

С345и

В-781

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P-2165



С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин,  
В.С.Рыбалко, Л.А.Саркисян, Е.Швабе, Чжао Вей-цзян

ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
СПИРАЛЬНОГО ЦИКЛОТРОНА  
С ПОМОЩЬЮ ТОКОВ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1965

P-2165

С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, А.А.Крохин,  
В.С.Рыбалко, Л.А.Саркисян, Е.Швабе, Чжао Вей-цзян

ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
СПИРАЛЬНОГО ЦИКЛОТРОНА  
С ПОМОЩЬЮ ТОКОВ

Объединенный институт  
экспериментальной физики  
БИБЛИОТЕКА

3316/3 чр.

## В в е д е н и е

В последние годы при формировании магнитного поля изохронных циклотронов широко используются токовые обмотки. Токовые обмотки в магнитной системе ускорителя значительно облегчают процесс шиммирования среднего поля, медианной поверхности и низших гармоник, а также позволяют производить последующую коррекцию поля по пучку ускоренных ионов. Наличие токовых обмоток позволяет производить быструю перестройку закона среднего поля и вариации без разборки вакуумной камеры в циклотронах с регулируемой энергией.

Для изучения возможностей формирования магнитного поля релятивистского циклотрона (РЦ)<sup>/1/</sup> с помощью токов в 1960 году было осуществлено шиммирование магнитного поля спирального циклотрона<sup>/2/</sup> с помощью шести концентрических токовых обмоток. Проведенные исследования позволили сформулировать требования на токовую систему РЦ, параметры которой были выбраны на модели магнитной системы релятивистского циклотрона<sup>/3/</sup>.

Настоящая работа посвящена формированию магнитного поля спирального циклотрона токовыми обмотками, конструкция которых освобождена от недостатков использованной ранее токовой системы. При достигнутой точности формирования резонансного закона среднего поля  $\pm 0,001$  тл в интервале радиусов  $\Delta r = (52,5 - 15,0)$  см и минимальном напряжении на дуанте  $V_0 = 15$  кв получен хорошо сфокусированный пучок дейтронов с энергией  $\sim 13,5$  Мэв.

В работе также показана возможность использования данной токовой системы при перестройке магнитного поля без разборки вакуумной камеры для перевода циклотрона в режим ускорения протонов до энергии  $\sim 18,5$  Мэв.

### 1. Конструкция обмоток и система питания

Выбор параметров токовой системы (число обмоток, необходимые ампервитки, радиальная протяженность) в спиральном циклотроне представляет сложную задачу и

определяется размерами ускорителя, расстоянием от средней геометрической плоскости зазора до обмоток и их расположением в магнитной системе, а также той точностью, с которой должен быть сформирован необходимый закон среднего магнитного поля.

Для формирования магнитного поля циклотрона число обмоток было выбрано равным шести. Параметры этих обмоток приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

N	I	II	III	IV	V	VI
$R_2 - R_1$ (см)	16,0-8,8	24,0-16,5	33,2-27,2	39,7-33,7	46,2-40,2	52,7-46,7
$h_2 - h_1$ (см)	10,6-8,6	10,6-8,6	10,6-8,6	10,6-8,6	10,6-8,6	10,6-8,6
W	18	18	14	14	14	14

$R_1$  и  $R_2$  - внутренний и внешний радиус катушки,  $h_1$  и  $h_2$  - расстояние от средней плоскости до нижнего и верхнего оснований катушки, W - число витков в катушке.

Токвые обмотки (рис. 1) располагались между дюралевыми дисками со спиральными шиммами и крышкой камеры (рис. 2).

В качестве проводника использовалась медная трубка  $\varnothing$  (0,7x0,15) см, изолированная двойным слоем киперной ленты толщиной 0,02 см. Все обмотки покрыты слоем эпоксидной смолы, поэтому специального вакуумного уплотнения объема, в котором располагались обмотки, не проводилось. Экспериментально было показано, что рабочий вакуум  $(1-2) \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст. ( $1,3-2,7$  мм/м<sup>2</sup>) в объеме камеры не изменялся при токах через обмотки  $I = (250 \div 500)$  а и давлении охлаждающей воды - 4 атм.

Разъемы катушек с тоководами, имеющиеся по периферии полюсных наконечников (рис. 1 и 3), позволяли монтировать катушки на дисках со спиральными шиммами вне камеры ускорителя.

