

С 345

С - 202

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

9 - 3810

Л.А.Саркисян

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ
ИЗОХРОННОГО ПРОТОННОГО ЦИКЛОТРОНА
С ЖЕСТКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

Специальность 052 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата физико-математических наук

Дубна 1968

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Н.Л.Заплатин.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, старший научный сотрудник Е.С.Мионов,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Э.А.Мяз.

Ведущее предприятие: Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры имени Д.В.Ефремова .

Автореферат разослан " " 1968 г.

Защита диссертации состоится " " 1968 г. на заседании Учёного совета Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Адрес: г. Дубна, Московская область, Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных проблем.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Учёный секретарь Совета

О.А.Займидорога

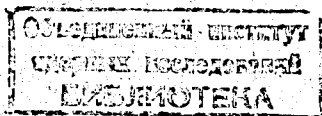
9 - 3810

Л. А. Саркисян

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ
ИЗОХРОННОГО ПРОТОННОГО ЦИКЛОТРОНА
С ЖЕСТКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

Специальность 052 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата физико-математических наук



С конца 50-х годов в ряде ядерных центров различных стран введено в действие значительное количество циклотронов на разные энергии, использующих принцип пространственной вариации напряженности магнитного поля, основанный на предложениях Томаса/1/, Керста и др./2/. Использование этого принципа в ускорителях класса циклотрон-синхроциклотрон позволяет:

1) значительно увеличить предельную энергию частиц (протоны до 100 Мэв); ускорять различные ионы в одном ускорителе и изменять их энергии в широких пределах (см., например,/3/);

2) создавать релятивистские протонные циклотроны на энергии до 1 Гэв, а также реконструировать существующие синхроциклотроны с целью повышения интенсивности протонных пучков до десятков - сотен микроампер (см., например,/4,5/);

3) обеспечить высокую эффективность вывода.

Получение высокоэнергетических и интенсивных пучков в релятивистских циклотронах при высоком коэффициенте вывода позволит, наряду с повышением точности многих ранее проведенных физических исследований, поставить ряд принципиально новых экспериментов на вторичных частицах.

Однако для целого ряда физических, медико-биологических и технических задач потребуются пучки π -мезонов с энергиями в сотни Мэв и интенсивностями на несколько порядков выше, чем это возможно достичь в релятивистских циклотронах. Такое повышение интенсивности в изохронных циклотронах может быть достигнуто при значительном увеличении жесткости магнитной

системы в аксиальном направлении ($Q_z > 1$) и одновременно - наборе энергии частицами за каждый оборот. Это возможно осуществить в кольцевых циклотронах с внешней инжекцией частиц, предложенных в Дубне в 1962 г. В.П.Джелеловым, В.П.Дмитриевским, Б.И.Замолотчиковым, В.В.Кольгой^{8/} и позднее - в ряде лабораторий США^{7,8/}.

С целью изучения динамики движения частиц, уточнения требований, предъявляемых к магнитному полю, оценки эффектов пространственного заряда, определения эффективности инжекции и эжекции пучка в таком ускорителе в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в 1964 году были начаты работы, связанные с разработкой и сооружением электронной модели изохронного кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой на энергию протонов ~ 800 Мэв и интенсивностью ~ 100 ма. Запуск этой модели успешно осуществлен в конце 1967 года.

Реферлируемая диссертация посвящена разработке магнитной системы и формированию магнитного поля указанной двухметровой электронной модели циклотрона. Основные результаты исследований, изложенных в диссертации, опубликованы в работах^{9,10,14/}.

В первой главе приведены некоторые результаты теоретического исследования движения частиц в магнитных полях с пространственной вариацией. Выбраны параметры электронной модели циклотрона, сформулированы требования к магнитному полю.

Вторая глава посвящена вопросам разработки токовых обмоток магнитной системы ускорителя. На основе расчетов определены геометрические параметры и ампервитки обмоток, формирующих в заданных допусках среднее поле и вариацию, а также обмоток, компенсирующих горизонтальную компоненту поля Земли и нормальную компоненту поля вдоль тракта внешней инжекции.

Результаты экспериментов по формированию магнитного поля ускорителя изложены в третьей главе. Сформированное магнитное поле, как показал запуск ускорителя, обеспечивает аксиальную устойчивость и изохронное ускорение электронов до конечного радиуса ($Q_z = 2,0$) при минимальном напряжении на дуанте 0,7 кв.

I

Магнитное поле релятивистского циклотрона в медианной плоскости ($z = 0$) задается выражением

$$H_z(r, \Phi) = H(r)[1 + \epsilon(r) \cdot \cos(\beta(r) - N\Phi)], \quad (1)$$

где $H(r)$ - изохронное среднее поле, $\epsilon(r)$ - глубина вариации, $\beta(r)$ - фаза вариации, характеризующая спиральность, N - число спиралей.

