

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



С345еУ

А-484

10/1-77

P9 - 10090

45/2-77

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

ДОПУСКИ НА ЭЛЕМЕНТЫ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ  
ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА У-120 М

**1976**

P9 - 10090

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

ДОПУСКИ НА ЭЛЕМЕНТЫ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ  
ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА У-120 М

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

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

P9 - 10090

Допуски на элементы магнитной системы изохронного циклотрона У-120М

Согласно требованиям к точности формирования магнитного поля изохронного циклотрона У-120М, найдены допуски на элементы магнитной системы циклотрона и монтаж камеры ускорителя в зазоре электромагнита.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований  
Дубна 1976

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

P9 - 10090

Tolerance for the Elements of the Magnetic  
System of the Isochronous Cyclotron Y-120M

In conformity with the requirements for the accuracy of formation of the magnetic field of the isochronous cyclotron Y-120M there was found the tolerance for the elements of the magnetic system as well as for assembling of the chamber of the accelerator in the electromagnet gap.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research  
Dubna 1976

Допуски на элементы магнитной системы, определяемые требованиями к точности формирования магнитного поля ускорителя, обсуждались во многих работах <sup>1,2/</sup>.

Для изохронного циклотрона У-120М они сводятся к следующим:

1. Ограничиваясь допустимым фазовым сдвигом пучка  $\Delta\phi = \pm 5^\circ$  и полагая длину волны сформированного поля относительно изохронного закона равной зазору между спиральными шиммами  $2h_1 = 10$  см, получим  $\Delta\bar{H}_z/\bar{H}_z = \sqrt{2} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \sqrt{3}$ .

2. Допуск на градиент среднего магнитного поля определяется допустимым отклонением частоты свободных аксиальных колебаний от заданного закона. Для У-120М  $\Delta Q_z/Q_z \approx 0,1$ , что соответствует  $\Delta(d\bar{H}_z/dr) = \sqrt{2} \cdot 10$  Э/см для интервала радиусов  $\Delta r = \sqrt{10} \cdot 51$  см.

3. Допустимая величина амплитуды первой гармоники аксиальной составляющей поля выбрана  $H_{z1} = \sqrt{2} \cdot 7$  Э. Она определялась из анализа нелинейного радиального резонанса четвертого порядка  $Q_r = \frac{N}{N} = 1$  в центральной области  $\Delta r = \sqrt{0} \cdot 20$  см и допустимым смещением центра орбиты относительно геометрического центра ускорителя в зоне конечных радиусов  $\Delta r = \sqrt{45} \cdot 52$  см, найденного из анализа эффективности системы вывода пучка из циклотрона <sup>4/</sup>. В остальной зоне  $H_{z1}$  может быть увеличено до  $H_{z1} = \sqrt{4} \cdot 14$  Э.

4. Малая апертура дуанта  $d = 16$  мм обусловила жесткий допуск на величину средней составляющей радиальной компоненты поля. Если принять высоту пучка

$\Delta z = 5$  мм и предположить, что точность изготовления и юстировки дуанта составит  $\sim \pm 1 \div 2$  мм, то максимальный отход пучка от средней плоскости ускорителя не должен превышать  $\pm 2 \div 3$  мм, что соответствует  $\bar{H}_r = 10 \div 10$  Э.

Величины допусков, приведенные в пп. 2,3,4, относятся к нижнему диапазону среднего магнитного поля  $\bar{H}_z = 10$  кЭ. Из сравнения допустимых возмущений магнитного поля для трех режимов работы /табл. 1/ видно, что наиболее жесткий допуск на величины  $\bar{H}_r$  и  $\Delta(d\bar{H}/dr)$  соответствует  $I_0 = 610$  А, а на  $H_{z1} - I_0 = 175$  А.

Ниже приводятся расчетные и экспериментальные оценки возмущений магнитного поля, обусловленные наиболее характерными отклонениями от заданных параметров при изготовлении магнитной системы циклотрона.

### 1. Среднее магнитное поле

а/ ошибка в изготовлении профиля спиральных шимм  $h_1(r)$  для У-120М составляет величину  $\Delta h_1 = \pm 0,1$  мм.

