

НИИЭФА - В - - 0764.

НИИЭФА В-0764

научно-исследовательский институт электрофизической
аппаратуры им. Д. В. Ефремова

А. М. Астапкович, В. И. Васильев, В. А. Глухих, С. В. Лусев,
И. И. Дойников, А. С. Дружинин, Г. Р. Заблоская, И. В. Кирричев,
В. М. Комаров, М. М. Кривченков, В. Г. Кучинский, В. А. Лавкин,
В. А. Марчионов, Р. И. Литуновский, А. А. Малков, И. А. Мосозон,
В. И. Одинцов, А. Г. Роталь, И. М. Ройфе, В. В. Середенко,
В. Ф. Сойкин, Ф. М. Спесивова, И. В. Спирченко, С. М. Сычевский,
С. Г. Филатов, В. А. Чуянов

КОМПАКТНЫЙ ТОКАМАК
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО
ГОРЕНИЯ

П р е п р и н т

Астапкович А.м., Васильев в.и., Глухих В.А. и др.
Компактный токамак для исследования термоядерного горения:
препринт В-0764. - м.: Физатоминформ, 1987, 38 с., с ил.,
цена 30 с.

Приводятся результаты предварительного рассмотрения компактного токамака с сильным магнитным полем, предназначенного для достижения и исследования термоядерного горения.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

1. Основные параметры установки .
2. Энергетические характеристики обмотки тороидального поля .
3. Система полоидального поля .
4. Система ВЧ-нагрева .
5. Конструктивная схема ЭМС .
6. Разрядная камера .
7. Система управления полоидальными полями .
8. Система электропитания .
9. Напряженно-деформированное состояние и прочность ЭМС .
10. Прочность и устойчивость разрядной камеры .

С центральным научно-исследовательским институтом информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (Физатоминформ), 1987 г.

I. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВКИ

После достижения условий "break-even" ($Q \geq 1$) на установках TFTR и JET следующим шагом исследований на токамаках несомненно будет получение и изучение термоядерного горения. Возможны два пути развития в этом направлении: исследование зажигания и горения на первой фазе работы токамака-реактора типа INTOR, предназначенного для решения широкого класса как физических, так и технологических задач, возникающих при создании термоядерного реактора, или создание специализированной установки типа, пропагандировавшегося В.Коппи "игнитрона" или CIT. Оба подхода имеют свои сильные и слабые стороны.

В настоящее время еще нет полной уверенности в том, какими законами подобия будет описываться горящая термоядерная плазма (см.табл.1.1). Однако все разумные экстраполяции от сегодняшних экспериментальных установок к режиму горения показывают, что в наших руках есть только один действительно сильный параметр, позволяющий резко уменьшить масштабы эксперимента и создать компактный токамак с зажиганием - это магнитное поле.

Как видно из рис.1.1 (эти зависимости получены для скейлинга Мухоматова-Мережкина, но являются достаточно универсальными) компактная установка требует магнитных полей $B_T \geq 10$ тесла.

Большие магнитные поля предъявляют жесткие требования к прочности материалов обмотки (см.рис.1.2) и заставляют использовать высокопрочные бронзы или композитные материалы (медь-сталь, бронза-сталь). Большие плотности тока однозначно приводят к необходимости работать с азотноохлаждаемыми обмотками (см.рис.1.3).

При этом, однако, длительность импульса ограничивается теплоемкостью обмотки.

В установке CIT для преодоления этой трудности предполагает-

ся создавать и нагревать плазму на стадии роста тороидального поля.

В рассмотренном ранее варианте компактного токамака с адиабатическим сжатием, о котором докладывалось на совещании в США в 1980 г., была сделана попытка обойти эту трудность за счет формирования и нагрева плазмы в относительно слабом магнитном поле (при малом нагреве обмоток) с последующим адиабатическим сжатием плазмы нарастающим тороидальным полем.

Хотя проведенная техническая проработка показала реализуемость данного варианта на базе импульсной техники, создаваемой для токамака TCU, тем не менее крайняя компактность установки в сочетании с адиабатическим сжатием делали рассмотренный вариант весьма сложным и недостаточно надежным, а ожидаемая длительность импульса оставалась слишком малой для надежного исследования термоядерного горения и связанных с ним эффектов.

Решить возникающие проблемы можно, резко уменьшив крутизну токамака, перейдя от аспектовых отношений $A = 2,5 + 3$ к аспектовым отношениям $A = 5$. Масштаб эксперимента при этом, несомненно, возрастает, однако возрастает и его ценность.

Во-первых, он становится ближе к ожидаемым параметрам термоядерного реактора токамака, где наличие blankets делает достижение малых аспектовых отношений сомнительным.

Во-вторых, увеличивается отношение длительности импульса к характерному времени термоядерного выгорания ($\tau_{\text{выг}} = \frac{2}{n \langle \sigma v \rangle}$), что позволяет осуществить эксперименты с существенным выгоранием топлива (см. рис. I.4), накоплением гелия и изменением профиля тока под действием нагрева α -частицами (см. рис. I.5).

Исходя из сказанного, был рассмотрен вариант компактного токамака с зажиганием со следующими параметрами: Аспективное отношение плазменного шнура $A = 5$. Большой радиус плазменного шнура

$R = 2,2$ м. малый радиус соответственно $a_{пл} = 0,44$ м. Дивертор - полоидальный, двухнулевой. Вытянутость по вертикали (до особой точки) $K = 1,7$, $\hat{b} = Ka_{пл} = 0,75$ м. Ток в плазменном шнуре $I_{пл} = 3,8$ мА ($q_{\psi} = 2,4$, $q_{цикл} = 2$). Плотность плазмы в режиме горения: средняя - $0,8 \cdot 10^{14}$ см⁻³, на оси - $1,5 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Температура на оси 10 кэВ, соответственно $\bar{\beta} = 2,15 \pm 3\%$, на оси $\beta_0 = 7,5 \pm 10\%$ ($\bar{\beta} = 2,5 \pm 3,5\% I_{пл} / (a_{пл} B_T)$). Запас по зажиганию $C_{ig} = 1-2$ (по Мерешкину-Муховатову в зависимости от β). Нагрев до зажигания с помощью ИЦР на малой добавке He³, $f = 104$ МГц, $P_{сч} = 12$ мВт, длительность нагрева 3-5 секунд.

В режиме горения мощность нейтронного излучения 140 ± 270 мВт, мощность в α -частицах 28-56 мВт, тормозные потери 7-14 мВт. Длительность выгорания $\tau_{He^{10\%}} \approx 20$ сек. Длительность импульса горения - до 30 сек.

Предполагаемый сценарий импульса показан на рис.1.6. Ток вводится в два приема:

$$\begin{array}{ll} \text{до } I_{пл} \approx 0,5 \text{ мА} & \dot{I}_{пл} = 5 \cdot 10^6 \text{ А/с}, \\ \text{при } I_{пл} > 0,5 \text{ мА} & \dot{I}_{пл} = 10^6 \text{ А/с}. \end{array}$$

Напряжение пробоя 25-50 В. Начальная плотность $1,5-2 \cdot 10^{13}$ см⁻³. С ростом тока плотность увеличивается газонапуском до $0,8-1,5 \cdot 10^{14}$ см⁻³, а во время дополнительного нагрева - инъекцией 6-8 таблеток до $6-8 \times 10^{14}$ см⁻³. Во время горения плотность регулируется вблизи порога зажигания непрерывным поддержанием дополнительного нагрева на уровне 2-3 мВт. При окончании импульса ток в шнуре уменьшается со скоростью $5 \cdot 10^6$ А/сек. Для ускорения вывода возможно применение дополнительной инъекции примесей.

