

42

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

П.Б.Лысянский, Б.М.Фомель

**РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
АМБИПОЛЯРНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ
ЛОВУШКИ "АМБАЛ-1"**

ПРЕПРИНТ ИЯФ 79 - 58

Новосибирск

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ АМБИПОЛЯРНОЙ
ПЛАЗМЕННОЙ ЛОВУШКИ "АМБАЛ-1"

П.Б.Лысянский, Б.М.Фомель

А Н Н О Т А Ц И Я

Разработана программа вычисления стационарного магнитного поля, создаваемого током в шинах прямоугольного сечения и произвольной геометрии. Программа использовалась в выборе конфигурации магнитного поля амбиполярной плазменной ловушки "АМБАЛ-1". Полученные данные положены в основу конструкторской разработки магнитной системы ловушки.

Установка "АМБАЛ-1" [1] состоит из трех пробкотронов: центрального и двух торцевых. Магнитное поле центрального пробкотрона создается токами двух основных соленоидов и одного корректирующего, поле каждого из торцевых пробкотронов — токами парн катушек типа "ИНЬ-ЯНЬ". Кроме того, имеется переходная система, предназначенная для согласования магнитных полей центрального и торцевых пробкотронов. Основные параметры магнитной системы следующие:

Поле в пробках (на оси)	24 кгс
Поле в центре торцевых пробкотронов	12 кгс
Поле в центре установки	2 кгс
Длина магнитной системы	6 м

I. ПРОГРАММА

Программа DIM3 вычисляет стационарное магнитное поле, создаваемое системой катушек произвольной геометрии. Предварительно обмотки с током должны быть аппроксимированы набором двух типов объемных элементов: прямоугольных и секторных (рис. I). Круглые соленоиды представляются набором соленоидов конечной длины с бесконечно тонкой обмоткой и эквивалентным током. Магнитное поле вычисляется в любой точке трехмерного пространства как сумма полей от всех элементов разбиения (прямоугольных и секторных) и полей соленоидов. Формулы для вычисления полей этих элементов приведены в работе [2].

Для удобства ввода в ЭВМ геометрии обмоток с током принята следующая система. Все обмотки представляются в виде набора катушек, которые могут соответствовать отдельным реальным обмоткам. Каждая катушка характеризуется шириной и толщиной токовой обмотки и плотностью тока.

Геометрия катушки вводится в произвольно выбранной собственной системе координат этой катушки. Затем начало этой системы координат может быть помещено в любую точку пространства, а

сама система повернута на заданный угол вокруг одной из своих осей (при необходимости, могут быть заданы несколько последовательных поворотов вокруг разных осей). В результате катушка оказывается на своем месте с нужной ориентацией.

Теперь рассмотрим подробнее ввод геометрии одной катушки. Узлы прямоугольного элемента нумеруются определенным образом (рис.1). Начальный (произвольно выбранный) прямоугольный элемент задается координатами узлов 1, 2 и 5. Каждый следующий прямоугольный элемент стыкован с предыдущим по ребру. В программу вводятся только номера узлов стыковочного ребра и координаты одного узла противоположного торца текущего элемента. Правила ввода показаны в следующей таблице.

Номера узлов стыковочного ребра	Номера узлов, координаты, которых нужно задать	
1 и 2	5	рис.1а
3 и 2	7	рис.1б
4 и 1; 4 и 3	8	рис.1в, г

Секторные элементы достраиваются программой между соседними прямоугольными (рис.1). После ввода геометрии катушки можно вычеркнуть из памяти любой введенный элемент. Кроме того, если катушка обладает одной или двумя плоскостями симметрии, достаточно ввести только геометрию половины или четверти обмотки.

На рис.2 изображена часть обмотки катушки типа "ИНЬ-ЯНЬ" из торцевого пробкотрона установки "АМБАЛ-1". Разбиение обмотки на элементы произведено указанным выше способом.

Если в магнитной системе имеются несколько одинаковых катушек, то нужно указать их количество, затем расставить по местам и задать токи по величине и направлению.

После ввода геометрии катушек, их размещения и ориентации программа готова к расчету магнитного поля в любой заданной точке лабораторной системы координат.

Знание магнитного поля позволяет вычислять другие характеристики магнитной системы. Специальные сегменты программы рассчитывают магнитные силы внутри шин с током, что необходимо для проведения конструкторских работ.

В программе предусмотрено вычисление продольного адиабатического инварианта, что необходимо для оценки поперечных потерь плазмы в аксиально-несимметричных ловушках [3].