Каждая обмотка имела независимый источник питания, стабильность тока которого составляла  $\pm 1 \cdot 10^{-2}$ . При стабильности тока в обмотке электромагнита  $\pm 3 \cdot 10^{-4}$ , магнитное поле в зазоре с шиммирующими обмотками поддерживалось с точностью  $\pm 8 \cdot 10^{-4}$ . Измерение  $H_z$  - составляющей поля производилось магнитометром Холла, точность которого составляла  $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ .

## II. Формирование магнитного поля циклотрона

Формирование магнитного поля вида

$$H_z(r, \phi) = \frac{H_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{r_\infty}\right)^2}} \left[ 1 + \epsilon \cos\left(\frac{r}{\lambda} - N\phi\right) \right]$$

в спиральном циклотроне /2/ при  $\lambda = 2,7$  см,  $r_\infty = N = 6$ ,  $H_0 = 1,372$  тл,  $r_\infty = 447$  см для дейтронов распадается на две относительно самостоятельные задачи — формирования вариации  $\epsilon$  и среднего поля  $H_z(r)$ .

На рис. 4 приведено радиальное распределение среднего поля (кривая 2), которое необходимо было шиммировать с помощью токовых обмоток до резонансного значения (кривая 1). Исходная кривая 2 соответствует среднему полю системы спиральных (2) и кольцевых (3) шимм в зазоре электромагнита, изображенных на рис. 2. Резко неоднородное магнитное поле в центральной области связано с использованием спиральных шимм с постоянной высотой и толщиной по нормали к средней линии спирали, начальный радиус которых соответствует  $r_H = 7,0$  см.

Поле обмоток в магнитной системе циклотрона определялось экспериментальным путем. На рис. 5 приведены радиальные распределения поля при токе через обмотку 100 а, выделенные при уровне магнитного поля в зазоре электромагнита  $H_0 = 1,4$  тл, путем азимутальных измерений на одном периоде структуры магнитной системы.

Эксперименты с обмотками показали, что в пределах точности измерений при используемых значениях поля в зазоре электромагнита имеет место линейность между полем и током обмотки и соблюдается принцип суперпозиции магнитных полей одиночных обмоток.

Расчеты и эксперименты показали, что для данной магнитной системы возможно рассчитать поле обмоток по формуле витка при учете 10–15 отображений в полюсах электромагнита с точностью до 10%. Это свидетельствует о слабом экранирующем действии спиральных шимм на магнитное поле обмоток.

Из рис. 4 и 5 видно, что использование обмоток для формирования резонансного закона среднего поля в центральной области до радиуса  $r = 10$  см является малоэффективным. Поэтому первоначально было произведено шиммирование поля в центральной области с помощью центральных кольцевых шимм (кривая 3, рис. 4).

Расчеты по определению токов в обмотках для формирования среднего поля циклотрона производились на электронно-вычислительной машине ОИЯИ по методу наименьших квадратов. Уровень поля в зазоре определялся в соответствии с резонансным значением среднего поля на конечных радиусах системы, где вклад поля обмоток практически близок к нулю. Было проведено два расчета по шиммированию исходного поля до резонансного уровня в интервале радиусов  $\Delta r = (52,5 - 7,5)$  см и  $\Delta r = (55,0 - 7,5)$  см

при числе равностоящих точек 19 и 20 соответственно. Распределение токов в обмотках для этих двух вариантов приведено в таблицах II и III <sup>х)</sup>.

Т а б л и ц а II

N	I	II	III	IV	V	VI
I(a)	-335,1	-73,8	-101,2	-2,7	-178,4	-230,1

Т а б л и ц а III

N	I	II	III	IV	V	VI
I(a)	-273,0	-135,4	54,3	-323,6	228,6	-563,3

Расчеты показали, что максимальное отклонение поля в заданной области радиусов при этом составляет  $+0,0015$  тл и  $+0,0080$  тл, соответственно. В центральной области это отклонение достигает  $-0,0080$  тл для первого варианта. На основе этих результатов расчета было выбрано распределение тока в обмотках, приведенное в таблице II, и конечный радиус ускорения был принят равным  $r_k = 52,5$  см. Измерения поля в зазоре электромагнита при значениях токов в обмотках, приведенных в таблице II, показали, что экспериментальные данные совпадают с расчетным в пределах точности эксперимента.