В настоящей работе приводятся результаты предварительного рассмотрения некоторых основных элементов установки: магнитной системы и системы электропитания, разрядной камеры, системы ВЧ-на-

грева, системы управления.

Таблица I.I

Скейлинги для глобального энергетического времени

Единицы измерений: средняя плотность в 10^{14} см^{-3} , поле В - в тесла, масса ионов m - в атомных единицах массы, средняя температура T - в кэВ, мощность дополнительного нагрева P - в мВт, ток I - в мА, размеры - в метрах.

Скейлинг	Формула	τ_E	Примечание
Неоалкатронный	$0,071 n a R Q^{1/2} M^{1/2}$	2 сек	Справедливы только для омического нагрева
Шейфер-Вальтц	$0,14 n a^{0,5} R^{0,08} K^{1,63} Z^{1/2} Q^{0,25}$	1,400 сек	
Мухоматов-Шережкин	$0,014 n T^{-1/2} Q^{0,25} R^{2,75} Q M^{0,5}$	0,93 сек	С учетом тормозного излучения $\tau_E = 0,0$ сек
ЦДХ - Л	$0,010 I K^{1/2} a^{-0,37} R^{1,75} M^{1/2}$	0,675 сек	В эти скейлинги входит ток и не входит плотность, тем не менее они хорошо согласуются со скейлингом Мухоматова-Шережкина
Горбунов, Мирнов, Стрелков	$0,39 \cdot I \cdot a \cdot M^{1/2}$	1 сек	
Проект ТФСХ	$0,45 I a K^{1/2} \exp(-\beta^2 / \beta_{crit}^2)$	0,0 сек	
Асдекс - X	$0,065 \cdot I \cdot R M^{0,5}$	0,86 сек	
Асдекс - Л	$0,033 B^{-0,11} P^{-0,55} I n^{-0,11}$	0,12 сек	В эти скейлинги в качестве мощности нагрева подставлялась мощность энерговыделения с альфа-частицами (она в 2 раза больше мощности ВЧ-нагрева).
Голдстон	$0,033 P^{0,5} I K^{0,5} a^{-0,37} R^{1,75} M^{0,5}$	0,26 сек	
Кайе и Голдстон	$0,055 B^{-0,09} P^{-0,58} I^{0,26} K^{0,28} a^{-0,49} R^{1,65} M^{1/2}$	0,57 сек	
СТТ	$0,12 P^{-0,72} I^{1,44} n^{0,28} a^{-0,16} R^{1,44} M^{1/2}$	0,72 сек	
Шеркинс	$0,13 B^{-0,1} P^{-0,6} I^{0,9} n^{0,6} a^{0,4} R^{1,7} M^{0,5}$	0,65 сек	

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОТКИ ТОРОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ

Для токамаков с сильным магнитным полем одной из основных проблем является большая электрическая мощность, потребляемая обмоткой тороидального поля (ОТП). Для её уменьшения, а также для улучшения механических свойств ОТП, целесообразно использовать катушки биттеровского типа, захлаживаемые перед импульсом жидким азотом (геометрия катушек показана на рис.5.1-5.2). Расчет энергетических характеристик ОТП проводился путем решения задачи диффузии магнитного поля в проводник ОТП, при этом определялись: энергия тороидального магнитного поля, потребляемая ОТП мощность и энергия в процессе импульса, тепловой режим ОТП. При расчете учитывались температурные зависимости тепло- и электрофизических характеристик проводника, пространственное распределение плотности нейтронного энерговыделения в объеме ОТП. Удельное сопротивление проводника бралось в виде

$$\rho = 0,58 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0144 \cdot \Delta T) \text{ ом}\cdot\text{м}.$$

Результаты расчетов можно суммировать следующим образом:

1. Для бронзовой ОТП толщиной 0,7 м с учетом коэффициента заполнения 0,8 при поле на оси плазмы $B_T = 10$ Тл средняя мощность активных потерь на площадке импульса составляет 230 МВт, потребляемая энергия - 8,2 ГДж. Зависимости мощности, энергопотребления и максимальной температуры ОТП от времени представлены на рис.2.1. На рис.2.2 + 2.4 показаны распределения плотности тока и температуры по сечению витка ОТП в разные моменты времени.

2. Учет нейтронного энерговыделения с суммарной мощностью 100 МВт в течение 20 с (плотность потока на внутреннем обводе ОТП - 2 МВт/м², на внешнем - 0,8 МВт/м²) приводит к дополнительному нагреву проводника с 220° до 250° и увеличению энергопотреб-

ления на 150 мДж.

3. В случае теплого варианта ОТП уровень потребляемой мощности возрастает примерно в 2 раза.

4. Некоторое снижение максимального перегрева и суммарного энергопотребления ОТП возможно за счет применения проводников с более высокой проводимостью.

3. СИСТЕМА ПОЛОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ

Конфигурация катушек системы полоидального поля показана на рис.3.1, а их координаты и размеры приведены в табл.3.1. Катушки I + IO соединены последовательно и образуют центральный соленоид, или обмотку индуктора O_{II} . Катушки II и I4 (OB1 и OB2) служат для формирования диверторной конфигурации, I2 и I3 (OD1 и OD2) – для равновесия шнура. Форма центрального соленоида выбиралась исходя из требований минимизации магнитного поля рассеяния в камере в момент пробоя.

Сценарий разряда показан на рис.3.2, на рис.3.3 приведена конфигурация полоидального поля на стадии горения. В табл.3.2 представлены общие параметры, описывающие сценарий разряда и режим работы системы полоидального поля, в табл.3.3 – значения магнитного поля в центральном соленоиде.

Таблица 3.1

Координаты центров и размеры катушек системы
полоидального поля

	№	R_i	Z_i	ΔR_i	ΔZ_i
		м	м	м	м
ОИ	1	0,8	-1,5	0,6	0,2
	2	0,72	-1,27	0,45	0,27
	3	0,67	-0,96	0,35	0,34
	4	0,65	-0,6	0,3	0,4
	5	0,65	-0,2	0,3	0,4
	6	0,65	0,2	0,3	0,4
	7	0,65	0,6	0,3	0,4
	8	0,67	0,96	0,35	0,34
	9	0,72	1,27	0,45	0,27
	10	0,8	1,5	0,6	0,2
ОВ1	11	2,1	2,2	0,8	0,5
ОД1	12	4,0	1,1	0,6	0,4
ОД2	13	4,0	-1,1	0,6	0,4
ОВ2	14	2,1	-2,2	0,8	0,5

Таблица 3.2

параметры, характеризующие режим работы системы полоидального поля:

$I_{ил}$ - ток плазмы, β_I - полоидальная бета, $L_{ил}$ - самоиндукция плазмы, $\Psi_{ил}$, $\Psi_{акт}$ - индуктивные и активные вольт-секунды плазмы, $\Psi_{инд}$, $\Psi_{равн}$ - потокоцепления индукторных и равновесных составляющих токов с плазмой, W - энергия полоидального магнитного поля, I - полный ток в катушках.