Таким образом, программа DIM3 представляет пользователю следующие возможности:

- расчет и графический вывод магнитных силовых линий, а также значений модуля магнитного поля вдоль этих линий,
- расчет магнитных сил с учетом магнитных полей внутри шин с током:

$$\vec{F} = \iint J [d\vec{\ell} \cdot \vec{B}] dS \quad (1)$$

- расчет продольного адиабатического инварианта:

$$I = \int_{e_1}^{e_2} V_{||} dl = \sqrt{\frac{2}{m}} \int_{e_1}^{e_2} \sqrt{\mathcal{E} - \mu B} dl \quad (2)$$

где $V_{||}$ -- составляющая скорости частицы вдоль силовой линии,
 \mathcal{E} -- полная энергия частицы,
 μ -- магнитный момент.

Интегрирование ведется вдоль силовой линии между точками, где $V_{||} = 0$.

Разработка программы проводилась в соответствии с требованиями точности вычислений, удобства ввода новой геометрии и минимальности времени счета. При расчете магнитной системы всей установки "АМБАЛ-1" токовые шины разбивались, примерно, на 400 элементов. Время счета поля в одной точке ~ 5 сек. Ускорение счета почти на порядок достигается, если использовать аппроксимацию, при которой объемная шина с током заменяется бесконечно тонким проводником, идущим по центру шины с тем же током.

Тестирование программы проводилось сравнением как с аналитическими выражениями для простейших форм (соленоид, бесконечно длинный проводник), так и с измерениями на модели магнитной системы "АМБАЛа". Точность расчета пропорциональна количеству элементов разбиения обмотки. Было установлено такое разбиение на элементы, при котором точность счета магнитного поля была не хуже 1%.

2. РАЗРАБОТКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ АМБИПОЛЯРНОЙ ЛОВУШКИ

Расчет магнитной системы начинается с расчета магнитного поля торцевого пробкотрона. Причем, одновременно определением глубины "Магнитной ямы" по R и Z необходимо рассмотреть дрейфовые поверхности и подбором геометрии шин с током добиться минимальной зависимости формы дрейфовых поверхностей от pitch-угла. Это важное свойство пробкотрона, называемое "вложенностью" дрейфовых поверхностей, сильно влияет на поперечную диффузию электронов и возникновение вследствие этого радиального электрического поля во всей ловушке.

Подбором геометрии обмоток "ИНЬ-ЯНЬ" удалось минимизировать "невложенность" дрейфовых поверхностей. На рис.3 приведены сечения дрейфовых поверхностей плоскостью $Z = 0$ в первоначальном (а) и улучшенном (б) вариантах.

Магнитное поле центрального пробкотрона является аксиально-симметричным с возможностью удлинения однородной части (в реакторном варианте). Магнитная система состоит из двух основных соленоидов и одного корректирующего.

Для согласования магнитных потоков в центральном и торцевых пробкотронах была разработана переходная система. Поле крайнего пробкотрона содержит квадрупольную составляющую, которую нужно скомпенсировать при переходе в аксиально-симметричную область. Необходимо также обеспечить плавный спад модуля поля $|\vec{B}|$ вдоль каждой силовой линии от внутренней пробки торцевого пробкотрона к пробке центрального и далее -- к центру всей системы, без образования локальных "магнитных ям".

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Димов Основные параметры экспериментальной ловушки с амбиполярными пробками "АМБАЛ-1", Препринт ИЯФ 77-46, г.Новосибирск, 1977.
2. В.А.Дзюба, М.М.Карлинер, П.Б.Лысянский, Б.М.Фомель. Вычисление стационарных магнитных полей в системах с железом и без железа, Препринт ИЯФ 77-123, Новосибирск, 1977.
3. М.Е.Кишеневский, П.Б.Лысянский, Д.Д.Рятов, Г.В.Ступаков, Б.М.Фомель, Б.В.Чириков, Г.И.Шульженко. Поперечные потери частиц в аксиально-несимметричных магнитных ловушках. Доклад на УП Международной конференции по физике плазмы и УТС, Инсбрук, 1978.