Обычно выбирают такой режим, при котором частота аксиальных колебаний Q_z , равная нулю в центре ускорителя, начиная с некоторого радиуса принимает отличное от нуля значение, меньшее 0,5, а частота радиальных колебаний Q_r увеличивается с ростом радиуса от 1 до определенных значений (максимальное значение равно 2)^{11/}.

В изохронных циклотронах со сплошными полюсными наконечниками невозможно обеспечить жесткую фокусировку ($Q_{r,z} > 1$) в обоих направлениях. Поэтому интенсивность пучка в таких ускорителях не превышает интенсивности классических циклотронов. Для дальнейшего существенного повышения интенсивности пучка в релятивистских циклотронах (десятки миллиампер и выше) необходимо обеспечить жесткую фокусировку также в аксиальном направлении, что может быть достигнуто при удалении центральной зоны ускорителя.

Требуемая частота аксиальных колебаний, согласно^{11/},

$$Q_n = \sqrt{-n + \left(\frac{\epsilon r \beta'}{N}\right)^2} \cdot \frac{1 - \frac{1+n}{2N^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{N}{r\beta'}\right)^2}{1 - \frac{1+n}{N^2}} \quad (2)$$

может быть получена за счёт соответствующего выбора параметров ускорителя. Здесь n — показатель среднего поля $\beta' = \frac{d\beta}{dr}$.

Среднее магнитное поле, удовлетворяющее изохронизму на всех радиусах, равно

$$H(r) = \frac{H_0 \cdot r(r)}{\sqrt{1 - \left[\frac{r}{r_\infty} r(r)\right]^2}} \quad (3)$$

где H_0 — поле в центре, $r_\infty = \frac{E_0}{e H_0}$, $r(r)$ — характеризует изменение среднего радиуса равновесной орбиты из-за вариации поля. Функция $r(r)$ может быть рассчитана на основе уравнений движения или из ее аналитического представления, приведенного в работе/11/.

Основные параметры разработанной в ЛЯП электронной модели приведены в таблице 1.

Таблица 1

Энергия инжекции	$W_H = 5,8$ кэВ
Энергия ускоренных электронов	$W_k = 408,8$ кэВ
Радиус начальной орбиты	$r_H = 18$ см
Радиус конечной орбиты	$r_k = 100,7$ см
Радиус, соответствующий бесконечной энергии	$r_\infty = 121,29$ см

Напряженность магнитного поля в центре

$$H_0 = 14,06 \text{ э.}$$

Напряженность магнитного поля на радиусе инжекции

$$H(r_H) = 14,01 \text{ э.}$$

Напряженность магнитного поля на конечном радиусе

$$H(r_k) = 24,45 \text{ э.}$$

Вариация поля на конечном радиусе

$$\epsilon(r_k) = 1,062$$

Периодичность структуры поля

$$N = 8$$

Радиальный шаг структуры поля $2\pi\lambda$

$$\lambda = 8 \text{ см}$$

Угол спирали $\mu = \arctg \Phi$

(при $r = 114$ см)

$$\mu = 61^\circ$$

Частота радиальных колебаний

$$1,04 \leq Q_r \leq 2,0$$

Частота аксиальных колебаний

$$Q_n = 1,1 \pm 0,20$$

Максимальный набор энергии за оборот

$$eV = 1,5 \text{ кэВ.}$$

Требуемые радиальные зависимости среднего поля $H(r)$ и амплитуды основной гармоники $H_g(r)$ для параметров циклотрона, приведенных в таблице 1, изображены на рис. 1.

Допуски на среднее поле, амплитуду вариации, производную отклонения ее фазы от спирали Архимеда и низшие гармоники в рабочем интервале радиусов приведены в таблице 2.

Таблица 2.

ΔH (э)	ΔH_g (э)	$\frac{d}{dr} \Delta \Phi_g$ (рад/см)	$H_n^{(1)}$ (э)
0,035 - 0,065	+ (3,6 - 1,8) - (0,9 - 0,4)	+ (28,9 - 7,9) - (6,7 - 2,0)	0,06 - 0,25
$H_n^{(2)}$ (э)	$H_n^{(3)}$ (э)	$H_r^{(0)}$ (э)	$H_r^{(1)}$ (э)
2,1 - 0,15	0,06	0,25 - 0,08	0,06 - 0,015
(на $r = 86,5$ см)			

Поскольку первая гармоника радиальной компоненты магнитного поля Земли $\approx 0,15 \text{ э}$ превышает допуск, необходимо скомпенсировать ее в средней плоскости ускорителя до допустимых значений.