На рис. 6 показаны два характера распределения поля в центральной области (кривые 2 и 3), полученные с помощью различных конфигураций центральных кольцевых шимм. Среднее поле, изображенное кривой 2, может привести к аксиальной дефокусировке пучка в интервале радиусов  $\Delta r = (8-5)$  см. По оценкам, увеличение амплитуды аксиальных колебаний при прохождении этой области составит  $\sim 30\%$  при напряжении на дуанте 20 кв. Поле, изображенное кривой 3, обладает аксиальной фокусировкой и не приводит к заметным фазовым потерям частиц. Оценки показали, что при напряжении на дуанте 20 кв фазовый сдвиг составляет  $\sim 15^\circ$ . Поэтому предпочтение было отдано последнему варианту распределения поля в центральной области ускорителя.

Так как формирование среднего поля спирального циклотрона было в основном осуществлено за счет токовых обмоток, точность изготовления и установки которых совместно с крышками камеры и системой спиральных шимм была достаточно высокой, то амплитуды низших гармоник поля находились в пределах допусков и не требовали дальнейшей коррекции (рис. 7).

<sup>х)</sup> Знак минус соответствует направлению тока в обмотке, при котором ее поле направлено противоположно полю электромагнита.

Следует отметить, что достигнутая точность стабилизации магнитного поля электромагнита и обмоток  $\pm 8 \cdot 10^{-4}$  является недостаточной при длительных экспериментах с пучком частиц.

В заключение авторы выражают благодарность В.А.Бычкову за конструирование системы токовых обмоток, А.Н.Булатову за разработку системы питания, Д.П.Васильевской за обеспечение надежной работы приборов для измерения магнитного поля, М.М.Анапьеву и П.Т.Рыбакову за помощь в проведении экспериментов.

## П Р И Л О Ж Е Н И Е

### Возможность ускорения протонов до энергии $\sim 18,5$ Мэв

Наличие токовых обмоток в магнитной системе спирального циклотрона позволяет решить вопрос формирования магнитного поля без разборки вакуумной камеры для перевода ускорителя в режим ускорения протонов. Исходя из максимального значения частоты резонансной системы для данного циклотрона  $f_0 = 18,5$  МГц, уровень магнитного поля в центре был выбран равным  $H_0 = 1,170$  тл ( $f_0 = 17,9$  МГц). При этом значении поля можно получить протоны с энергией  $\sim 18,5$  Мэв на конечном радиусе ускорения  $r_k = 52,5$  см.

На рис. 10 приведен резонансный закон распределения среднего магнитного поля с радиусом для протонов (кривая 1). Измерения в магнитной системе показали, что при уменьшении тока в основной обмотке электромагнита и при токах в шиммирующих обмотках, приведенных в таблице IV, отклонение сформированного поля в зазоре (кривая 2) от требуемого (кривая 1) не превышает  $\pm 0,0015$  тл в интервале радиусов  $\Delta r = (52,5 - 15,0)$  см. Спад поля в центральной области радиусов так же как и при дейтронном варианте не приведет к заметным фазовым потерям.

Т а б л и ц а IV

N	I	II	III	IV	V	VI
I(a)	-335,1	-73,8	-101,2	0	-178,4	106,0

Распределение амплитуды основной гармоники с радиусом  $H_0(r)$  приведено на рис. 10 (кривая 3). Расчет показал, что частота аксиальных колебаний  $Q_z$  в интервале радиусов  $\Delta r = (20 - 52,5)$  см изменяется как и в случае дейтронов от 0,08 до 0,16, что является достаточной величиной для осуществления аксиальной фокусировки ускоренных протонов.

## Л и т е р а т у р а

1. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов и др. Труды международной конференции по ускорителям. М. Атомиздат, 1964, стр. 547.
2. Д.П.Василевская, А.А.Глазов, В.И.Данилов и др. Атомная энергия, в, 6, 657 (1959); в, 3, 189 (1960).
3. С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский и др. Препринт ОИЯИ Р-1738, Дубна (1964).
4. Д.П.Василевская, Ю.Н.Денисов. ПТЭ, в, 194 (1961).
5. В.П. Дмитриевский, Н.Л.Заплатин и др. Препринт ОИЯИ, 1057, Дубна (1962).

Рукопись поступила в издательский отдел  
8 мая 1965 г.



Рис. 1. Система токовых обмоток в сборе.