t, с		0,0	0,1	3,4	8,4	18,4	23,4	28,4
		Параметр						
$I_{ил}$	мА	0,0	0,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
β_I	-	0,0	0,0	0,2	1,0	1,0	1,0	1,0
$L_{ил}$	мГн	-	5,310	5,341	5,471	5,471	5,471	5,471
$\Psi_{ил}$	В.с	-	2,058	20,2	20,79	20,79	20,79	20,79
$\Psi_{акт}$	В.с	0,0	0,828	5,296	13,278	16,112	17,529	18,946
$\Psi_{инд}$	В.с	20,0	18,67	9,901	2,845	0,011	-1,400	-2,823
$\Psi_{равн}$	В.с	-	-2,158	-16,49	-16,91	-16,91	-16,91	-16,91
W	мДж	38,70	338,6	354,8	463,9	526,5	554,7	608,1
$I_{1,10}$	мк	4,042	3,631	-1,434	-2,718	-3,343	-3,650	-3,97
$I_{4,14}$	мА	1,7	2,465	6,26	5,789	5,52	5,387	5,256
$I_{12,13}$	мА	0,39	-0,139	-3,25	-3,69	-3,737	-3,76	-3,785

Таблица 3.3

Составляющие магнитного поля на внутренней поверхности цилиндрического электрода в точках, отмеченных на рис.3.1 (в эдс-единицах).

$t, \text{с}$	0,0		18,4		23,4		∞, ∞	
$\#$ \ / $B, \text{Гс}$	B_r	B_z	B_r	B_z	B_r	B_z	B_r	B_z
1	-0,11	11,80	2,92	-8,01	3,18	-8,92	0,19	-10,01
2	-1,28	13,8	1,17	-9,74	1,27	-10,3	1,37	-11,33
3	-0,11	14,04	0,17	-10,0	0,18	-11,14	0,19	-12,20
4	0,304	13,3	-0,21	-9,53	-0,24	-10,53	-0,20	-11,35
5	0,08	13,0	-0,06	-9,3	-0,07	-10,29	-0,07	-11,3
6	-0,08	13,0	0,06	-9,3	0,07	-10,29	0,07	-11,3
7	-0,304	13,3	0,21	-9,53	0,24	-10,53	0,20	-11,35
8	0,11	14,04	-0,17	-10,0	-0,18	-11,14	-0,19	-12,20
9	1,28	13,8	-1,17	-9,74	-1,27	-10,3	-1,37	-11,33
10	3,4	11,80	-2,92	-8,01	-3,18	-8,92	-0,19	-10,01

4. СИСТЕМА ВЧ-НАГРЕВА

Принята схема циклотронного нагрева малой добавки дважды ионизованного гелия (${}^3\text{He}^{++}$), передающего за счет торможения свою энергию основным ионам плазмы. Рабочая частота ~ 100 мд'ц. Для ввода 12 МВт ВЧ-мощности применено восемь антенн, расположенных с внешней стороны тора в районе вакуумной стенки камеры. При этом возможно несколько вариантов компоновки – равномерного расположения по всему периметру или на половине его.

Конструкция антенн выбиралась с учетом необходимости установки и замены антенн без разборки всего токамака.

В этом случае излучающая поверхность антенн и соответственно плотность мощности излучения определяется площадью сечения горизонтального патрубка, через который антенна вводится в разрядную камеру. Для токамака с сильным полем из-за малой ширины патрубка плотность мощности излучения может составлять не менее 10 МВт/м^2 при ВЧ-мощности $\sim 1,5 \text{ МВт}$, вводимой через один патрубок.

В рассмотренной конструкции петлевая антенна для увеличения связи с плазмой выдвигается за стенку камеры и находится в тени диверторного слоя, толщина которого от ребер жесткости вакуумной камеры до края плазмы в экваториальной плоскости составляет около 200 мм. В качестве возможных конструкций антенн рассматривались два варианта модулей: 1) две антенны длиной $3/4 \lambda$, 2) две полуволновые антенны. В первом варианте антенны для уменьшения волнового сопротивления, пространство между петлями и основанием заполнено емкостными разрядными элементами. Возбуждение антенны осуществляется с помощью двух коаксиальных фидеров с волновым сопротивлением $\sim 50 \text{ Ом}$, включенных противофазно.

На рис.4.1 приведен вариант конструкции системы ввода

в4-мощности с двумя полуволновыми антеннами. Здесь применена однородная линия без дополнительных элементов в пространстве между петлей (1) и подложкой (2). Каждая петля запитывается двумя коаксиальными фидерами(3).

Несмотря на несколько большее сопротивление излучения по сравнению с первым вариантом антенны из-за большего волнового сопротивления, напряжение на антенне должно достигать 50 кВ в пучности. Возрастает также плотность мощности излучения.

5. КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА ЭМС

Электромагнитная система (ЭМС) установки состоит из ОТИ и обмотки полоидального поля, все катушки которой расположены снаружи ОТИ. Общий вид установки показан на рис.5.1 + 5.2, параметры ЭМС приведены в табл.5.1.

ОТИ состоит из 320 однослойных неразъемных витков битернового типа, конструктивно сгруппированных в 16 блоков. Витки не имеют разъемов, поскольку имеется возможность сборки вакуумной камеры и ЭМС без них, что существенно упрощает конструкцию установки и делает её существенно более технологичной. Принимаемое количество витков является практически максимально возможным и определяется, в основном, условием обеспечения качества изготовления и приемлемой технологичности. Величина тока в каждом витке 344 А, максимальная плотность тока (при равномерном распределении) $30 \cdot 10^6$ А/м², а материал витка - термообработанная хромистая бронза, напряжение по обходу тора достигает 3,8 кВ. В качестве электрической изоляции предполагается использовать полиимиды, композиции из слюды.

При номинальной величине тороидального поля магнитное поле

на поверхности обмотки достигает $\sim 14,0$ Тл, а максимальная величина опровидывающего момента составляет $\sim 0,0 \cdot 10^4$ н.м. для обеспечения удовлетворительной работоспособности и требуемого режима установки при действующих электромагнитных нагрузках каждый блок ОИ наиболее целесообразно полностью заключить в стальной корпус с переменной толщиной стенок по обходу блока, а на периферии по обходу тора вверху и внизу скрепить силовыми кольцами. Максимальные напряжения при этом в материале витка достигает ~ 300 мПа, а в материале корпуса ~ 300 мПа. Геометрическая прозрачность ОИ на внутреннем обходе составляет 50% . При этом пофигурная торoidalная поля в центре плазмы достигает $0,4\%$, на краях $\sim 2,4\%$ (см. рис. 1.11). Для катушек использовать ферромагнитные стали, то пофигурная практически не меняется (расчет проводится методом конечных элементов, две характерные проекции обхода показаны на рис. 0.13).

Для организации азотного охлаждения предусматриваются каналы в каждой витке по всему его обходу с сечением $\sim 1\%$ от сечения витка. Это позволит осуществлять первоначальное захолаживание ОИ за 0 секунд, а в процессе работы (между рабочими импульсами) за 10 часов. Температурный диапазон работы ОИ, с учетом тепловыделения от нейтронов, находится в пределах от 77°K до 350°K . Средняя мощность питания при этом составляет 250 мВт. После захолаживания перед пуском установки азот из каналов удаляется. Теплоизоляция установки обеспечивается за счет общего защитного кожуха, окружающего ЭИС со всех сторон, собранного из отдельных блоков толщиной $0,3 + 0,4$ м с уплотнением стыков между ними. Внутри кожуха подается холодный азот с избыточным давлением масштаба $0,01$ мПа.