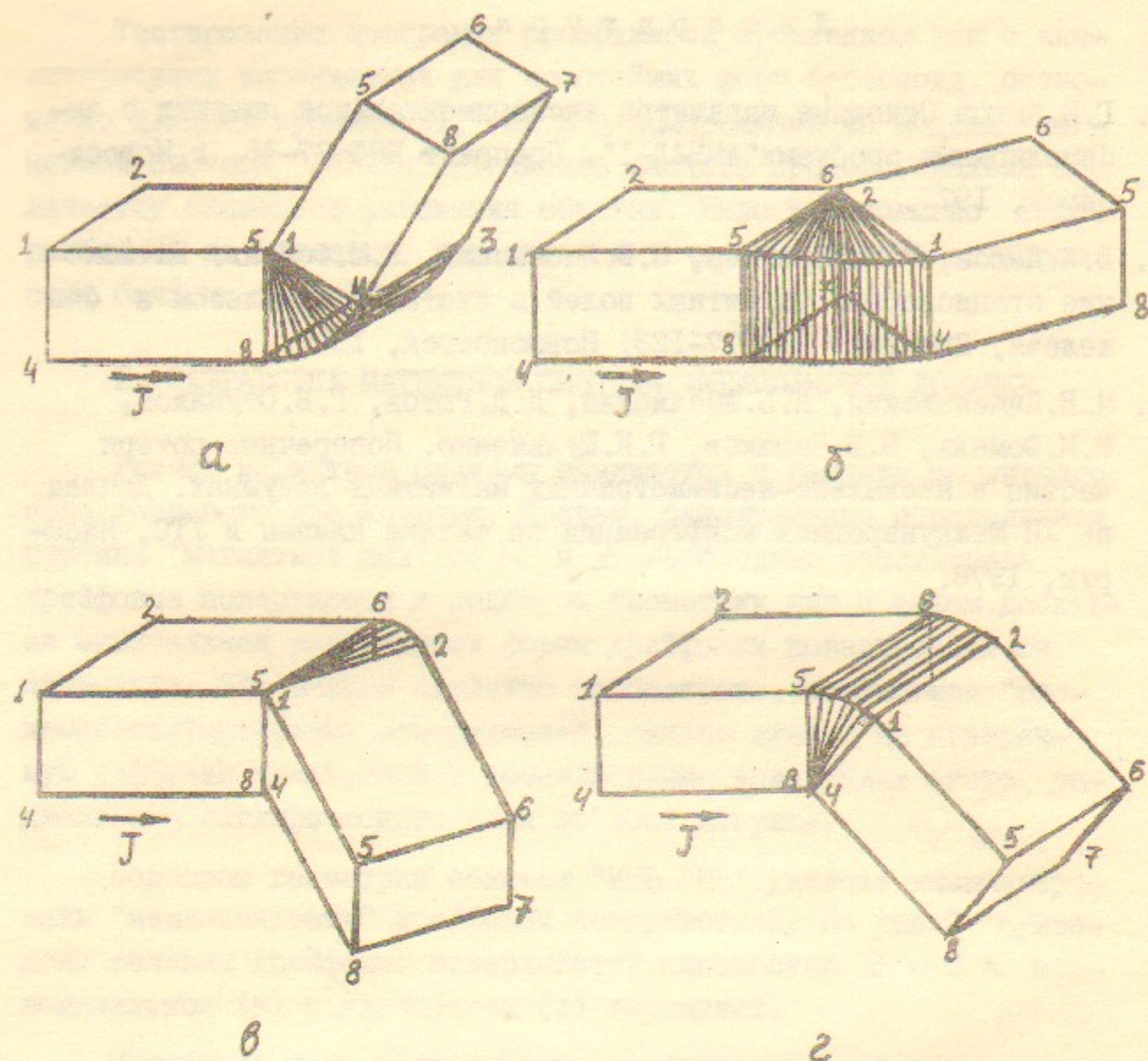


Рис. 1

Кроме того, переходная система должна обеспечить для каждой силовой линии следующие зависимости

$$R_T = K R_{\text{ц}} \quad (3)$$

$$\varphi_T = \varphi_{\text{ц}}$$

где $K = \text{const}$, R_T и φ_T — соответственно радиус и азимутальный угол в центре торцевого пробкотрона, $R_{\text{ц}}$ и $\varphi_{\text{ц}}$ — те же параметры в центре всей системы.

Разработка переходной системы — наиболее тонкая и сложная часть работы. Последовательными итерациями по геометрии и параметрам элементов было рассмотрено несколько десятков вариантов переходной системы. Отбор вариантов проводился по совокупности перечисленных выше требований.