Средняя плоскость

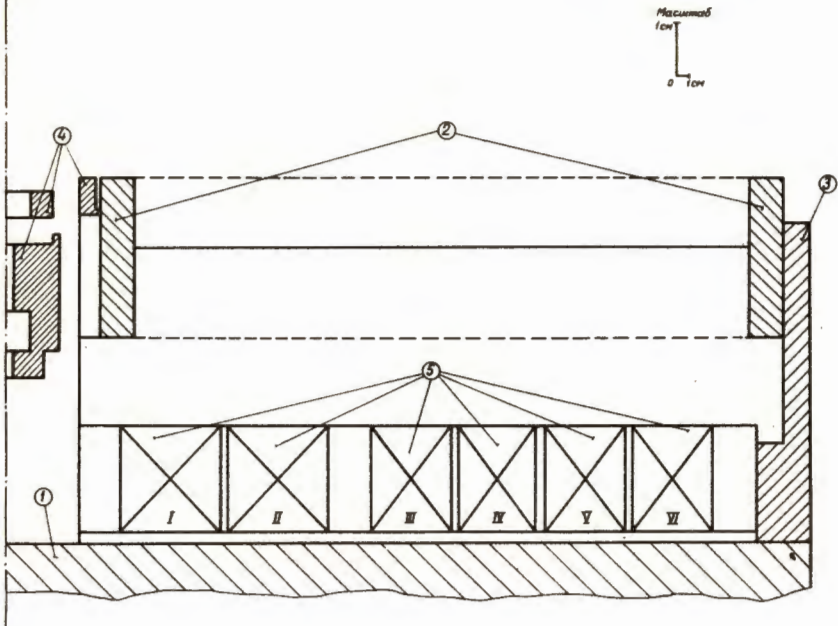


Рис. 2. Схема расположения токовых катушек, спиральных и кольцевых шимм в зазоре электромагнита.  
1. Крышка вакуумной камеры, 2. Спиральные шиммы, 3. Конечная кольцевая шимма, 4. Центральные кольцевые шиммы, 5. Токовые катушки.

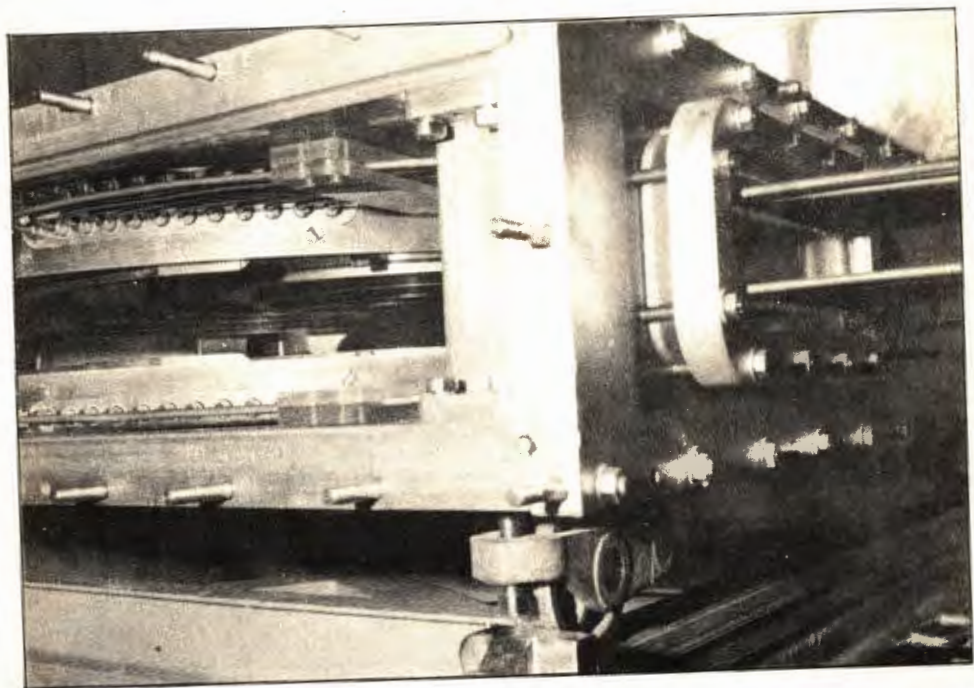


Рис. 3. Расположение тоководов в камере циклотрона.

