.

Если положение медианной поверхности магнитного поля в синхроциклотроне описывается функцией

$$Z_m = Z_m(\varphi, r), \quad (I)$$

то уравнение вертикального движения иона (для траектории, близкой к окружности радиуса  $r_0$  и при малых относительно высоты зазора  $A$  значениях  $Z_m$ ) (в цилиндрической



системе координат имеет вид:

$$\frac{d^2 \xi}{d\varphi^2} + n\xi = n\xi_m(\varphi, z_0) \quad (2)$$

Отсчет  $\xi$  и  $\xi_m$  ведется от средней геометрической плоскости зазора электромагнита;  $n = -\frac{z_0}{H_z} \frac{\partial H_z}{\partial z}$ ;

$H_z$  - вертикальная составляющая напряженности магнитного поля;

$z_0$  - радиус рассматриваемой траектории.

Решение уравнения (2) в виде:

$$\xi = C_1 \sin \sqrt{n} \varphi + C_2 \cos \sqrt{n} \varphi + \bar{\xi}_m + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{n \bar{\xi}_{mk}}{n - k^2} \sin(k\varphi + \alpha_k), \quad (3)$$

где коэффициенты  $\bar{\xi}_m$ ,  $\bar{\xi}_{mk}$  и  $\alpha_k$  получаются из разложения функции  $\xi_m(\varphi, z_0)$  в ряд Фурье:

$$\xi_m(\varphi, z_0) = \bar{\xi}_m + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{\xi}_{mk} \sin(k\varphi + \alpha_k) \quad (4)$$

показывает, что искажение медианной поверхности магнитного поля вызывает:

а) постоянное смещение траектории иона по высоте от средней геометрической плоскости на величину  $\bar{\xi}_m$  (назовем ее средним положением медианной поверхности на данном радиусе);

б) вынужденные вертикальные колебания, амплитуда которых определяется амплитудой и порядком гармоники в функции  $\xi_m(\varphi, z_0)$ .

### 3. Методика исправления медианной поверхности магнитного поля.

Как следует из выражения (3), наиболее опасным является такое искажение медианной поверхности, которое приводит к большому отклонению  $\bar{z}_m$  среднего положения от средней геометрической плоскости ( $\bar{z}_m$ ) и к большим амплитудам гармоник низкого порядка в функции  $\xi_m(\varphi, z_0)$ . И, следовательно, при исправлении медианной поверхности нужно снизить  $\bar{z}_m$  и  $\xi_{mk}$  так, чтобы обеспечить движение пучка ускоряемых ионов в дуанте с минимальными потерями.

Исправление медианной поверхности магнитного поля производилось двумя способами:

а) Перераспределением токов в верхней и нижней катушках электромагнита. Такое перераспределение токов использовалось и раньше<sup>(I)</sup>; оно приводит практически к азимутально-симметричному возмущению магнитного поля, т.е. к изменению  $\bar{z}_m(z)$ . Однако, величина этого возмущения, а следовательно, и изменение значений  $\bar{z}_m$  различны для разных радиусов, и таким методом не всегда возможно получить приемлемые значения  $\bar{z}_m$  для любого радиуса. Амплитуды гармоник в функции  $\xi_m(\varphi, z_0)$  при этом не изменяются.

б) Перераспределением железа на верхнем и нижнем полюсах электромагнита.

Перераспределение железа на полюсах позволяет изменять относительное положение медианной поверхности магнитного поля по радиусу на ограниченном азимуте, т.е. производить локальное исправление ее.

Тонкий железный лист, прикрепленный к внутренней поверхности полюса электромагнита, намагничивается по оси  $Z$  до значения  $\mu_z \approx \frac{B_z}{4\pi}$  гаусс. Изменение основного магнитного поля, вызываемое таким магнитным диполем, можно описать потенциалом:

$$\phi = \frac{\mu_z (z - z')}{[(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{3/2}} \quad (5)$$

$x, y, z$  - координаты точки наблюдения,

$x', y', z'$  - координаты центра магнитного диполя.