При осуществлении внешней вертикальной инжекции электронов на радиусе $r = 18 \text{ см}$ необходимо осуществить компенсацию вдоль тракта инжекции нормальной компоненты поля величиной $\approx 6 \text{ э}$, обусловленной основными элементами магнитной системы.

II

Формирование требуемого закона магнитного поля (1) величиной в несколько десятков эрстед с заданной выше точностью осуществляется с помощью токовых обмоток. Магнитная система ускорителя состоит из гармонической обмотки, формирующей вариацию поля, 13-концентрических обмоток грубой коррекции - для создания среднего поля, 24 концентрических обмоток тонкой коррекции - для стабилизации фазы пролета и компенсации магнитного поля пучка и двух систем прямолинейных проводников - для коррекции первой гармоники радиальной компоненты магнитного поля Земли и нормальной компоненты поля вдоль тракта внешней инжекции электронов.

Формирование вариации поля осуществляется с помощью обмоток, у которых зазор между проводниками изменяется с радиусом в отличие от плоских гармонических обмоток, использованных в работах [12,13]. Элемент периодичности обмотки состоит из двух симметрично расположенных относительно средней плоскости камеры одиночных проводников, уложенных по линиям спирали Архимеда $r = N \lambda \Phi$, и дугам окружностей R_H и R_K . При угле между прямым и обратным проводником элемента периодичности обмотки $\alpha = \frac{\pi}{N}$ в разложении поля обмотки в ряд сохраняются лишь нечётные высшие гармоники, кратные основной.

Предварительный выбор параметров гармонической обмотки производился по формуле для расчёта амплитуд гармоник от бесконечной системы прямолинейных токов [9].

$$H_{mN} = \frac{0,81 \sqrt{1 + \left(\frac{N\lambda}{r}\right)^2}}{m \lambda} \sin\left(mN \frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{mh \sqrt{1 + \left(\frac{N\lambda}{r}\right)^2}}{\lambda} \quad (4)$$

где $m = 1,2,3, \dots$ I - ток обмотки.

Расчёты магнитного поля гармонической обмотки, проведенные на ЭВМ по точным формулам, показали, что при радиусах обмотки $R_H = 10 \text{ см}$, $R_K = 114 \text{ см}$, угле $\alpha = 22,5^\circ$, зазоре на краю $2h_{\min} = 10 \text{ см}$ и токе $I = 700 \text{ а}$, найденный профиль $h(r)$ формирует амплитуду восьмой гармоники с учётом поведения ее фазы, в заданных допусках в интервале радиусов $\Delta r = (17,5 - 105) \text{ см}/10$. Вклад 24-ой гармоники поля на конечных радиусах не превышает $\approx 17\%$ от вклада основной и увеличивает частоту Q_z на 0,03. Исследования вариации поля на модели плоской гармонической обмотки подтвердили результаты расчёта в случае проводника конечного сечения.

Среднее магнитное поле, которое формируется с помощью обмоток грубой коррекции, определяется как разность между требуемым изохронным полем и суммой средних полей гармонической обмотки и вертикальной компоненты магнитного поля Земли, принятой равной 0,5 э. Нахождение необходимого распределения тока в этих обмотках (с учётом поперечного размера сечения) производилось на ЭВМ методом наименьших квадратов. Отклонение сформированного среднего поля от заданного не превышает $\pm 0,01 \text{ э}$ и фазовый сдвиг частицы составляет менее $1,5^\circ$ при наборе энергии за оборот 1,2 кэВ.

Оценки максимальных ошибок поля при изготовлении и монтаже гармонической и одновитковых концентрических обмоток

с точностью $\Delta R = \pm 0,02$ см, $\Delta h = \pm 0,015$ см и многовитковых концентрических $\Delta R = \pm 0,15$ см, $\Delta h = \pm 0,05$ см показали, что низшие гармоники H_z и H_r компонент превышают допустимые значения. Это представляет значительную опасность для движения частиц, поскольку в ускорителе не предусмотрены обмотки для коррекции этих гармоник.

Схема расположения токовых обмоток магнитной системы ускорителя приведена на рис. 2.

Использование пары катушек Гельмгольца^{/12,13/} для компенсации первой гармоники радиальной компоненты магнитного поля Земли в средней плоскости камеры в рабочем диапазоне радиусов ($\Delta r = 100$ см) оказалось невозможным, так как радиус таких катушек должен быть ≈ 400 см. Поэтому были предложены расположенные вне вакуумной камеры ускорителя прямолнейные проводники конечной длины с одинаковым направлением тока равной величины, ориентированные перпендикулярно магнитному полю Земли^{/10/}.