Таблица 1

Допуски на возмущения магнитного поля

|               |                                      | г (см) | 10  | 20   | 30   | 40   | 50   |
|---------------|--------------------------------------|--------|-----|------|------|------|------|
| $I_0 = 610$ А | $\Delta(\frac{d\bar{H}}{dr})$ (Э/см) |        | 0,9 | 2,5  | 4,3  | 4,9  | 4,7  |
|               | $H_{z1}$ (Э)                         |        | 4,2 | 14,4 | 20,9 | 30,1 | 17,5 |
|               | $\bar{H}_r$ (Э)                      |        | 0,9 | 2,5  | 4,3  | 4,9  | 4,8  |
| $I_0 = 350$ А | $\Delta(\frac{d\bar{H}}{dr})$ (Э/см) |        | 1,4 | 3,6  | 6,5  | 7,8  | 8,6  |
|               | $H_{z1}$ (Э)                         |        | 3,2 | 10,9 | 15,5 | 22,6 | 11,7 |
|               | $\bar{H}_r$ (Э)                      |        | 1,4 | 3,6  | 6,4  | 7,8  | 8,7  |
| $I_0 = 175$ А | $\Delta(d\bar{H}/dr)$ (Э/см)         |        | 1,7 | 4,9  | 7,8  | 8,6  | 9,8  |
|               | $H_{z1}$ (Э)                         |        | 1,9 | 6,0  | 7,8  | 10,4 | 3,8  |
|               | $\bar{H}_r$ (Э)                      |        | 1,7 | 4,9  | 7,8  | 8,6  | 9,9  |

Возмущения магнитного поля можно оценить по формуле, описывающей магнитное поле тонкой, в аксиальном направлении, кольцевой шиммы ( $\Delta h \ll h$ ) в предположении равномерного намагничивания<sup>5/</sup>

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

где  $M$  - намагниченность ферромагнетика,  $\Delta h$ ,  $h$  - высота кольцевой шиммы и ее расстояние от средней плоскости.  $\psi$  - табулированная функция<sup>5/</sup>,  $R_1$ ,  $R_2$  - внутренний и внешний радиусы кольцевой шиммы.

Полагая  $4\pi M = 20000$  Гс и принимая  $\Delta R = R_2 - R_1 = 2$  см, найдем  $\bar{H}_z = 10$  Э.

б/ По технологическим соображениям спиральные шиммы У-120М выполнены из трех частей. Стыковка этих частей осуществляется на радиусах  $r = 30$  см и  $r = 54$  см.

Оценка возмущений из-за неизбежных зазоров в местах стыков проводилась по формуле для расчета магнитного поля тонкой, в радиальном направлении, кольцевой шиммы<sup>5/</sup>

$$\bar{H}_z = 8M \Delta R \frac{h}{(R-r)^2 + h^2} \Big|_{h_2}^{h_1} \quad /2/$$

Наибольшую опасность представляет зазор между соприкасающимися цилиндрическими поверхностями частей спиральных шимм на  $r = 30$  см, где для  $\Delta R = 0,05$  см и высоты спиральных шимм  $h_2 - h_1 = 11 - 5,6 = 5,4$  см возмущение составит  $H_z = 15$  Э.

в/ Плакировка камеры является несущим элементом системы токовых обмоток, расположенных со стороны медианной плоскости ускорителя и разделом между форвакуумным и высоковакуумным объемами камеры. Для обеспечения необходимой жесткости крепление плакировки к системе осуществляется винтами М6, расположенными на радиусах  $R = 21,5; 29,5; 37,0; 44,0$  см.

Используя выражение<sup>6/</sup>

$$\bar{H}_z = \frac{2MS}{\pi r R \sqrt{rR}} \{h_1[-Q'_{-1/2}(x_1)] - h_2[-Q'_{-1/2}(x_2)]\}, \quad /3/$$

где  $Q'_{1/2}$  - производная сферической функции Лежандра от аргумента

$$x_{1,2} = \frac{h_{1,2}^2 + r^2 + R^2}{2rR},$$

найдем, что для четырех пар резьбовых отверстий  $M6/S = 0,38 \text{ см}^2/$  в спиральных шиммах  $\Delta h = h_2 - h_1 = 7,0 - 5,6 = 1,4 \text{ см}$  на радиусе установки цилиндров  $r=R = 29,5 \text{ см}$  возмущение среднего поля составит  $\Delta \bar{H}_z = 8 \text{ Э}$ . Отметим, что протяженность этого возмущения мала и шиммирование его с помощью системы токовых обмоток потребовало бы дополнительной мощности питания. Поэтому для устранения этих возмущений крепежные винты были выполнены составными из магнитного /Ст-3/ и немагнитного /нержавеющая сталь/ материалов.