При толщине листа  $2h$ , ширине листа  $2a$  и длине листа  $l$  (рис. I) составляющая напряженности магнитного поля по оси  $y$  при  $x = \frac{l}{2}$  определяется выражением:

$$H_y = 2\mu_z z l h \xi \left\{ \frac{1}{[z^2 + (y-a)^2] \sqrt{z^2 + (y-a)^2 + \frac{e^2}{4}}} - \frac{1}{[z^2 + (y+a)^2] \sqrt{z^2 + (y+a)^2 + \frac{e^2}{4}}} \right\} \quad (6)$$

Здесь  $\xi$  - коэффициент, характеризующий "утолщение" листа; из опытных данных принималось  $\xi = 1,8$ . Считается, что толщина листа мала по сравнению с другими линейными размерами. Так как  $H_y(-y) = -H_y(y)$ , то такой железный лист (ось "у" совпадает с направлением радиуса) будет с одной стороны от середины листа вызывать подъем медианной поверхности, а с другой стороны - опускание ее; под серединой листа положение медианной поверхности магнитного поля останется неизменным.

Таким образом, методика локального исправления медианной поверхности магнитного поля заключается в следующем. Каким-либо способом (перераспределением токов в катушках, или предварительным перераспределением железа на полюсах) необходимо добиться того, чтобы медианная поверхность на данном азимуте пересекла среднюю геометрическую плоскость. В месте пересечения на нижний или верхний полюс укладывается железный лист подходящих размеров. Применяя последовательное наложение листов на верхний или нижний полюсы вдоль радиуса, можно получить приемлемую форму медианной поверхности. Для того, чтобы локальные исправления медианной поверхности магнитного поля не приводили к появлению азимутальной неоднородности магнитного поля, вместо соответствующего наложения листов железа производилось перераспределение железа между верхними и нижними полюсами электромагнита.

4. Методика измерения положения медианной  
поверхности магнитного поля

Положение медианной поверхности магнитного поля в зазоре может быть определено по положению витка с током в магнитном поле (2).

Если в азимутально-симметричном магнитном поле по витку из гибкого проводника пропустить ток, и при этом укрепить его так, чтобы место закрепления не давало горизонтальной реакции (например, на поплавке, плавающем в сосуде с жидкостью), то под действием вертикальной составляющей магнитного поля такой виток примет форму окружности с центром на оси симметрии поля. Действие радиальной составляющей поля на виток в конечном счете компенсируется вертикальной реакцией поплавка, и при некоторых условиях виток повиснет в межполюсном пространстве с единственной точкой опоры на поплавке. При малом провисании противоположной по отношению к поплавку части витка, по положению этого витка можно определить среднее положение медианной поверхности магнитного поля на данном радиусе  $r_0$ .

Условие равновесия витка (по оси  $Z$ ) в этом случае можно записать так:

$$0,1l r_0 \int_0^{2\pi} H_z d\varphi - P + Q = 0 \quad (7)$$

Здесь:

$P$  - вес витка,

$Q$  - реакция поплавка,



$i$  - ток витка (в амперах),

$H_z$  - радиальная составляющая напряженности магнитного поля.

Заменив  $H_z = \frac{\partial H_z}{\partial r} (z - z_m)$ , получим:

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} z d\varphi - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} z_m d\varphi = \frac{P-Q}{0,2\pi_i \frac{\partial H_z}{\partial r} r_0}, \quad \text{или}$$

$$\bar{z} - \bar{z}_m = \frac{P-Q}{0,2\pi_i \frac{\partial H_z}{\partial r} r_0} \quad (8)$$

где  $\bar{z} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} z d\varphi$  - среднее значение отклонения координат витка от центральной плоскости зазора;

$\bar{z}_m$  - среднее значение отклонения медианной поверхности на данном радиусе от центральной плоскости зазора.