Для коррекции нормальной компоненты поля от основных обмоток ускорителя вдоль тракта внешней инжекции была разработана система 4-х параллельных оси тракта прямолнейных токовых проводников^{/10/}.

III

Обмотки ускорителя - гармоническая, грубой и тонкой коррекции, компенсации поля вдоль тракта инжекции - располагаются в форвакуумном объеме камеры ускорителя. Проводники компенсации первой гармоники радиальной компоненты магнитного поля Земли располагаются вне вакуумной камеры под ускорителем. На рис. 3 показан процесс сборки катушек тонкой коррекции и гармонической катушки на нижнем полюсе крышки камеры. Питание обмоток осуществлялось стабилизированными источниками питания с точностью $\pm 5 \cdot 10^{-4}$.

Измерительный комплекс магнитного поля ускорителя, сос-

тоящий из магнитометра с пермаллоевым датчиком, измерительной штанги, пульта управления и цифрового анализатора гармоник, позволил автоматизировать процесс измерения и проведение гармонического анализа поля. Точность градуировки пермаллового датчика составляла $\pm 0,03\% \pm 0,002$ э в диапазоне полей ± 100 э при градиенте 5 э/см. Датчик устанавливался в зазоре камеры с точностью $\Delta z = \pm 0,01$ см, $\Delta r = \pm 0,01$ см, $\Delta \Phi = \pm 0,02^\circ$.

Первая гармоника радиальной компоненты магнитного поля Земли величиной 0,132 э во всем диапазоне радиусов ускорителя была скомпенсирована до значения меньшего, чем 0,016 э.

Результаты измерений вертикальной компоненты поля при токе гармонической обмотки $I = 718$ а, расчётных значениях токов в обмотках грубой коррекции и катушках компенсации показали, что отклонения амплитуды вариации от требуемого закона лежат в допусках до $r = 101$ см (кривая 2, рис. 4), а отклонения ее фазы (кривая 4) близки к расчётным (кривая 3). Увеличение расчётного значения тока гармонической обмотки на 18 а, очевидно, связано с неточностью изготовления обмотки.

Отличие среднего поля от требуемого, в основном, связано с увеличением расчётного значения тока гармонической обмотки на 18 а (кривая 1, рис. 5). Для формирования среднего поля были проведены расчёты на ЭВМ с целью определения тока в обмотках грубой коррекции. Измерения показали, что для найденных значений тока в обмотках среднее поле сформировано в заданных допусках с точностью $\pm 0,03$ э в интервале радиусов $\Delta r = (17,5 - 105)$ см (кривая 3, рис. 5).

Частота радиальных колебаний изменяется с радиусом от 1,04 до 2,0 на $r = 100,7$ см, а частота аксиальных колебаний

$$Q_z(r) = 1,1^{+0,07}_{-0,04}$$

Низшие гармоники H_z и H_r компонент поля не превышают заданных допусков.

Повторяемость сформированного магнитного поля составляла по средним значениям и низшим гармоникам H_x и H_y компонент $\pm 0,01$ э и $\pm 0,005$ э, по амплитуде и фазе 8-ой гармоники поля $\pm 0,01$ и $\pm 0,03^\circ$.

Осуществленный в конце 1967 года запуск ускорителя показал, что электроны ускоряются до конечного радиуса ($Q_r = 2,0$) при минимальном ускоряющем напряжении на дуанте 0,7 кв, что обеспечивает не менее 600 оборотов/14/.

Фотография пучка на флуоресцирующей мишени в интервале радиусов $\Delta r = (18 - 108,5)$ см показана на рис. 6.

Общий вид электронной модели циклотрона приведен на рис. 7.

Л и т е р а т у р а

1. L.H.Thomas. Phys. Rev., 54, 580 (1938).
2. D.W.Kert, K.M.Terwilliger et al. Bull. Amer. Phys. Soc., 30, 14 (1955).
3. А.Г.Алексеев, Ю.Г.Басаргин и др. Труды международной конференции по ускорителям, М. Атомиздат, 1964, стр. 600.
4. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П. Джелепов и др. Труды международной конференции по ускорителям. М., Атомиздат, 1964, стр. 547.
5. А.А. Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов и др. Препринт ОИЯИ Р9-3211, Дубна 1967.
6. В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолодчиков, В.В.Кольга. Авторское свидетельство № 26443 с приоритетом от 13.09.62.
7. F.M.Russell. A strong-focusing cyclotron with separated orbits, ORNZ 3431 (June 28, 1963).
8. M.M.Gordon, Nucl. Instr. and Meth., 58, 245 (1968).
9. С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, В.С.Рыбалко, Л.А.Саркисян. Препринт ОИЯИ Р-2852-1, Дубна 1966.