Создание системы ОИИ, состоящей из 5 типов катушек, не вызывает больших трудностей, за исключением центрального соленоида, магнитное поле в котором достигает $14,0$ Тл. Токи в катушках на-

ходятся в диапазоне от 50 до 90 кА, при напряжении до 10 кВ. Температурный диапазон работы лежит в пределах от 80 К до 240 К. Центральный соленоид предполагается выполнить из хромистой бронзы. механические напряжения в нем достигают 250 мПа. Остальные катушки могут быть выполнены из алюминия, механические напряжения в них достигают 40 + 50 мПа.

Сборку ЭМС с вакуумной камерой можно провести по следующей схеме. модули вакуумной камеры свариваются между собой изнутри с одновременным сдвиганием на них блоков ОПН. при образовании тора для сварки заключительного шва доступ сварщика к нему обеспечивается через горизонтальный патрубок, после чего устанавливаются блоки ОПН. такая схема сборки предопределяет наличие специально-технологического оборудования для операций ремонта в аварийных ситуациях.

Технические параметры ЭМС

Количество витков ОПН	320
Ток в витке ОПН, кА	344
напряжение на обмотке ОПН, кВ	3
перегрев обмотки ОПН за импульс, °	250
Средняя плотность тока в витке, А/м ²	30·10 ⁶
магнитное поле ОПН на оси плазмы (B_0), Тл	10
максимальное магнитное поле ОПН, Тл	14,5
максимальное механическое напряжение в витке ОПН, мПа	300
максимальное механическое напряжение в корпусе блока ОПН, мПа	800
Ток в витках ОПН, кА	56...90
максимальное напряжение на обмотках ОПН, кВ	10
магнитное поле в центральном индукторе, Тл	14,5

механическое напряжение в центральном индукторе, мПа ...	250
Вес бронзы (УП), т	340
Вес ОПЦ, т	100
Вес металлоконструкции ЭМС, т.....	350
Габариты ЭМС, м	ϕ 11x8
Общий вес ЭМС, т	800

6. РАЗРЯДНАЯ КАМЕРА

В качестве основных силовых нагрузок на камеру рассматривалось атмосферное давление и те ponderomotorные силы, которые возникают при срыве тока плазмы.

Максимально допустимая толщина стенки гладкой однородной металлической камеры, приемлемая с точки зрения электрического сопротивления, ограничена величиной (6-10) мм. При заданных геометрических размерах (см.рис.6.1) указанная толщина не обеспечивает требуемой несущей способности даже по отношению к атмосферному давлению. В связи с этим были рассмотрены следующие технические решения. Одно из них использует секционированную структуру, когда силовые секции чередуются с резистивными элементами в виде сильфонов. Силовые секции, выполненные в виде оребренных обечаек толщиной 20 мм, могут обеспечивать прогиб в пределах 1 мм при максимальных изгибных напряжениях около 200 мПа . Требуемые при этом сильфоны, соединяющие секции между собой, должны иметь толщину стенки около 2 мм при высоте гофров 80 мм. Очевидно, что сильфоны заданной формы и геометрических размеров являются наименее надежными и наиболее трудоемкими в изготовлении элементами камеры.

В качестве другого решения была рассмотрена двухслойная обо-

лочка, замкнутая по жесткости в тороидальном направлении, в которой внутренние и наружные слои толщиной $(2 + 3)$ мм разнесены на $(4 + 5)$ см и соединены между собой заполнителем в виде решетки. максимальный прогиб в двухслойной оболочке при действии атмосферы менее 1 мм, по максимальным напряжениям существует $(2-3)$ -х кратный запас по отношению к пределу текучести материала типа нержавеющей стали. Для оценки уровня пондеромоторных сил рассматривался при неподвижном положении шнура линейный спад тока плазмы от 3,8 МА до нуля со скоростью 1 мк/мс. При этом в азимутально-однородной камере сопротивлением 0,3 мом индуцированный тороидальный ток достигает 2,8 мА, а пондеромоторные силы обжимают камеру в экваториальной плоскости и растягивают ее вдоль большого поперечного сечения, при времени их воздействия на камеру в течение 10-15 мс достигая $(5-6)$ -кратного увеличения по отношению к атмосферному давлению.

В азимутально-секционированной камере с силовыми и сильфонными секциями пондеромоторные силы, обусловленные взаимодействием индуцированного тороидального тока с полоидальными полями ниже на 30% сил аналогичного происхождения в азимутально-однородной камере. В то же время появление седловых токов, взаимодействующих с высоким тороидальным полем, приводит к скручиванию и опрокидыванию силовых секций, что требует введения дополнительных связей и ужесточения конструкции. Оценки показывают, что предоставленный для стенки камеры зазор позволяет развить достаточно жесткую конструкцию силовой секции.

Пондеромоторное давление на защитные тепловые экраны и диверторные пластины значительно снижается при их секционировании и электрическом разрыве вдоль малого и большого обходов тора, составляя 0,02 мПа на 4-х миллиметровые стальные экраны и 0,75 мПа на 10 -и миллиметровые медные пластины дивертора.

Отметим, что при определенных размерах экранов и способов закрепления возможно наступление резонансного режима их механических колебаний, вызванных осцилляцией шнура плазмы частотой f кГц на протяжении рабочего импульса.

Максимальный перегрев элементов камеры при срыве от вихревых токов не превышает 30°C , более существенным воздействием является тепловое излучение плазмы в полномасштабном импульсе до 100 Вт/см^2 на стенку и до 7 кВт/см^2 в максимуме на диверторные элементы.

Проработка обоих вариантов показала возможность их технической реализации.

7. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОИДАЛЬНЫМИ ПОЛЯМИ

Система управления полоидальными полями реализуется в виде системы управления выделенными интегральными параметрами: азимут ток, равновесие по горизонтали и вертикали, форма сечения плазмы. В качестве основной диагностики используется альфамагнитная диагностика, а система управления строится по комбинированному принципу: программа + обратные связи.

Наиболее серьезной инженерной задачей является управление положением плазмы по вертикали из-за неустойчивости равновесия ($\eta \approx -2,0$). Необходимым условием реализации рабочего режима разряда является $\Pi + \Pi_S > 0$, где Π_S определяет суммарный стабилизирующий эффект различного рода пассивных элементов. Для камеры, состоящей из силовых и сильфонных секций, критерий нестационарного равновесия не выполняется ($\Pi_S = 1,8$). Поэтому необходима установка пассивных стабилизирующих витков в камере с модульной структурой (2-4 модуля), сечение шины - 6400 мм^2 (медь). Величина Π_S для возможных мест размещения витков меняется в

пределах от 2,5 до 3,7. В рабочем варианте $\Pi_s = 3,7$ и $\tau_f \approx 60$ мс (постоянная времени неустойчивости).