## 2. Первая гармоника аксиальной составляющей магнитного поля

Магнитное поле спиральных шимм может быть представлено в виде суммы полей от четырех пар спиралей, сдвинутых на угол  $\pi/2$

$$H_z(r, \phi) = \bar{H}(r) + \sum_{m=1}^{\infty} H_m \left[ \sum_{k=0}^3 \cos\left(\frac{m r}{N \lambda} - m \phi - \frac{k \pi}{2}\right)^2 \right], \quad /4/$$

где  $H_m$  - амплитуда  $m$ -й гармоники поля описывается выражением

$$H_m = \frac{8M}{m} \sin\left(m \frac{\alpha}{2}\right) \left( e^{-\frac{m h_1}{N \lambda}} - e^{-\frac{m h_2}{N \lambda}} \right), \quad /5/$$

$N \lambda = 18$  - параметр спирали,  $\alpha$  - угловая протяженность спиральных шимм.

Первую гармонику поля, вызванную ошибками в изготовлении  $i$ -го параметра  $/h_1; h_2; \alpha; N \lambda/$ , можно оценить по формуле

$$H_{z1}^i = \frac{\partial}{\partial i} \left[ H_1 \sum_{k=0}^3 \cos\left(\frac{R}{N \lambda} - \phi - \frac{\pi k}{2}\right) \right] \Delta i. \quad /6/$$

На основании требований, сформулированных на  $H_{z1}$  /см. табл. 1/, получим следующие допуски:  $\Delta h_1 =$

$= \pm 0,05 \text{ мм}$ ,  $\Delta \alpha = \pm 0,05^\circ$ ;  $\Delta(N \lambda) = \pm 0,05 \text{ мм}$ ;  $\Delta a = \pm 0,18 \text{ мм}$  - эксцентricность;  $\Delta \beta = 0,1 \text{ мм/м}$  - непараллельность системы спиральных шимм.

Допуск на точность центровки вакуумной камеры ускорителя, на которой смонтированы стальные крышки с системой спиральных шимм, относительно полюсов электромагнита определяется из экспериментальных данных. На рис. 1 представлены зависимости амплитуды первой гармоники  $H_{z1}$  от радиуса для трех режимов работы  $/I_0 = 610, 350, 175 \text{ А/}$  при двух положениях камеры  $/\Delta a_k = 3 \text{ мм}$  и  $\Delta a_k = 0,3 \text{ мм/}$ . Видно, что для выполнения заданных допусков  $H_{z1} < 10 \text{ Э}$ , соосность камеры относительно полюсов должна быть выдержана с точностью  $\Delta a_k < 0,3 \text{ мм}$ . Поэтому точная установка камеры должна осуществляться на основании экспериментального определения  $H_{z1}$  с последующей регулиров-