10. С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, Л.А.Саркисян. Препринт ОИЯИ Р9-3448, Дубна 1967.
11. В.В.Кольга. Диссертация, ЛЯП ОИЯИ, 1965.
12. H.G.Blosser, R.E.Worsham et al., Rev.Sci.Inst., 29, 819 (1958).
13. J.A.Martin, Intern. Conf. on high energy accelerators and instrumentation, CERN, 1959, p.205.
14. В.Н.Аносов, А.Т.Василенко, В.П.Джелепов, Л.А.Саркисян и др. Препринт ОИЯИ Р9-3787, Дубна, 1968.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 апреля 1968 года.

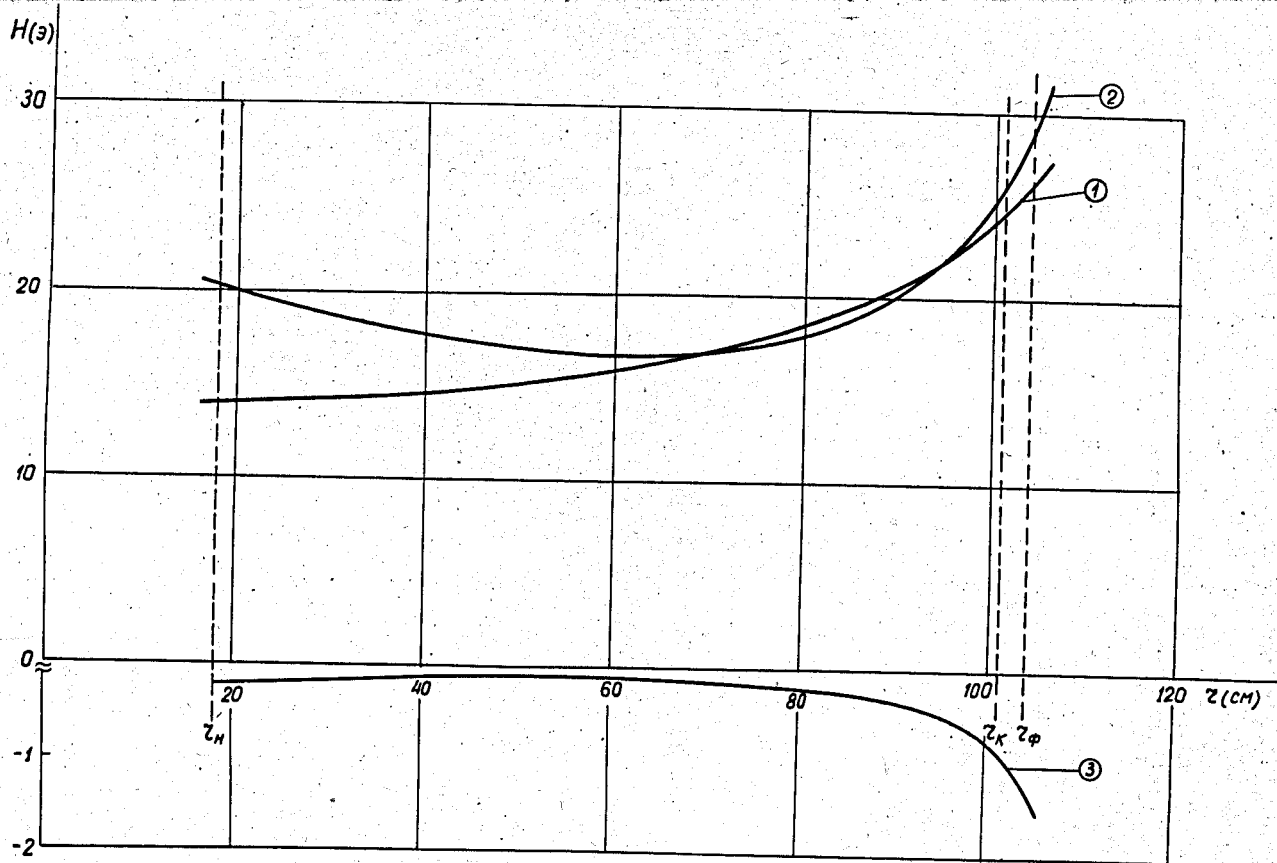


Рис. 1. (1) изохронное среднее поле, (2) вариация, (3) поправка на среднее поле, обусловленная конфигурацией замкнутой орбиты.