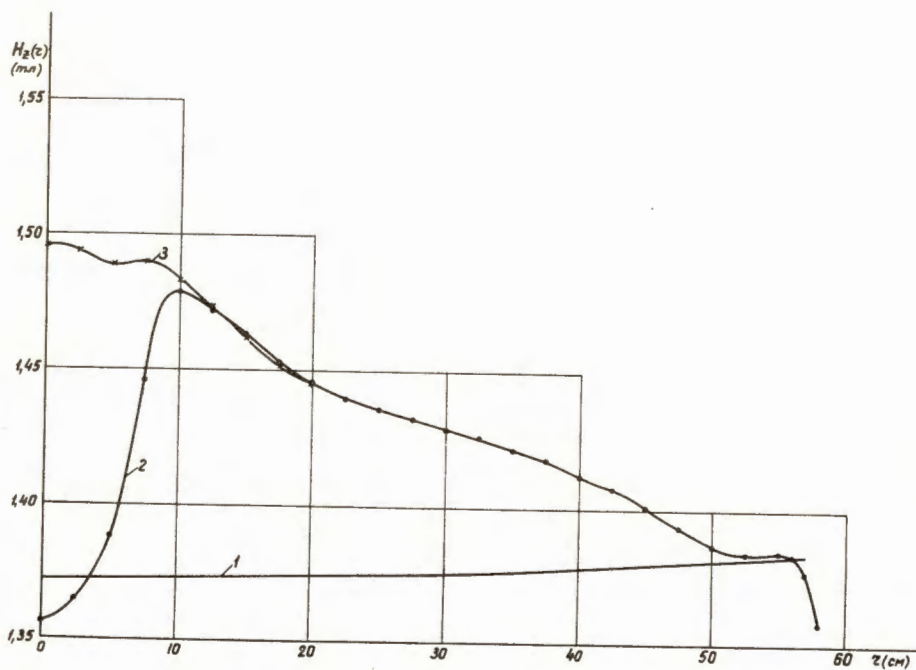


Рис. 4. Зависимость среднего магнитного поля от радиуса.  
 1. Резонансная кривая среднего поля для дейтронов при  $H_0=1,372$  тл.  
 2 и 3 - среднее поле до и после установления центральных кольцевых шимм.

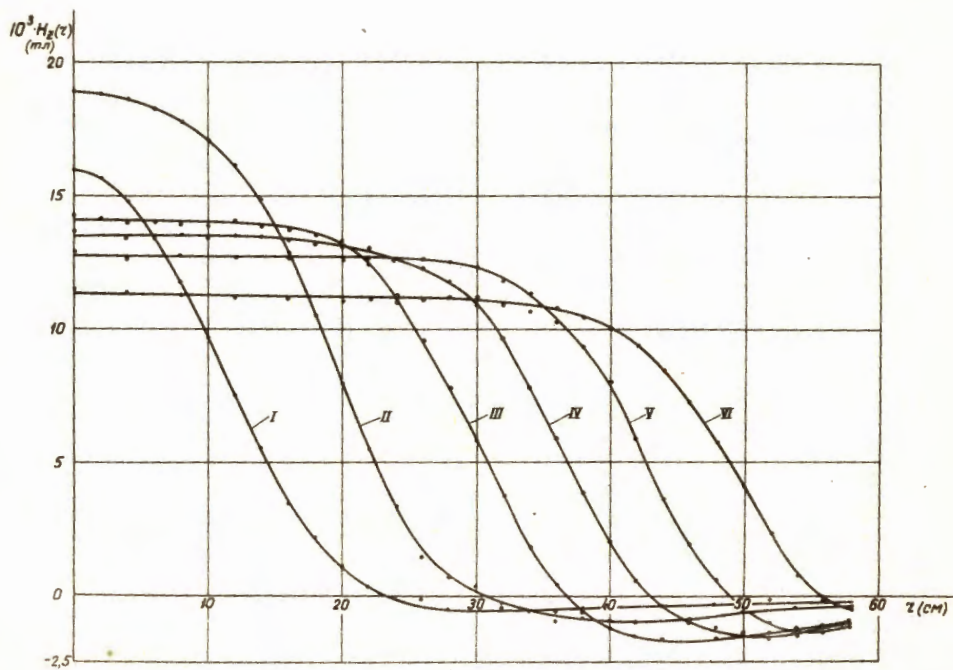


Рис. 5. Поле токовых обмоток в магнитной системе циклотрона  
( $H_0 = 1,4$  тл,  $I = 100$  а).