Источниками сравнительно медленных возмущений являются различного рода неточности в установке ОТИ, асимметрия конструкции установки (опорные плиты, бандаж и т.п.). Они оценены в $5 \cdot 10^{-3}$ Тл. Быстрые возмущения ($f \approx 10 + 100$ Гц) связаны с перестройкой профиля тока плазмы, несимметрией работы диверторов. Эффективная амплитуда этого возмущения принята равной 10^{-3} Тл. Обмотки горизонтального магнитного поля с целью снижения мощности питания "быстрого" контура управления разбиты на две группы, индуктивно развязанных до уровня $K_{сг} \approx 0,1 + 0,2$. Одна из обмоток предназначена для сравнительно низкочастотных возмущений. Она состоит из четырех последовательно соединенных секций ($R = 0,6$ м, $Z = \pm 1,75$ м и $R = 4$ м, $Z = \pm 1,55$ м). Ее характеристики (в одновитковом приближении): $B = 0,02$ Тл, $I = 0,16$ МА, $L = 5,7 \cdot 10^{-5}$ Гн. "Быстрая" обмотка состоит из двух секций ($R = 4$ м, $Z = \pm 1,55$ м): $B = 10^{-3}$ Тл, $I = 0,08$ МА, $L = 4 \cdot 10^{-5}$ Гн. Индуктивная развязка обмоток осуществляется за счет включения в контур корректирующей обмотки балластной индуктивности с $L_{сг} \approx 1,3 \cdot 10^{-3}$ Гн (это понижает коэффициент связи обмоток с $\sim 0,6$ до $\sim 0,1$).

Питание корректирующей обмотки - от шестипульсного тиристорного выпрямителя (~ 17 МВт, 110 В), источник питания быстрой обмотки - емкостной накопитель в сочетании с быстрым трехпозиционным тиристорным коммутатором, типа примененных в Т-15 ($f_{max} = 1,5$ кГц). В контуре управления используется ИД-контроллер. Требуемая мощность питания быстрой обмотки принята равной 20 МВт (0,3 кВ/75 кА). При этом максимальное отклонение плазмы не превышает 10 мм.

8. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Система электропитания предназначена для формирования заданных импульсов тока в обмотках ЭИС, к которым относятся обмотка тороидального поля (ОТН) и n обмоток полоидального поля. Условно обмотки полоидального поля могут быть разделены по выполняемым функциям на: индуктор (ОИ), обмотку вытягивающего поля (ОВ), дипольную обмотку (ОД), обмотку быстрого управления равновесием плазмы (ОР), обмотку горизонтальной коррекции и обмотку вертикальной коррекции.

В таблице 8.1 приведены основные параметры наиболее мощных обмоток полоидального поля ОИ, ОВ и ОД. При определении напряжений обмоток учитывались резистивные падения напряжения, которые определялись с учетом изменения активных сопротивлений обмоток вследствие нагрева, а также из-за диффузии магнитного поля.

Основные параметры, определяющие требования к системе электропитания, приведены в таблице 8.2.

Система электропитания должна быть рассчитана на квазистационарный режим работы (изменение мощности в относительно небольших пределах при значительной длительности импульса). В таких режимах целесообразно использование в качестве основных источников питания вентильных преобразователей. В начальный период существования плазмы ($0 \div 0,1$ с), когда требуется форсировка мощности в обмотках полоидального поля, эта мощность достигается за счет вывода энергии, предварительно накопленной в обмотке индуктора, на активное сопротивление.

Наиболее целесообразным представляется применение комбинированного энергопитания - частично от сети и частично от игнитронных генераторов. Нагрузки распределяются таким образом, чтобы покрытие сравнительно кратковременных толчков большой мощности осуществлялось от электромашинных агрегатов, а длительное потреб-

Таблица 8.1

	наименование параметра	СП	ОИ	ОВ	ОД	приме- чение
1	Число витков	320	10x82	2x112	2x42	
2	максимальное значение тока обмотки, кА	344	78	56	90	
3	Максимальное напряжение:					
	3.1. Импульсное, кВ	-	10	10	10	
	3.2. квазистационар- ное, кВ	3,0	3,3	0,9	1,6	
4	максимальная энергия магнитного поля, мДж	1400	345	196	227	
5	Запас энергии перед на- чалом разряда тока плаз- мы, мДж	1400	345	33,5	8,5	Суммар- ный за- пас энергии 1787
6	Энергия, потребляемая от источников питания за импульс, мДж при длитель- ности площадки тока плаз- мы					Суммар- ные за- наче- ния
	10 с	7160	1255	475	590	9480
	15 с	8380	1685	570	770	11410
	20 с	9700	2305	685	960	13670
7	максимальная мощность, мВт	760	525	148	63	
8	Длительность импульса при максимальной длительности площадки, с	45	36	40	36	

Таблица 8.2

	с	-8	-4	0	0,1	3,4	8,4	18,4	23,4	28,4	32
ОИ	Т,КА		0	77,70	69,83	-27,58	-52,27	-64,33	-70,3	-76,36	0
	У,Б		0	580	513	-300	-549	-983	-1300	-1737	0
	У,В		2220	2220	-7355	-3075	-576	-137	-137	-138	1800
	У,В		2220	2800	-6842	-3375	-1125	-1125	-1437	-1875	1800
	Р		0	217,5	-2500	-875	-686	-1120	-1437	-1875	1800
	МБТ		0	-520,5	-477,0	93,01	58,8	72,05	101,02	143,1	0
ОБ	Т,КА		7,59	15,18	22,01	51,05	49,28	425,0	48,10	46,95	0
	У,Б		0	74	123	303,0	344	425,0	482	507	0
	У,В	570	570	570	6756	582	-300	-08,2	-67,3	-57	-1153
	У,В	570	570	644	6879	885,0	144	357,4	414,7	500	-1153
	Р		0	9,77	705	3,5	275,8	358,3	415	-586	0
	МБТ		0	103,06	151,3	49,5	7,44	17,01	29,15	23,47	0
ОИ	Т,КА		0	9,28	-3,33	-77,43	-87,88	-69,00	-89,50	-90,12	0
	У,Б		0	15,5	-5,9	-141,1	-182,3	-234,8	-329	-448	0
	У,В	453,6	453,6	453,6	-6829	-1384,7	-213,5	-25,3	-25,03	-25,00	1400
	У,В	453,6	453,6	469,1	-6834,9	-1525,8	-395,8	-200	-354,03	473,00	1400
	Р		0	4,353	1390,0	-354,0	-207,0	-259,0	952	42,7	0
	МБТ		0	-03,0	4,03	27,4	18,2	2,2	31,7	42,7	0

ление энергии со сравнительно пониженной мощностью и большим расходом энергии обеспечивалось сетью.

Т.к. наиболее энергоемкой является обмотка тороидального поля, то подключение ее системы электропитания к сети является необходимым условием для снижения требований к электромашинным агрегатам. Сеть должна быть рассчитана на потребление мощности 200...250 мВт. Два генератора ТГД-200 (из комплекса ТСП) могут обеспечить форсировку мощности в период накопления энергии в обмотке тороидального поля, а два оставшиеся могут быть использованы в качестве дополнительных компенсаторов реактивной мощности. Возможен вариант подключения к сети системы электропитания обмотки тороидального поля и системы электропитания обмотки индуктора. В этом случае при мощности сети 350 мВт с мощностью существующего комплекса электромашинных агрегатов обеспечивается импульс с укороченной до 10 с площадкой.

9. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Электромагнитная система (ЭМС) установки представляет собой пространственную конструкцию, состоящую из обмотки тороидального поля (ОТП), обмотки полоидального поля (ОПП) и силовых элементов. Катушки ОПП расположены снаружи по отношению к ОТП. В разделе рассмотрен вариант с 32 блоками ОПП, расположенными равномерно вокруг центральной оси установки и связанными между собой верхним и нижним силовыми поясами. Каждый блок состоит из 10 бронзовых одновитковых секций, заключенных в стальной каркас.