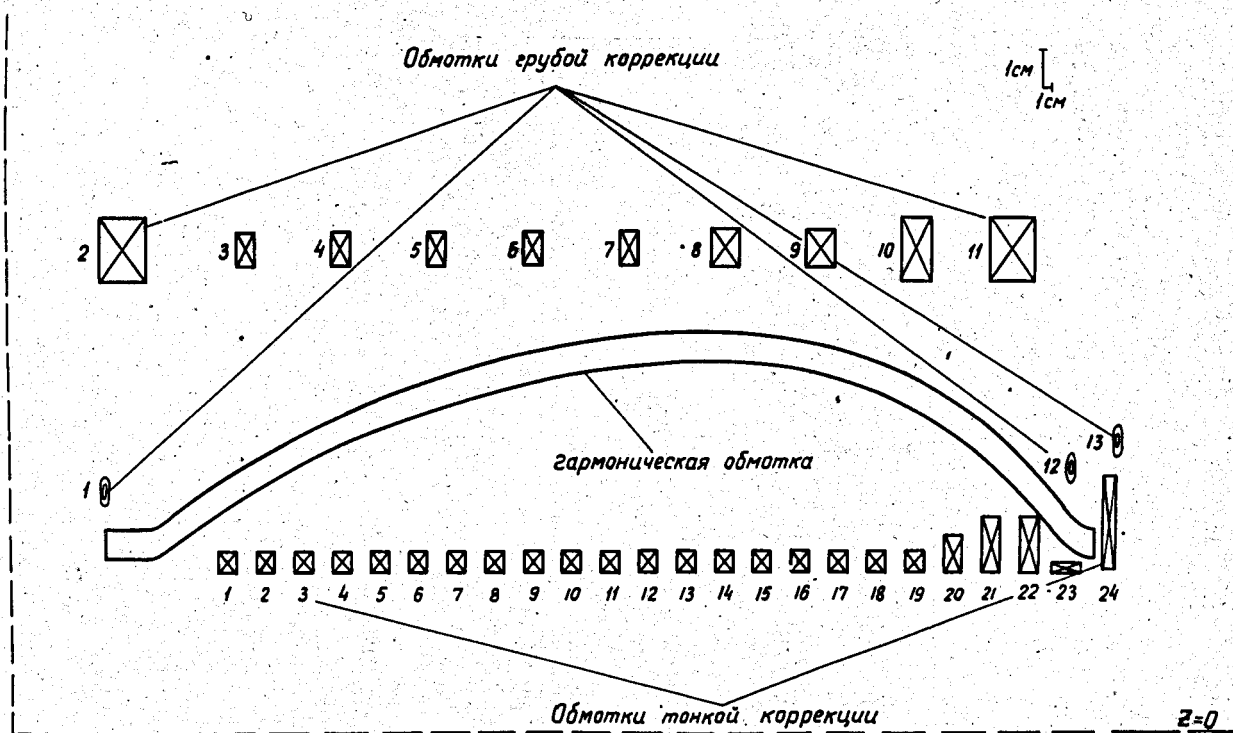


Рис. 2. Схема расположения токовых обмоток ускорителя.

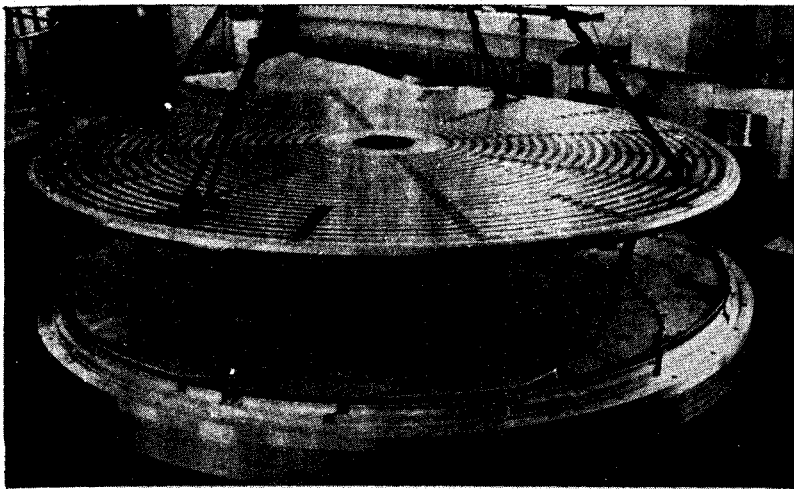


Рис. 3. Сборка катушек тонкой коррекции и гармонической катушки на нижнем полюсе крышки камеры.