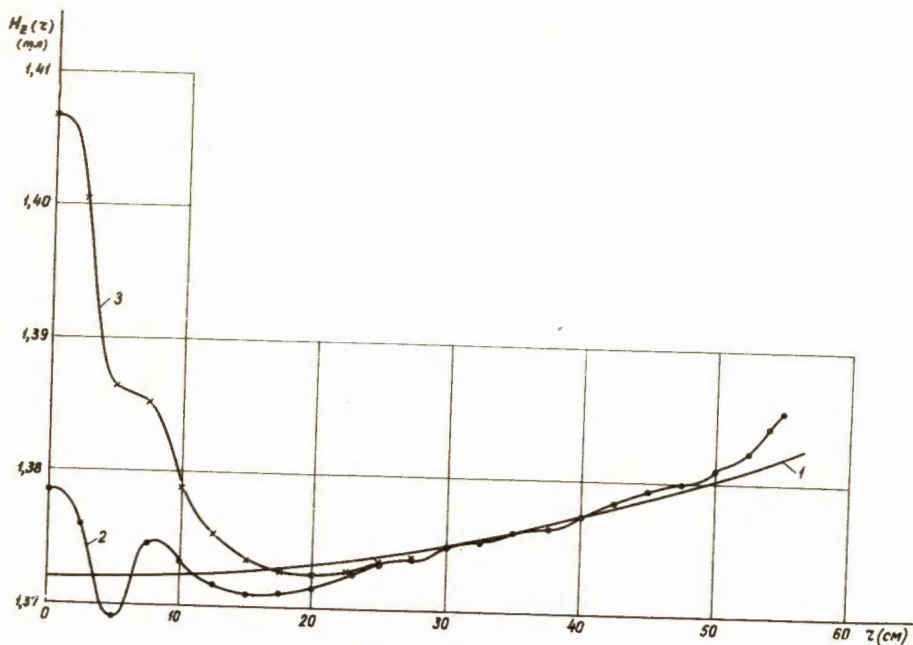


Рис. 6. Среднее магнитное поле циклотрона при токах в обмотках, приведенных в таблице II и различных конфигурациях центральных кольцевых шимм.

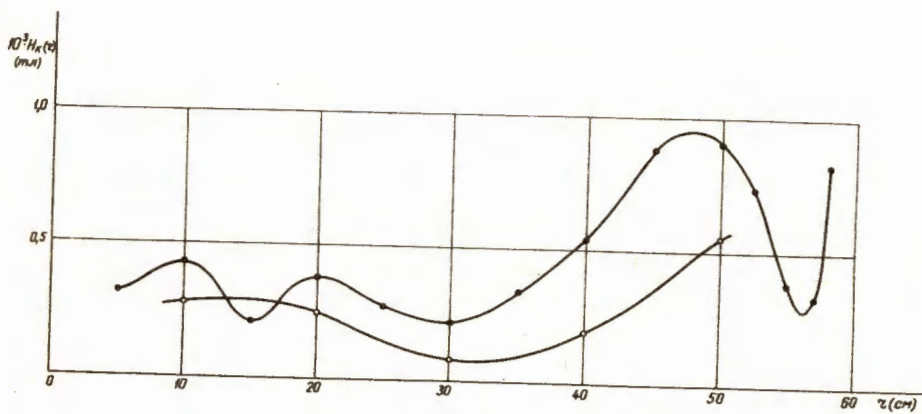


Рис. 7. Амплитуды нижних гармоник магнитного поля циклотрона.  
 —●— амплитуда первой гармоники, —○— амплитуда второй гармоники.

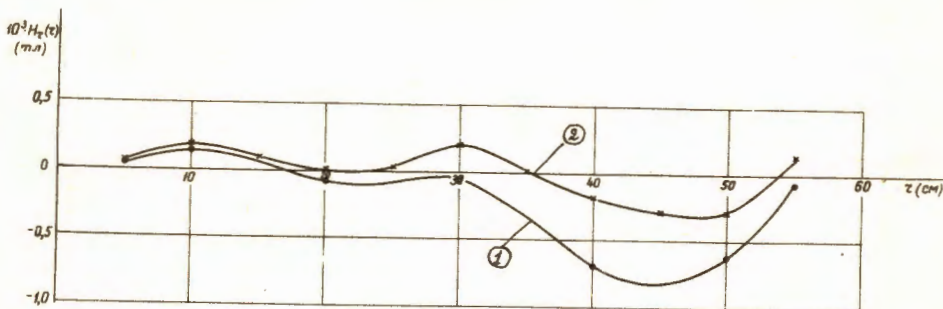


Рис. 8. Распределение радиальной компоненты поля  $H_r(r)$  в средней плоскости зазора.