Общий вид магнитной системы ловушки АМБАЛ-1 в окончательном варианте показан на рис. 4. Крайние пробкотроны образуются катушками типа ИНБ-ЯНБ с сечением $378 \times 135 \text{ мм}^2$. Центральная ловушка состоит из двух основных соленоидов с сечением $189 \times 54 \text{ мм}^2$ и центрального корректирующего витка с током до $\pm 40 \text{ кА}$. Каждая переходная система состоит из двух плоских прямоугольных катушек с сечением $216 \times 108 \text{ мм}^2$ и одной С-образной катушки с сечением $108 \times 54 \text{ мм}^2$. Кроме того, предусмотрена возможность установки двух корректирующих октаполюсных обмоток в области центрального пробкотрона для компенсации небольшой октаполюсной составляющей магнитного поля.

На рис. 5 изображена магнитная поверхность в системе "АМБАЛ-1" и график $|\vec{B}|$ вдоль осевой силовой линии. Сечения магнитной поверхности на разных расстояниях от центра системы показаны на рис. 6.

Магнитная система обеспечивает удовлетворительное согласование дрейфовых поверхностей частиц центрального пробкотрона с дрейфовыми поверхностями частиц в торцевых пробкотронах. Магнитное поле торцевого пробкотрона при учете поля остальной части магнитной системы теряет симметрию. При этом сечение дрейфовых поверхностей имеет вид, изображенный на рис. 7 (K — эффективное пробочное отношение). В дальнейшем предполагается исследовать возможность уменьшения эллиптичности дрейфовых поверхностей торцевого пробкотрона.

В работе принимал участие студент М.А.Тиунов.
Постановка задачи и руководство разработкой магнитной системы осуществлялись Г.И.Димовым.