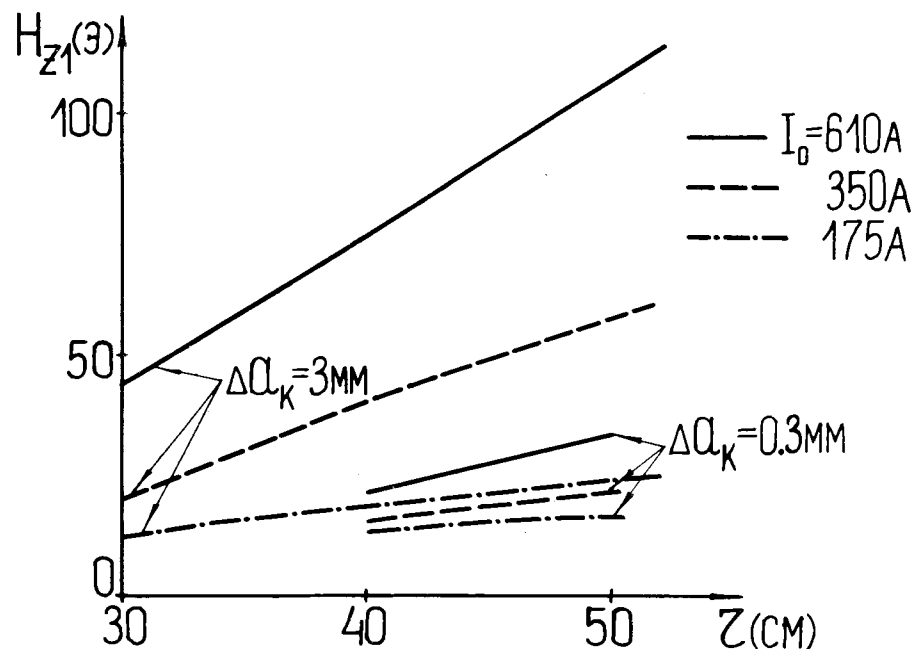


Рис. 1. Зависимость первой гармоники аксиальной составляющей поля от радиуса при двух эксцентричных положениях камеры относительно полюсов электромагнита.

кой ее положения в соответствии с амплитудой и фазой первой гармоники поля.

На рис. 2 приведены зависимости  $H_{z1}(r)$  для трех режимов работы ускорителя. Видно, что для кривой 1 и 2 величины первой гармоники меньше допусков, для кривой 3 соответствующее смещение центра орбит на конечных радиусах составит  $\sim 2$  см, что может потребовать дополнительной оптимизации параметров выводной системы.

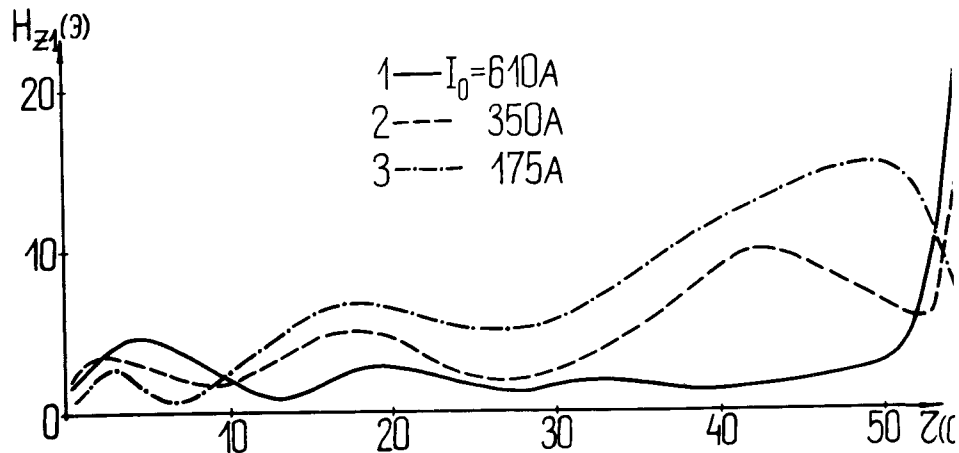


Рис. 2. Зависимость первой гармоники аксиальной составляющей поля для трех уровней сформированного среднего магнитного поля.

### 3. Средняя радиальная составляющая магнитного поля

Измерение горизонтальных составляющих поля циклотрона выполнялось холловским магнитометром, разработанным в ОНУ ЛЯП<sup>7</sup>. Датчик Холла подвешивается на нити, при этом измеряется горизонтальная компонента магнитного поля. Ошибка, возникающая за счет неточности вертикальной ориентации датчика, исключается путем вычитания результатов измерения в исходном положении датчика и повернутом на  $180^\circ$ . Однако в случае отсутствия горизонтальности средней плоскости маг-

нитной системы возникает первая гармоника радиальной составляющей с амплитудой

$$\Delta H_{r1} = \bar{H}_z \cdot \sin \alpha, \quad /7/$$

где  $\alpha$  - угол наклона средней плоскости относительно горизонта. Измерения  $H_r(\delta)$  на радиусе  $r=0$  показаны на рис. 3, из которых видно, что радиальная составляющая обусловлена негоризонтальностью средней плоскости всей магнитной системы в целом  $\sim 3$  мм/м /кривая 1/ и  $0,3$  мм/м /кривая 3/. Компенсация  $H_{r1}$  за счет юстировки лишь вакуумной камеры неэффективна /кривая 2/.