1. Распределение  $H_r(r)$  (при симметричном питании катушек).
2. Зависимость  $H_r(r)$  при перераспределении тока в  $V$  обмотке на  $\pm 14a$ .

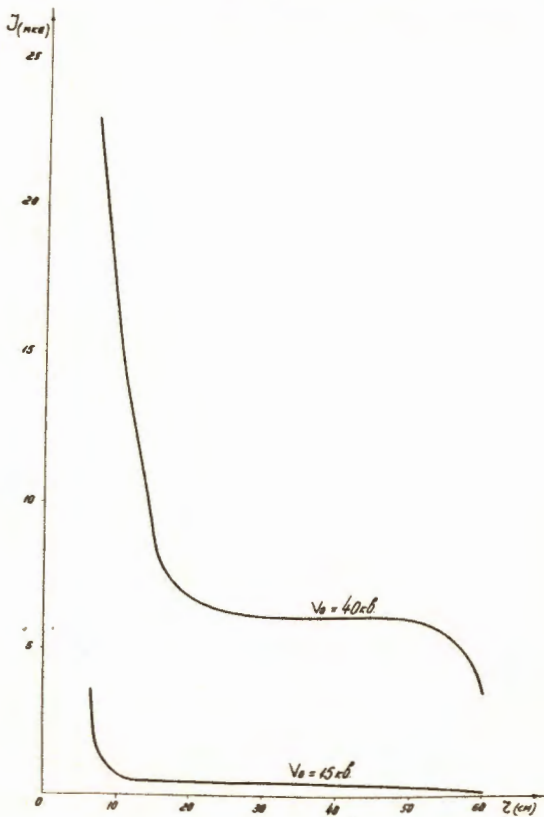


Рис. 9. Ток пучка в зависимости от радиуса при различных напряжениях на дуанте.

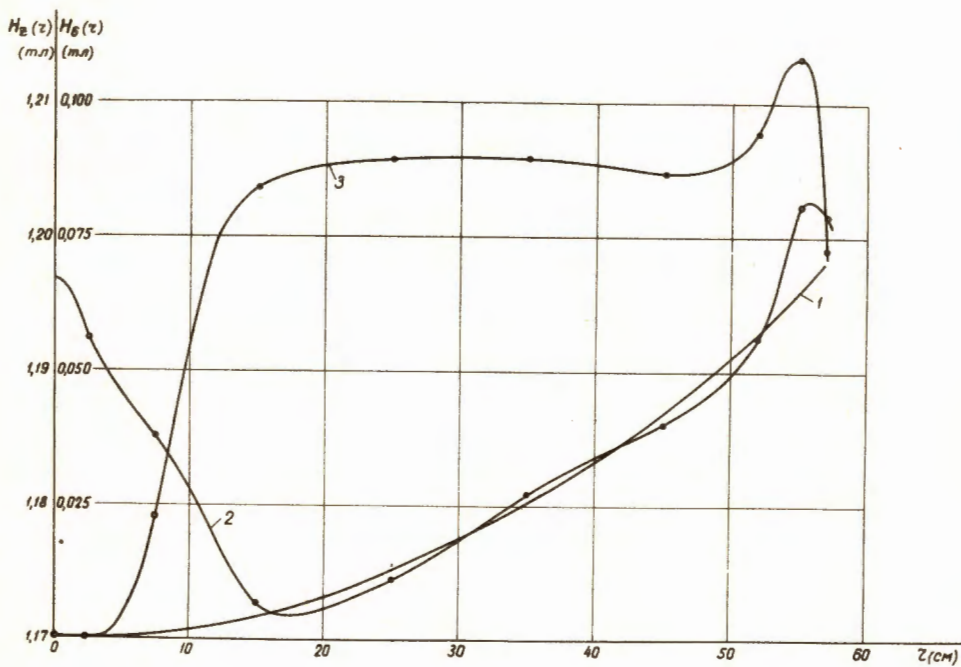


Рис. 10. Радиальная зависимость среднего поля и вариации для протонного варианта.  
 1 - резонансная кривая среднего поля при  $H_0 = 1,170$  тл.  
 2 и 3 - среднее поле и вариация при уменьшении тока в основной обмотке электромагнита и токах в шиммирующих обмотках, приведенных в таблице IV.