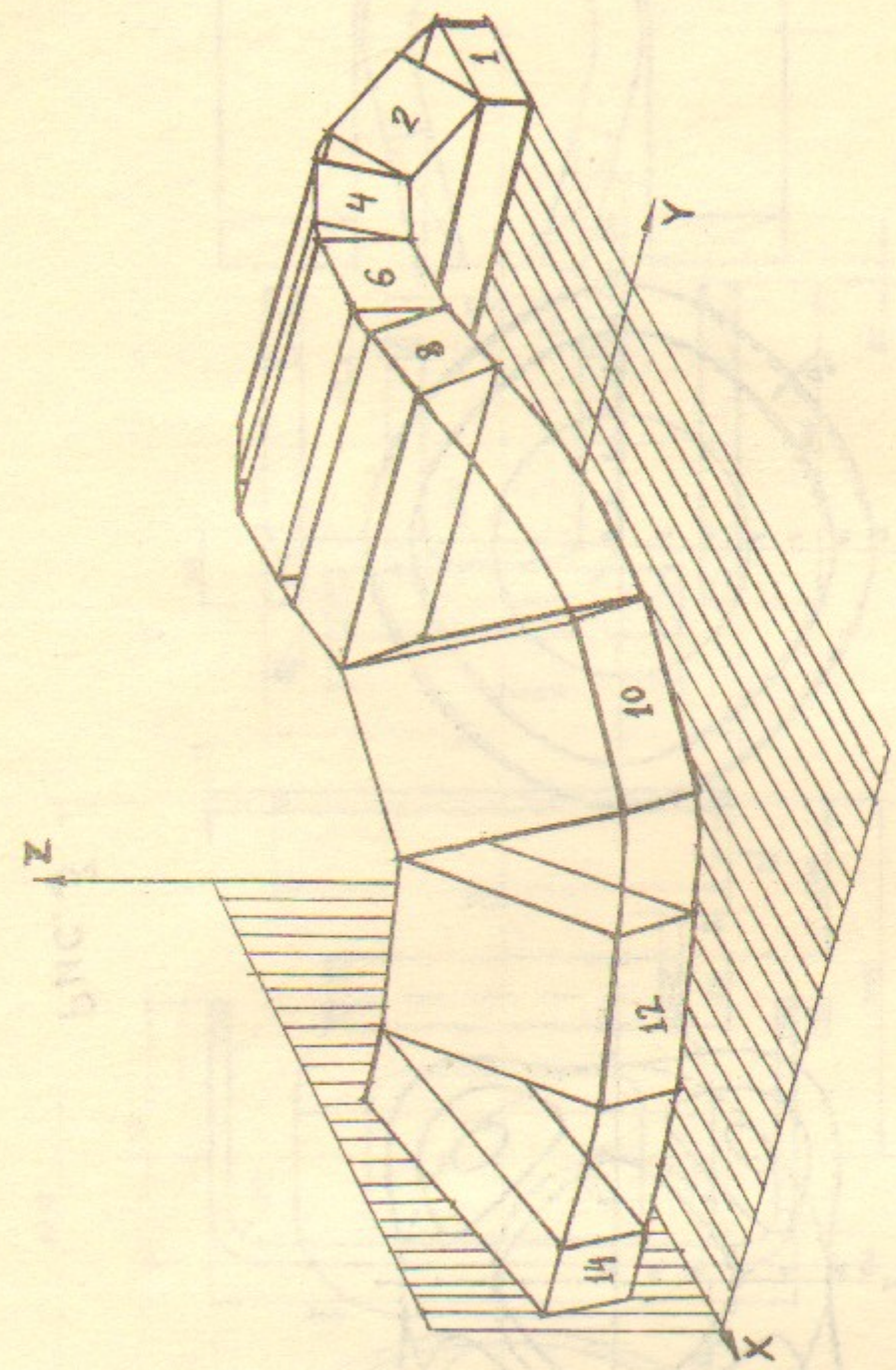


Рис. 2

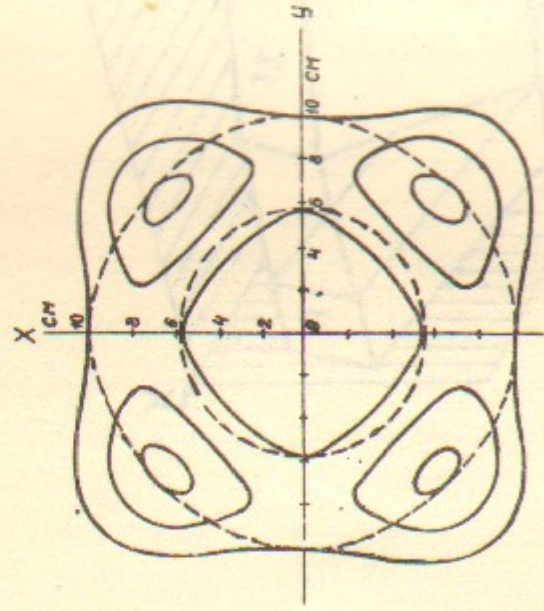
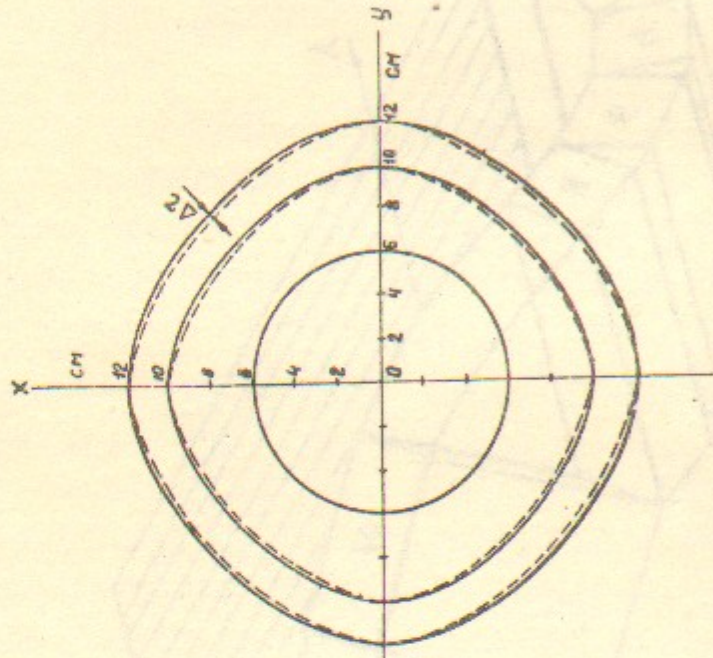