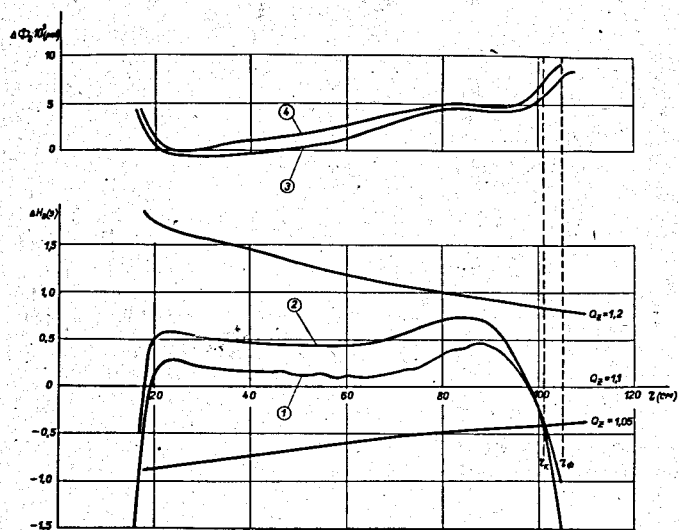


Рис. 4. 1,3 - расчётные отклонения амплитуды и фазы 8-ой гармоники от требуемых значений при токе $I = 700$ а, 2,4 - экспериментальные отклонения амплитуды и фазы 8-ой гармоники от требуемых значений при токе $I = 718$ а.

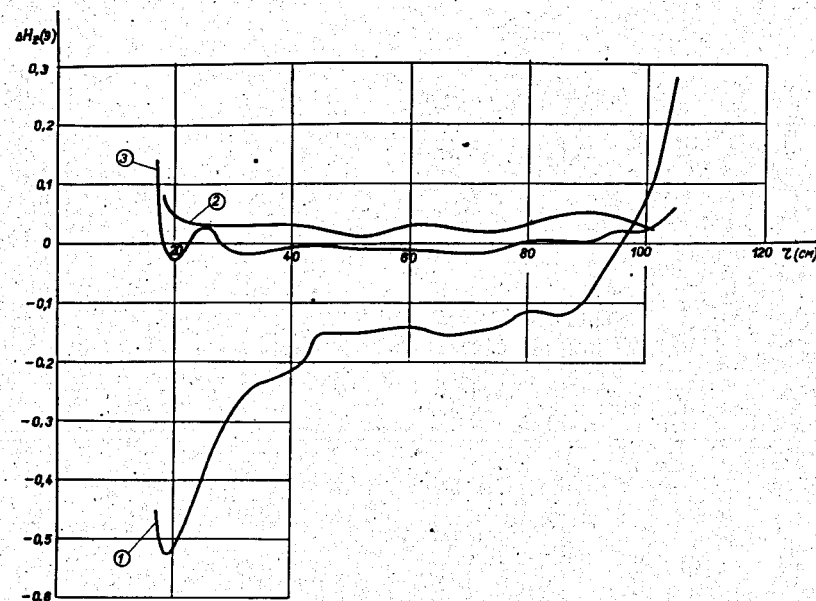


Рис. 5. Отклонение сформированного среднего магнитного поля от изохронного закона.

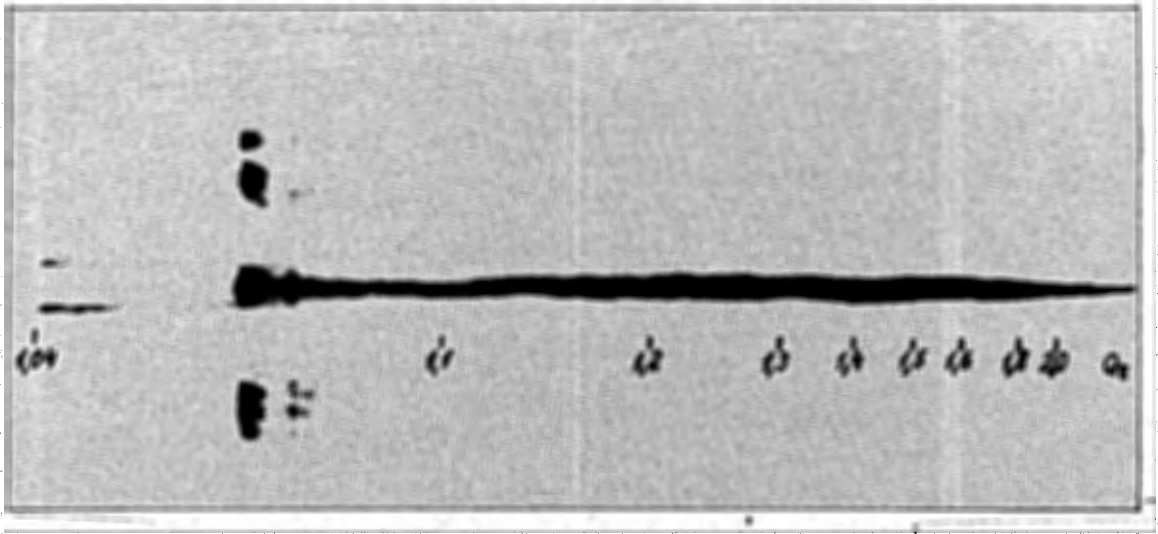


Рис. 6. Фотография пучка на флюоресцирующей мишени.