В результате взаимодействия магнитных полей и токов в блоках ОПП возникают следующие пондеромоторные нагрузки:

1. Распределенные объемные силы, действующие в плоскости токонесущих элементов, равнодействующая этих сил (центростремитель-

ная сила) направлена к центру установки и равна $F_r = 3920$ т на каждый блок;

суммарная сила, разрывающая блок в вертикальном направлении

$$F_z = 3000 \text{ т.}$$

2. Распределенные объемные силы, действующие на блок ОТИ перпендикулярно его оси; эти силы создают опрокидывающий момент относительно горизонтальной оси блока $M_r = 100,0$ т.м на каждый блок.

Для уравнивания центростремительной силы применен арочный распор, когда блоки ОТИ, касаясь друг друга боковыми плоскостями, образуют замкнутый свод. В ЭМС установки применена конструкция с верхним и нижним силовыми поясами, обеспечивающими дополнительную жесткость ЭМС при действии как боковых сил, так и сил в плоскости блока. Принятая овальная форма блока ОТИ, полученная сопряжением дуг окружностей различных радиусов, близка к D-образной безмоментной форме. Силовая конструкция блока ОТИ представляет собой стальной каркас коробчатого сечения, внутри которого расположены 10 бронзовых токонесущих витков. Данная конструкция обеспечивает необходимую жесткость при действии опрокидывающих моментов.

В силу центральной симметрии конструкции и нагрузок все блоки ОТИ находятся в одинаковых условиях. Поэтому исследовалось НДС единичного блока ОТИ. При этом решались две независимые задачи: изучалось НДС блока от действия сил, лежащих в его плоскости и от действия опрокидывающих моментов. Результаты решения обеих задач суммируются.

Определение НДС блока под действием сил, лежащих в его плоскости, проводилось для момента времени, соответствующего концу площадки импульса. При этом в бронзовом витке действует распределенная объемная нагрузка и температурное поле с перепадом

температуры $\Delta T = 107^\circ\text{C}$ на $\Delta l = 70$ см по сечению витка. Зона арочного распора, воспринимающая центростремительную силу, расположена в бронзовом витке до радиуса $r = 190$ см от оси установки и в каркасе в области силового пояса.

механические свойства материалов:

I. виток: $E = 1,3 \cdot 10^{10}$ кг/см² - модуль Юнга,
 $\nu = 0,3$ - коэффициент Пуассона,
 $\alpha_T = 17 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ - коэффициент линейного температурного расширения,
 $\sigma_T = 3000$ кг/см² - предел текучести.

2. каркас: $E = 2,0 \cdot 10^{10}$ кг/см²
 $\nu = 0,3$
 $\alpha_T = 16,9 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹

предполагалось, что виток может проскальзывать по поверхности каркаса без трения. Расчет проведен методом конечных элементов. На рис.9.1 и рис.9.2 показано распределение напряжений в наиболее характерных сечениях в обмотке и в каркасе.

При действии опрокидывающих моментов блоки ОТИ испытывают кручение, изгиб и сдвиг из своей плоскости. Жесткость витков мала по сравнению с жесткостями силовой конструкции и в расчетах не учитывалась. Часть коробчатого каркаса ЭМС в зоне арочного распора рассматривалась как два коаксиальных стальных цилиндра, соединенных по образующим радиальными пластинами, что должно обеспечиваться специальной системой штифтов. Цилиндры образованы полками каркаса, пластины - стенками. Предполагалось, что проскальзывание вдоль образующих цилиндров между контактирующими стенками каркаса отсутствуют. Вне зоны арочного распора корпус рассматривался как упругий стержень с соответствующими жесткостными характеристиками на изгиб, кручение и срез. В месте расположения силового пояса стержень жестко закреплен в направлении поворота относительно горизонтальной оси. Расчетная схема показана на рис.9.3

и основные результаты приведены в таблице 9.1.

Результаты определения НДС блока от действия сил, лежащих в его плоскости и от действия опрокидывающих моментов, суммировались и по энергетической теории прочности определялись эквивалентные напряжения. Максимальная величина эквивалентного напряжения в каркасе не превосходит 7400 кг/см^2 . Эквивалентные напряжения в витке не превосходят предела текучести. В этих условиях возможно обеспечить число циклов $N = 10^4$.

Таблица 9.1

Сечение	σ [кгс/см ²]	τ [кгс/см ²]
I	2700	1020
II	1100	1200
III	0	780
IV	0	500
$R = III \text{ т}; \quad m = II8 \text{ т.м}$		

10. ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ

Камера имеет форму тора с Д-образным меридиональным сечением. Радиус оси плазменного шнура $R = 220 \text{ см}$, габариты сечения тора $144 \times 212 \text{ см}$. Из условия предельной продольной электропроводности гладкой тороидальной камеры максимальная толщина стенки равна $0,6 \text{ см}$ (нержав.сталь).

В экстремальном режиме на камеру действует атмосферное давление и электродинамические силы при срыве тока плазмы.

Расчеты производились для электродинамических нагрузок при срыве тока плазмы $I_{нл} = 3,8$ МА за время 3,8 мс при величине окружного сопротивления камеры $R_{\Omega} = 0,3$ мОм (для момента $t = 3,8$ мс, при котором нагрузки максимальны). Процесс нагружения камеры принимался квазистатическим. Распределение нормальной P_n и касательной P_{τ} составляющих электромагнитной нагрузки приведены на рис. 10.1, 10.2. Полная нагрузка на камеру $\vec{P} = (I + P_n) \vec{n} + P_{\tau} \vec{\tau}$. Оценка устойчивости камеры производилась по параметру нагрузки $N : \vec{P}_{кр} = N \cdot \vec{P}$, где $\vec{P}_{кр}$ - критическая нагрузка.

Основные результаты по устойчивости камеры следующие.

1. Гладкая камера толщиной 0,6 см: $N = 0,55$.
2. Камера толщиной 0,6 см с меридиональными ребрами высотой 3 см и шириной 1 см. K - число ребер.
 - а) $K = 64$: $N = 3,5$;
 - б) $K = 96$: $N = 4,3$;
 - в) $K = 128$: $N = 4,8$.
3. Двуслойная камера с внутренними меридиональными ребрами (рис. 10.3), $l \approx 10$ см, $a = 0,4$ см.
 - а) $h = 0,3$ см, $H = 4$ см: $N = 4,5$;
 - б) $h = 0,2$ см, $H = 4$ см: $N = 3,0$;
 - в) $h = 0,3$ см, $H = 8$ см: $N = 5,4$.

Максимальные напряжения возникают в гладкой камере и составляют для полной нагрузки $\sigma_{\tau} = 1100$ кг/см², что не превосходит предела текучести для нерж. стали $\sigma_T = 2500$ кг/см².