Рис. 3

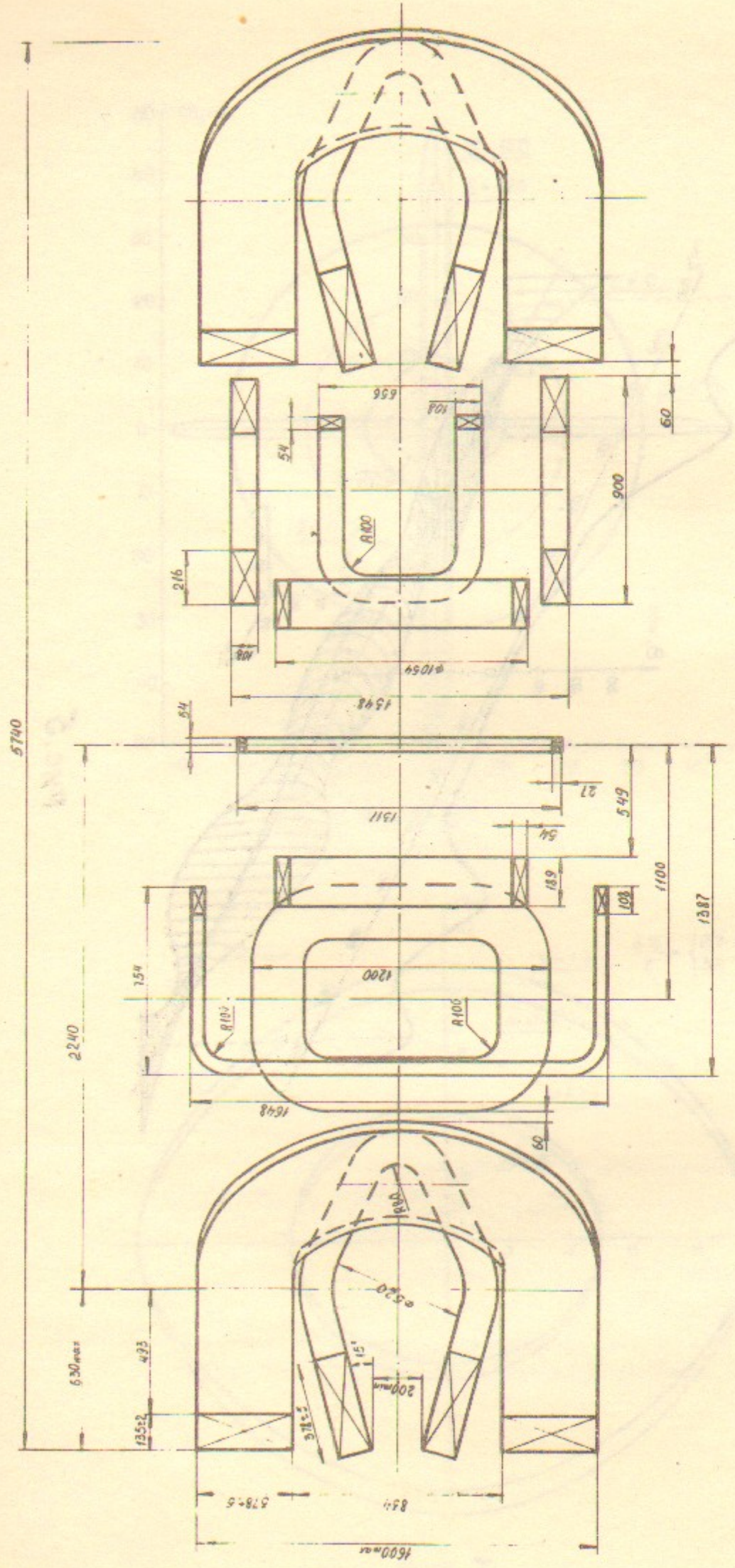


Рис. 4