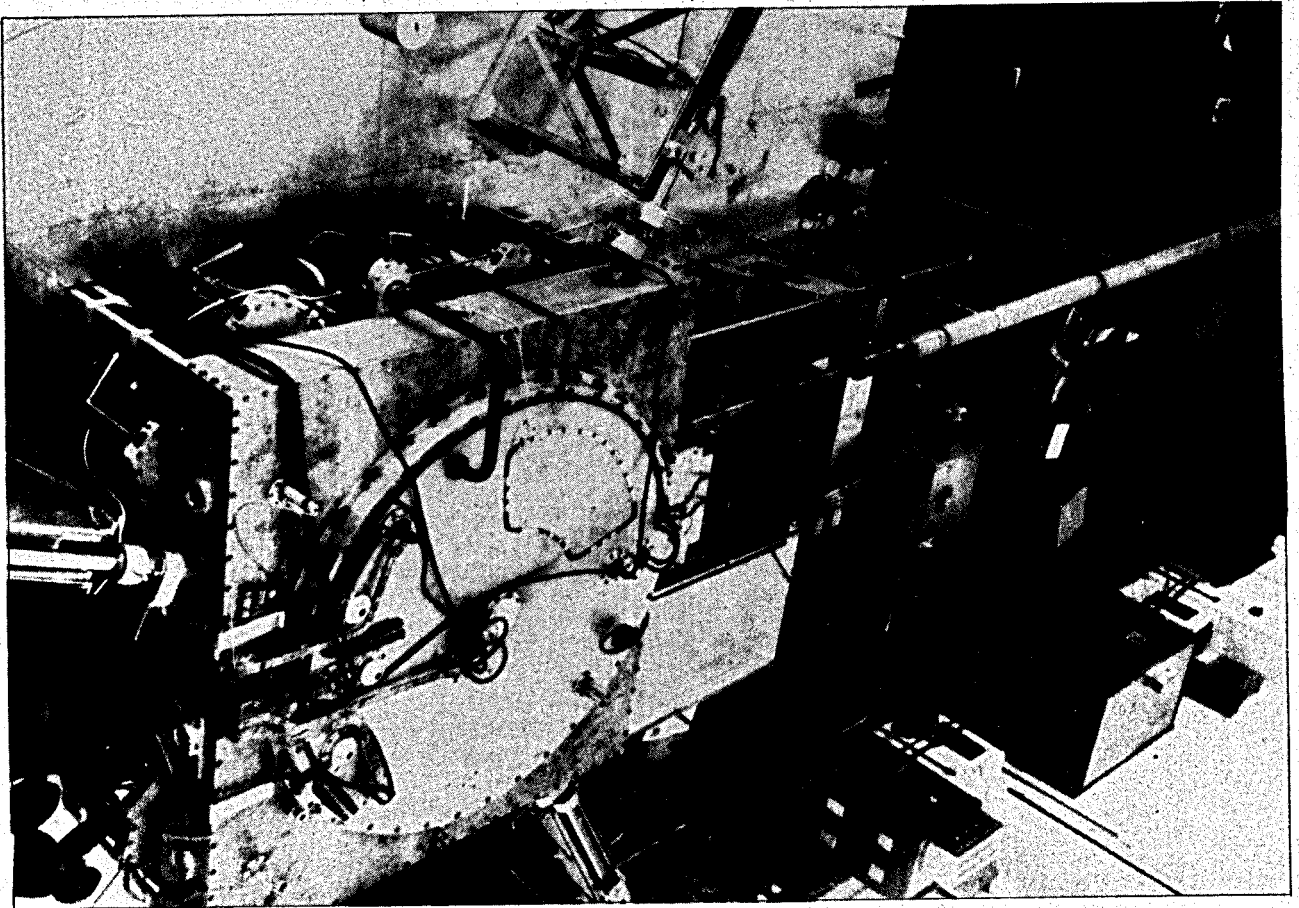


Рис. 7. Общий вид электронной модели пиклотрона.