С другой стороны, существенное влияние на величину средней составляющей радиальной компоненты поля оказывает положение камеры относительно средней плоскости зазора электромагнита. На этом же рисунке показана зависимость  $\bar{H}_r(\delta)$  для  $r = 40$  см, откуда видно, что при допустимой величине  $\bar{H}_r < 5$  Э камера должна быть юстирована с точностью  $\pm 0,2$  мм.

В работе<sup>8</sup> показано, что для ускорителей с пространственной вариацией магнитного поля отклонение медианной поверхности ( $H_r = 0$ ) от средней плоскости вызывается как средней, так и основной гармоникой радиальной составляющей поля и может быть рассчитано по формуле

$$\bar{z} = \frac{r \cdot \bar{H}_r}{\bar{H}_z \cdot Q_z^2} + \frac{r \cdot H_{rN}}{\bar{H}_z \cdot Q_z^2 (N^2 - 1 - n)}. \quad /8/$$

Наличие второго члена в этом выражении связано с отклонением равновесной орбиты от окружности радиуса  $r$ .

Для определения медианной поверхности по выражению /8/ на основании измерений  $\bar{H}_r$  и  $H_{rN}$  необходимо, чтобы плоскость измерения с достаточной точностью совпадала со средней плоскостью. Заметим, что электрический центр датчика Холла известен с точностью  $\pm 0,5 \div 0,7$  мм, а геометрическое положение измерительной штанги определяется не лучше  $\pm 0,2$  мм.

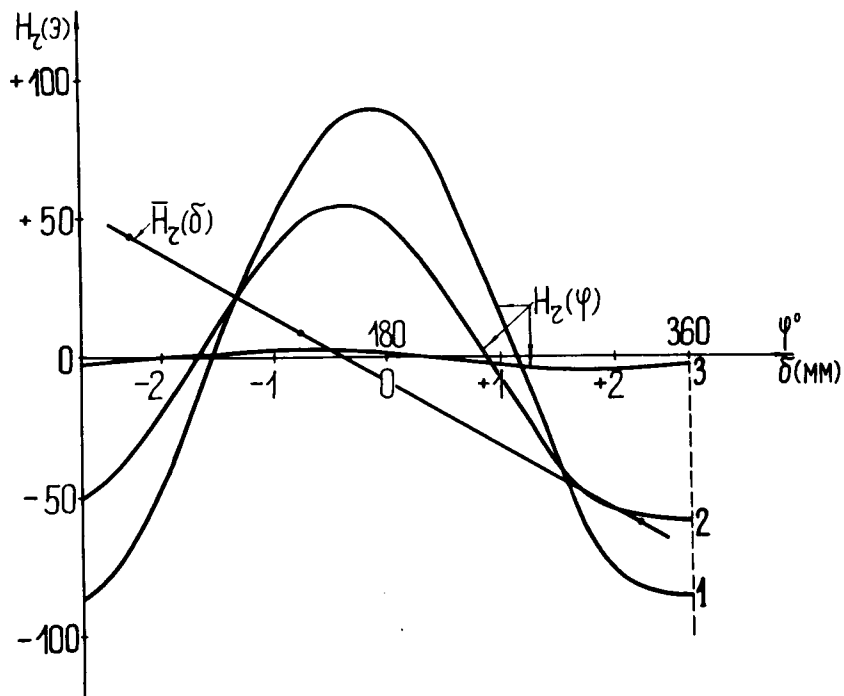


Рис. 3. Радиальная составляющая поля. а/ 1,2,3 -  $H_r(\phi)$  для  $r=0$  при различной негоризонтальности элементов магнитной системы; б/ 4 -  $H_r(\delta)$  для  $r=40$  см, где  $\delta$  - смещение средней плоскости камеры относительно средней плоскости магнита.