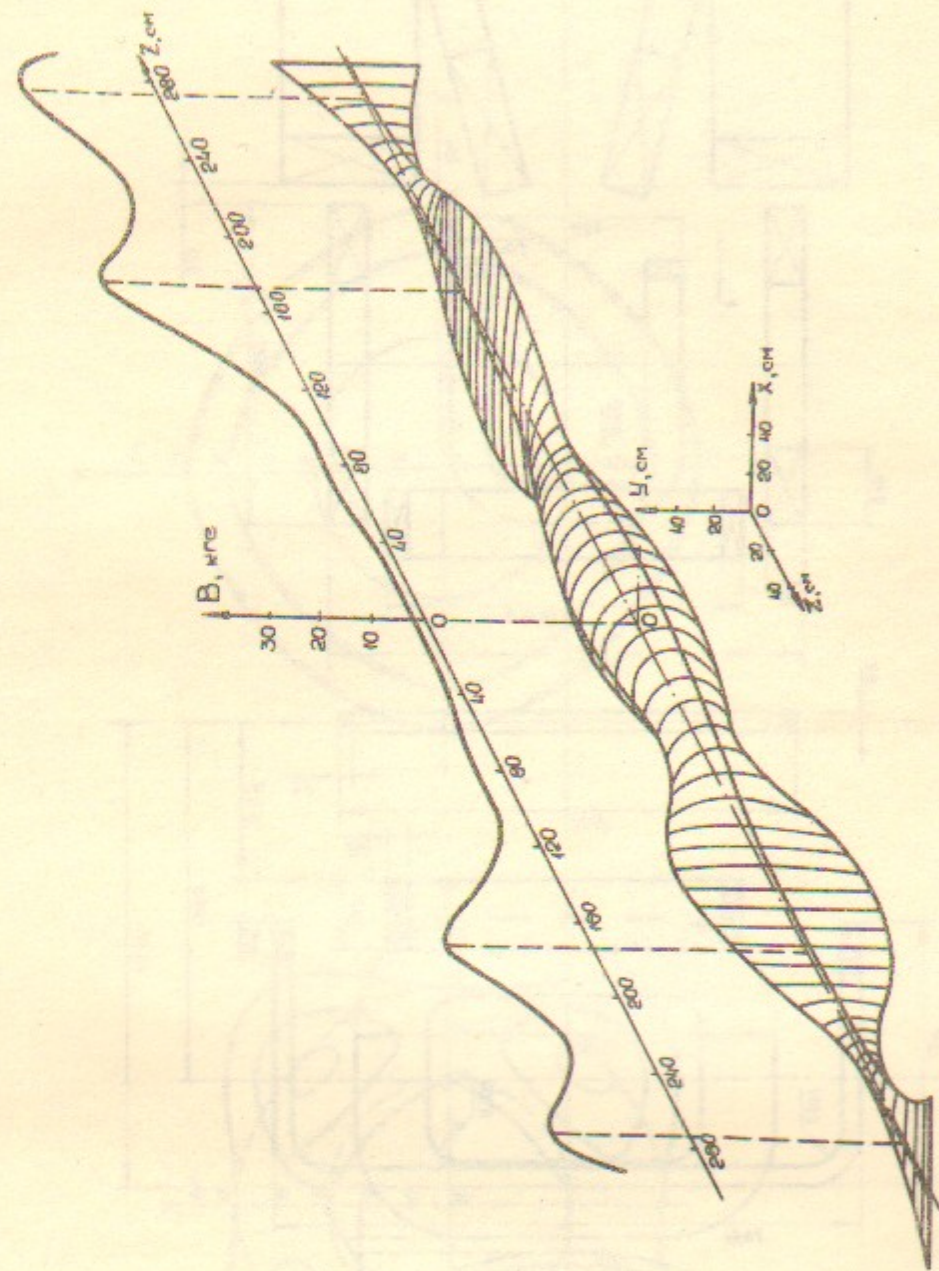


Рис. 5

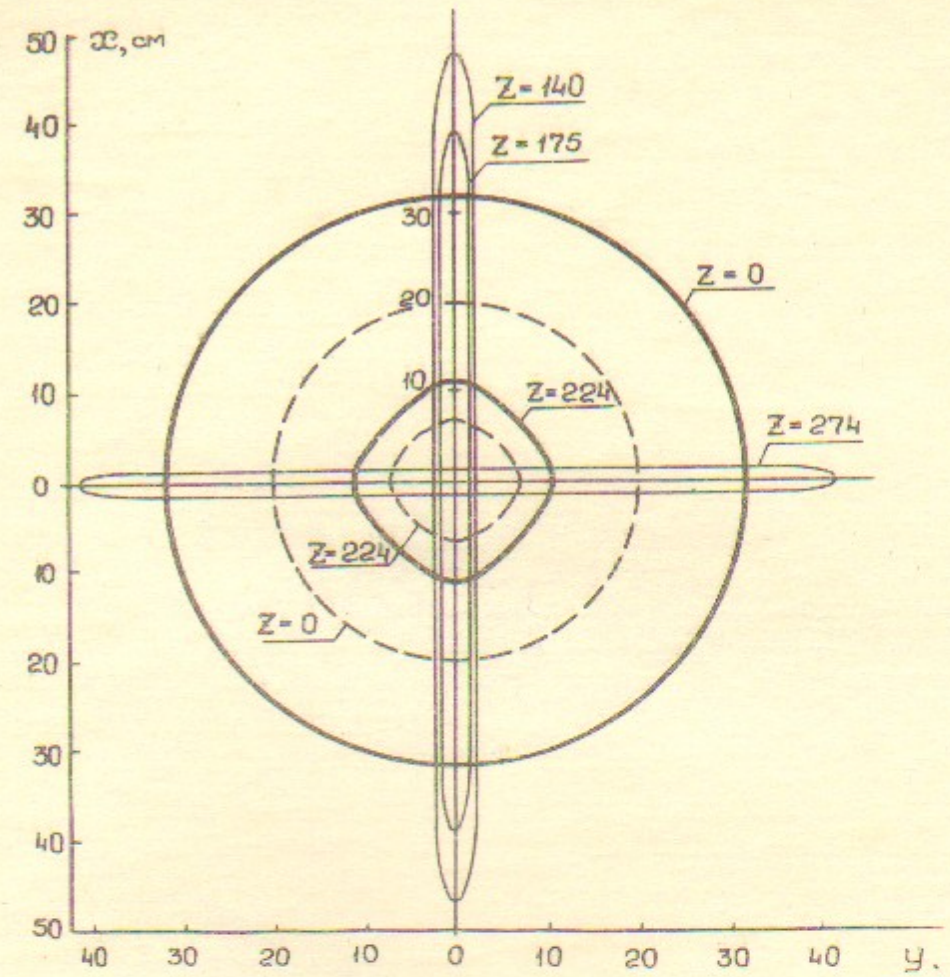