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис.1.1 - Зависимость большого радиуса плазменного шнура R и энергии тороидального магнитного поля W_B от величины поля на оси шнура для установки с зажиганием.
- Рис.1.2 - Среднее напряжение в проводнике обмотки тороидального поля в зависимости от магнитного поля на оси шнура.
- Рис.1.3 - Зависимость средней плотности тока в обмотке от поля.
- Рис.1.4 - Зависимость отношения времени горения к времени термодерного выгорания от магнитного поля для азотно-охлаждаемой обмотки.
- Рис.1.5 - Зависимость от поля характерных времен эксперимента (τ_E - энергетическое время, $\tau_{10\%He}$ - время выгорания азота на оси и совпадающее с ним время загорания в среднем 10% частиц helium, τ_{ψ} - время загорания вострешнего тороидального магнитного потока в шнуре, τ_{ψ} - время заужения тока в шнуре).
- Рис.1.6 - Предложенный сценарий импульса (зависимость тока I_{ind} , напряжения на обводе U , мощность дополнительного нагрева P_{gen} , мощности \dot{W} и температуры на оси шнура T_c от времени).
- Рис.1.7 - Зависимость мощности P_A , энергии излучения W_A и максимальной температуры T_{max} от времени t .
- Рис.1.8 - Максимальная плотность тока j_{max} (кА/см²) и температуры катушки T_{max} для $t = 10$ мс.
- Рис.1.9 - То же для $t = 10$ мс.
- Рис.1.10 - Распределение перегрева для $t = 10$ мс.
- Рис.1.11 - Конфигурация катушек системы последовательного тока.
- Рис.1.12 - Сценарий разряда.
- Рис.1.13 - Конфигурация последовательного тока для системы разряда.
- Рис.1.14 - Вариант конструкции системы ввода энергии в виде поперечных катушек.
- Рис.1.15 - Поперечный вид системы разряда.

Рис.8.1 - конструктивная схема электромагнитной системы.

Рис.8.2 - проекции трехмерной сетки для расчета и моделировки торoidalного поля.

Рис.8.3 - схема вакуумной камеры.

Рис.9.1 - Распределение напряжений в обмотке ОТИ.

Рис.9.2 - Распределение напряжений в каркасе ОТИ.

Рис.9.3 - Расчетная схема ОТИ для учета обгоняющих о.м.

Рис.10.1 - Распределение нормальной составляющей электромагнитного поля нагрузки на камеру при срыве о.м. в.к.

Рис.10.2 - То же для тангенциальной составляющей.

Рис.10.3 - Элемент двуслойной камеры с ребрами жесткости.