Сделав  $P=Q$ , можно по положению витка в зазоре непосредственно определить усредненное по окружности положение медианной поверхности магнитного поля на данном радиусе. Однако, такой способ оказывается очень громоздким, так как кроме необходимости предварительного взвешивания витка на поплавке, требуется поддержание постоянства температуры с точностью  $0,2 + 0,3^\circ\text{C}$ .

Удобнее определять среднее положение медианной поверхности магнитного поля на данном радиусе, находя такое положение поплавка на высоте зазора (координата  $z$ ), в котором вертикальное давление витка на поплавок не изменяется

в некотором диапазоне изменения тока  $i$  через виток.

Это условие можно записать так:

$$\frac{\partial Q}{\partial i} = 0$$

что приводит к выражению:

$$\bar{z}_m - \bar{z} = i \frac{\partial \bar{z}}{\partial i} \quad (9)$$

Рассматривая равновесие какого-нибудь элемента витка, можно написать следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 \bar{z}}{d\varphi^2} + n(\bar{z} - \bar{z}_m) = \frac{P}{0,2\pi i H_z} = \gamma, \quad (10)$$

решение которого дает зависимость координат  $\bar{z}$  витка от тока  $i$  и азимута  $\varphi$ .

Приняв, что в точке закрепления нити на поплавке ( $\varphi_1 = 0$  и  $\varphi_2 = 2\pi$ )  $\bar{z} = 0$  получаем:

$$\bar{z} = \frac{1}{\sqrt{n}} \int_0^\varphi [n\bar{z}_m(\xi) + \gamma] \sin[\sqrt{n}(\varphi - \xi)] d\xi - \frac{\sin\sqrt{n}\varphi}{\sqrt{n}\sin 2\pi\sqrt{n}} \int_0^{2\pi} [n\bar{z}_m(\xi) + \gamma] \sin[\sqrt{n}(2\pi - \xi)] d\xi. \quad (11)$$

Используя соотношение  $\frac{\partial \bar{z}}{\partial i} = \frac{\partial \bar{z}}{\partial i}$  после выполнения дифференцирования получим для положения, в котором реакция поплавка не зависит от тока:

$$\bar{z}_m - \bar{z} = \left[ \frac{\operatorname{tg} \pi\sqrt{n}}{\pi n\sqrt{n}} - \frac{1}{n} \right] \frac{P}{0,2\pi i H_z} \quad (12)$$

Выражение (12) позволяет по измеренному значению  $\bar{Z}$  и вычисленной правой части определить  $\bar{Z}_m$ .

Виток прибора выполнялся из провода диаметром 0,15 мм. Величина тока в витке изменялась от 50 до 100 ма.

Описанный выше метод не позволяет определить точной формы медианной поверхности магнитного поля, а следовательно, и определить амплитуды гармоник. Для этих целей необходимы локальные измерения положения медианной поверхности.

Такие измерения производились при помощи подвешенной на гибкой нити тяжелой прямоугольной рамки с током, расположенной так, что плоскость рамки близка к вертикальной (рис. 2). Под действием радиальной составляющей магнитного поля рамка поворачивается вокруг оси  $Z$  в ту или другую сторону.

Если перемещать рамку по высоте, то направление поворота изменится на обратное при пересечении ею медианной магнитной поверхности. При подходящем подборе веса рамки, числа витков её, тока и противодействующего момента нити, можно получить достаточную точность определения положения медианной магнитной поверхности. Так, например, рамка, использованная для измерения, имела  $a = 3$  см  $b = 6$  см  $c = 1,5$  см, число витков - 1000, вес - 400 г, удельный момент нити

$K = 13,6$  дин/см/рад. Через рамку пропускался ток 0,5 ма. При этих параметрах обеспечивалась точность измерения положения медианной поверхности  $\pm 0,5$  см.