Рис. 6

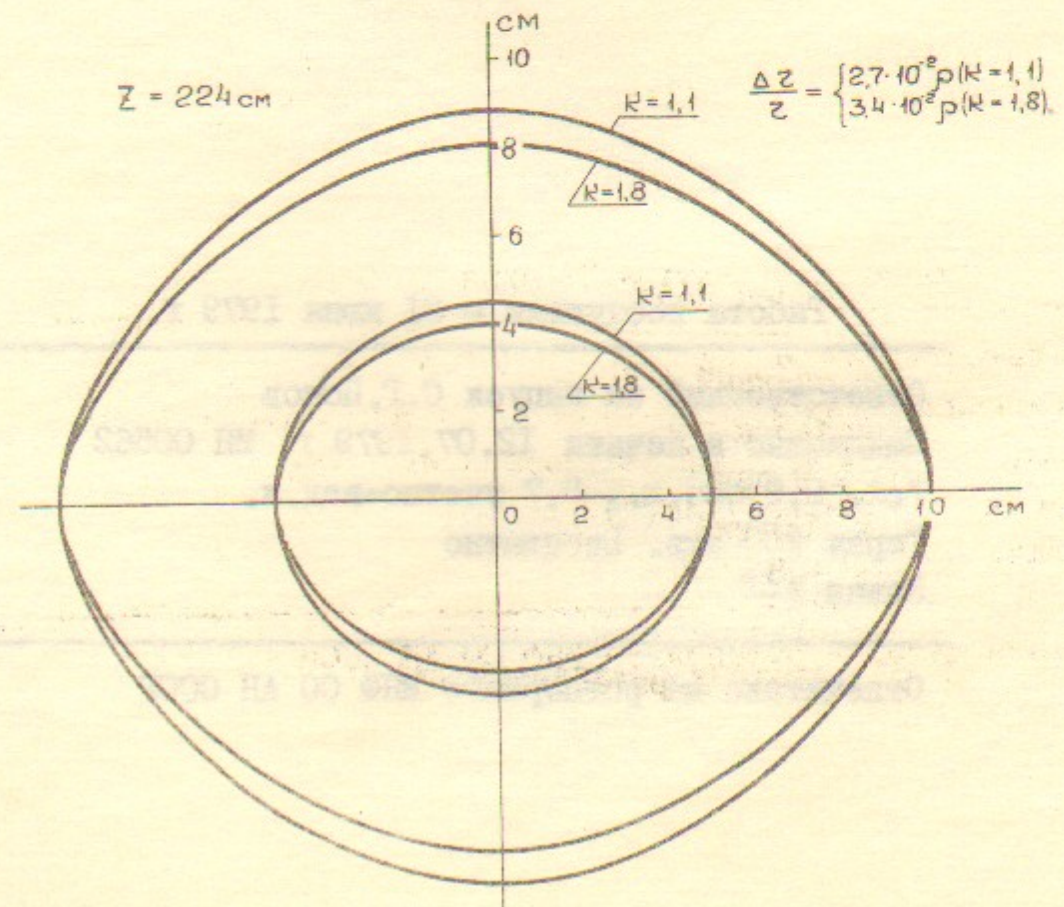


Рис. 7