Радиальная составляющая поля вблизи средней плоскости ( $\text{rot } \vec{H} = 0$ ) может быть записана

$$H_r(r, \phi) = \frac{\partial H_z(r, \phi)}{\partial r} \cdot \delta_z(r, \phi), \quad /9/$$

где  $\delta_z(r, \phi)$  - отклонение плоскости  $H_r=0$  от средней. Причем функции  $H_r(r, \phi)$ ;  $H_z(r, \phi)$ ;  $\delta_z(r, \phi)$  могут быть представлены в виде ряда

$$F = F_0 + \sum_N F_N \cos N(\phi_N - \phi_0). \quad /10/$$

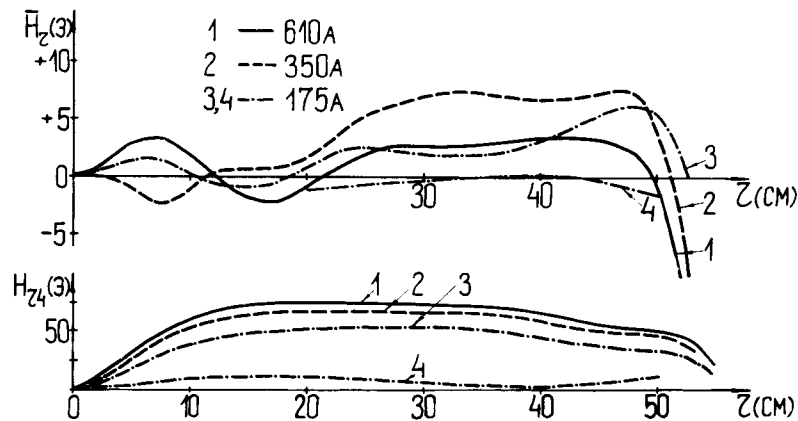


Рис. 4. Радиальная составляющая поля циклотрона. а/ 1,2,3 для плоскости, отстоящей от средней на  $\delta_z = 1,5$  мм; б/ 4 - для средней плоскости.

Из /9/ и /10/ легко получить

$$\bar{\delta}_z = \frac{H_{zN}(r)}{\sqrt{\left[ \frac{dH_{zN}(r)}{dr} \right]^2 + \left[ NH_{zN}(r) \frac{d\phi_{zN}(r)}{dr} \right]^2}}. \quad /11/$$

На рис. 4 приведены зависимости  $\bar{H}_r(r)$  и  $H_{r4}(r)$  для трех уровней индукции циклотрона У-120М. Используя /11/, найдем  $\bar{\delta}_z = 1,2$  мм. Результаты повторного измерения топографии радиальной составляющей поля при  $I_0 = 175$  А, смещенной на  $\delta_z = 0,2$  мм, показаны на этом же рисунке. Видно, что амплитуда  $H_{r4}$  уменьшилась в /3-4/ раза и составляет  $< 15$  Э, а средняя величина  $\bar{H}_r$ -составляющей не превышает допуск. Следует отметить, что появление амплитуды  $H_{r4}$  в геометрической средней плоскости магнитной системы может быть также связано с эксцентricностью и разворотом верхнего и нижнего полюсных наконечников со спиральными шим-

мами друг относительно друга. Экспериментально найдено, что разворот наконечников на  $\Delta\phi = \pm 0,01$  рад приводит к  $N_{\pm 4} = 20$  Э, что является максимально допустимой величиной.

### Заключение

Изохронный циклотрон У-120М запущен в июне 1976 г. Исследования характеристик пучка протонов  $/E_k = 40$  МэВ и  $E_k = 30$  МэВ/ показали:

1. Отсутствие потерь пучка по радиусу.
2. Вертикальный размер пучка составляет  $\sim 5$  мм.
3. Отклонение пучка от средней плоскости ускорителя не превышает  $\pm 2$  мм.
4. Смещение центра орбит изменяется в пределах  $/0,5 \pm 1/$  см.

Полученные характеристики пучка хорошо согласуются с результатами формирования магнитного поля ускорителя.

### Литература

1. W. Joho, SIN Report TM-11-4, March, 1968.
2. M.K. Craddock, J.R. Richardson, TRIUMF Report TR1-67-2, December, 1968.
3. Ю.Г. Аленицкий и др. ОИЯИ, Р9-6241, стр. 15-25, Дубна, 1972.
4. В.П. Дмитриевский, В.В. Кольга, Н.И. Полумордвинова. ОИЯИ, Р9-5498, стр. 24-32, Дубна, 1971.
5. В.И. Данилов и др. ОИЯИ, Р-702, Дубна, 1961.
6. В.М. Данилов и др. ОИЯИ, Р-409, Дубна, 1959.
7. Д.П. Василевская, Ю.Н. Денисов. ПТЭ, 5, 194, 1961.
8. В.М. Дмитриевский и др. ОИЯИ, 1057, Дубна, 1962.

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 сентября 1976 года.