## 5. Результаты

До исправления медианной поверхности магнитного поля её среднее положение на радиусе 100 см было ниже средней геометрической плоскости зазора примерно на 3 см, а на радиусе 250 см - выше на 7 см. Амплитуда первой гармоники в функции  $Z_m(\varphi, r_0)$  на радиусе 250+280 см достигала 10 см. Исходя из удобства последующего исправления посредством перераспределения железа, была выбрана разность между током в верхней и током в нижней катушках электромагнита 5,5% от тока в нижней катушке. При этом среднее положение медианной магнитной поверхности на радиусе 100 см существенно не изменилось, на радиусе же 200+280 см оно стало выше средней геометрической плоскости зазора всего на 1+2 см. Среднее положение магнитной медианной поверхности после исправления перераспределением железа на полюсах электромагнита показано на рис.4. При этом амплитуда первой гармоники на всех радиусах не превышает 2 см, а максимальные отклонения медианной поверхности от средней геометрической плоскости - 4 см. На рис.4 нанесено положение циркулирующего пучка ионов, определенное при помощи радиоавтографов. Как видно, различие между кривыми не выходит за пределы точности измерений положения медианной поверхности и определения положения пучка ионов при помощи радиоавтографов.

Изложенная в статье работа проводилась в июле - августе 1953 года при формировании магнитного поля шестиметрового синхроциклотрона. В работе принимал участие студент-дипломник Московского инженерно-физического института Арзуманов А.А.

Л и т е р а т у р а :

1. Честной А.В., Катышев В.С. и др. Отчет Института ядерных проблем АН СССР, 1951 г.

2. Anderson H.L., Marshall J., Koznblith L., jr., Schwarcz L. and Miller R., Rev. Sci. Instr. 23, 707 (1952)





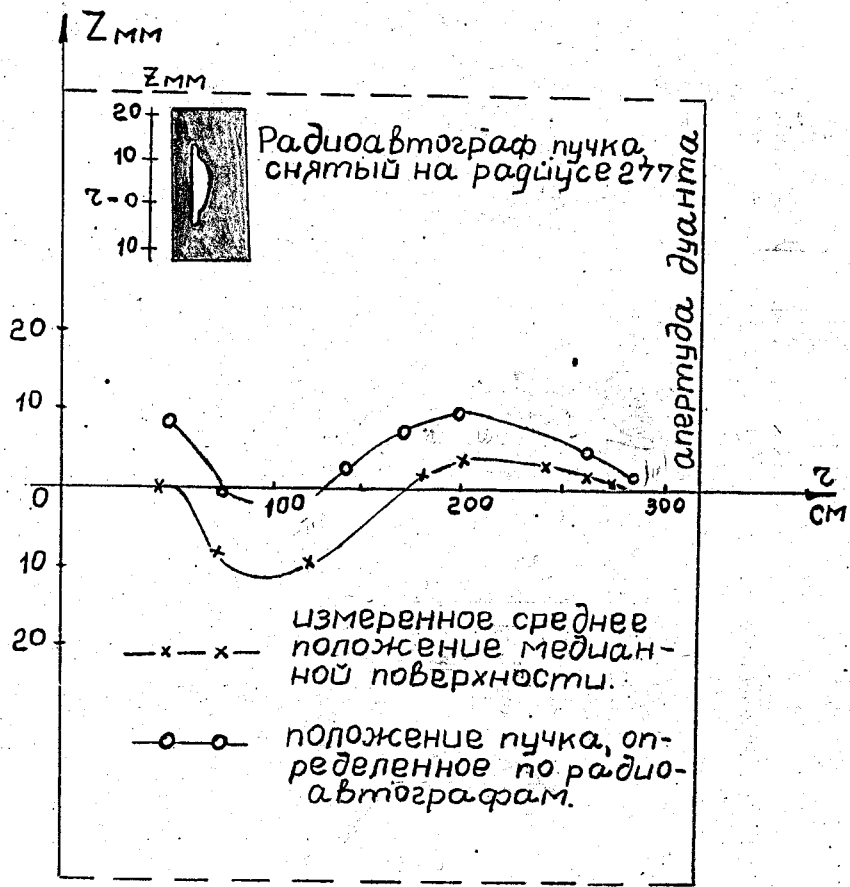


Рис. 4.