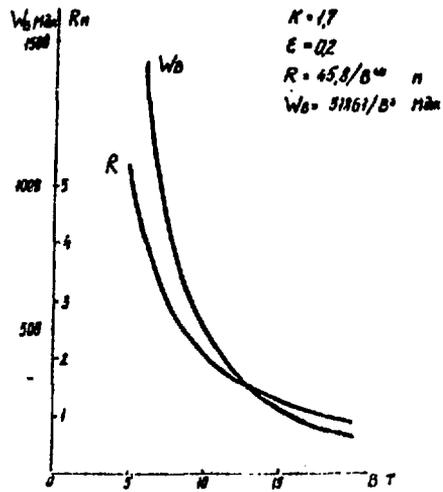


Рис. I. I

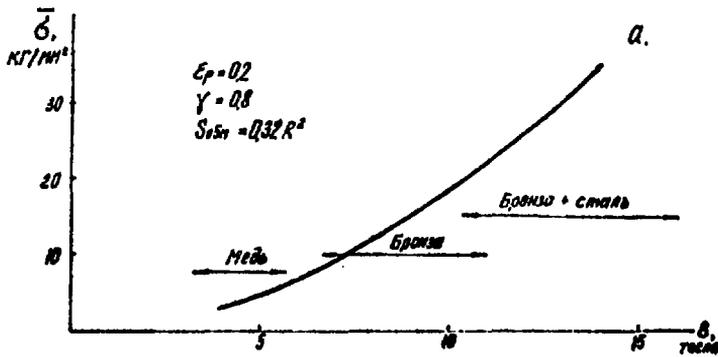


Рис. I. 2

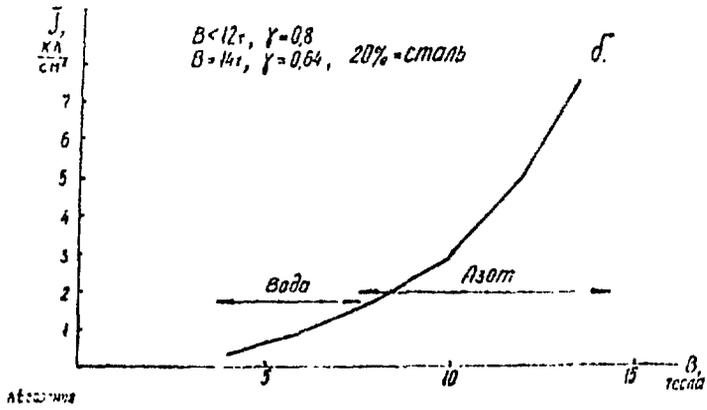


Рис. I.3

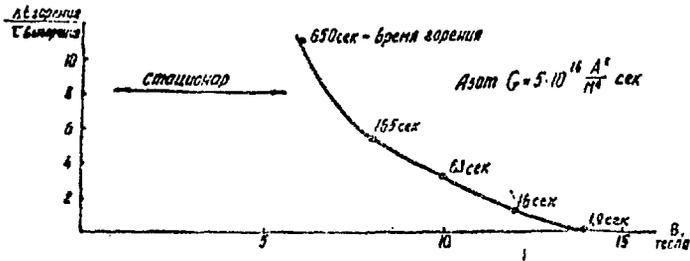


Рис. I.4

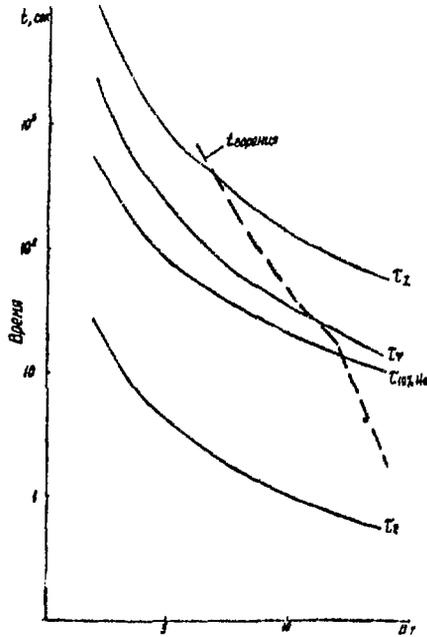


Рис. I.5

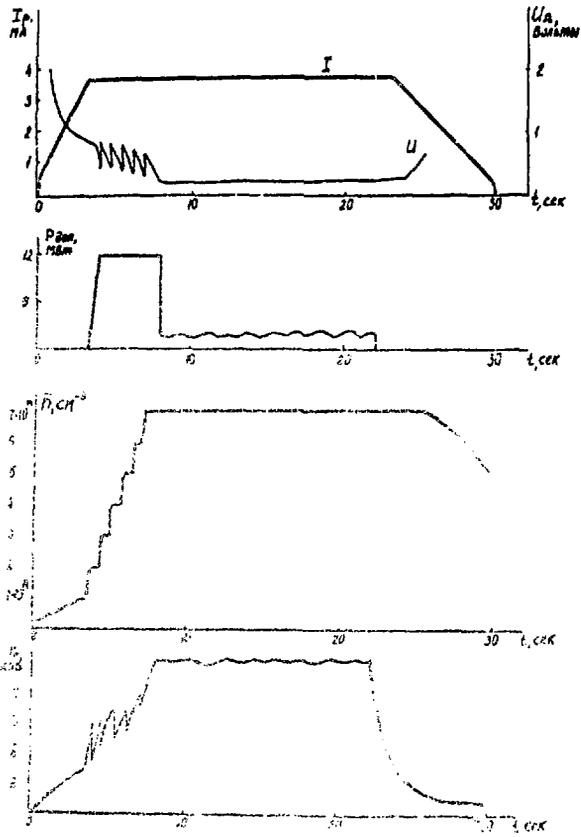


Рис.1.6

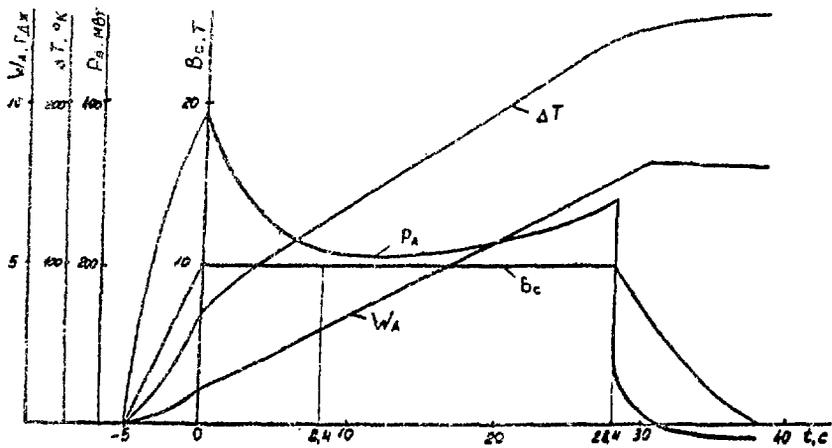


Рис.2.1

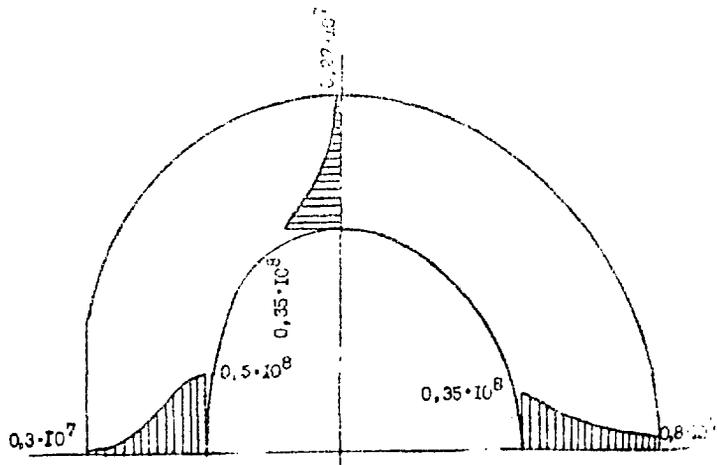


Рис. 2.2

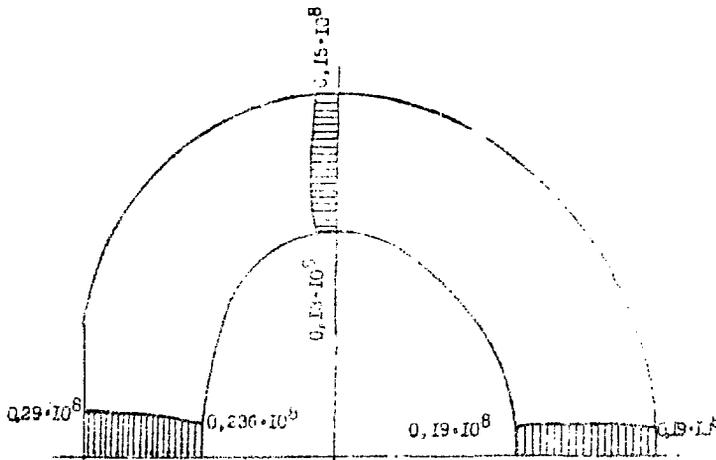


Рис. 2.3

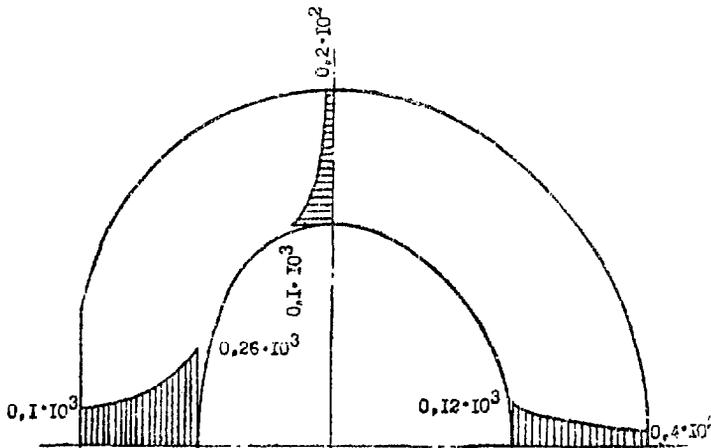


Рис. 2.4

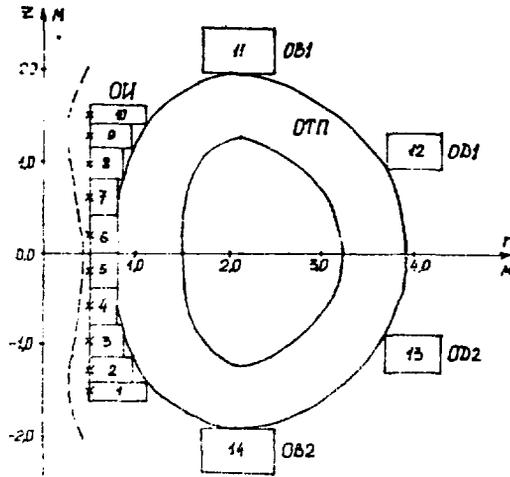


Рис.3.1

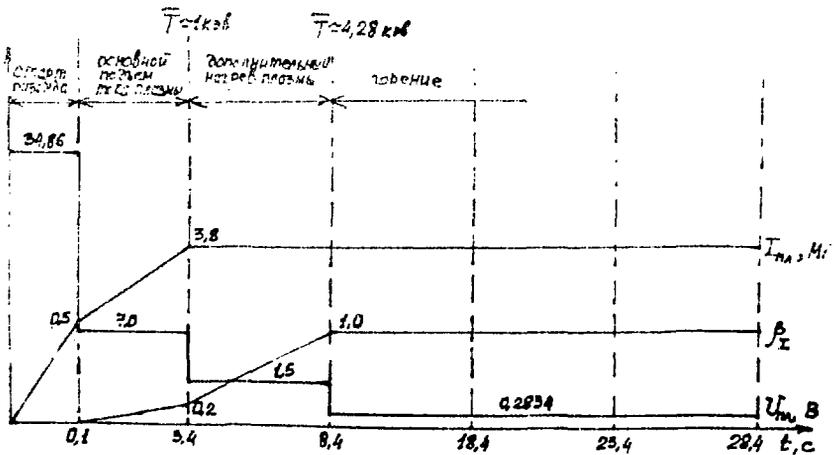


Рис.3.2

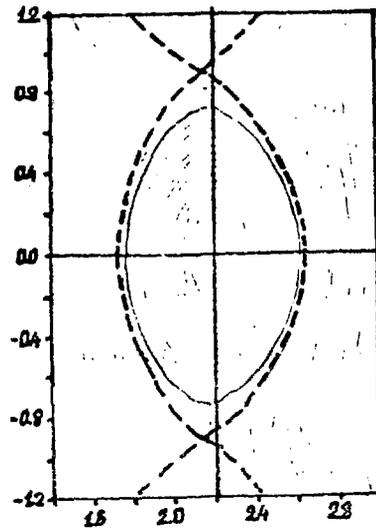


Рис.3.3

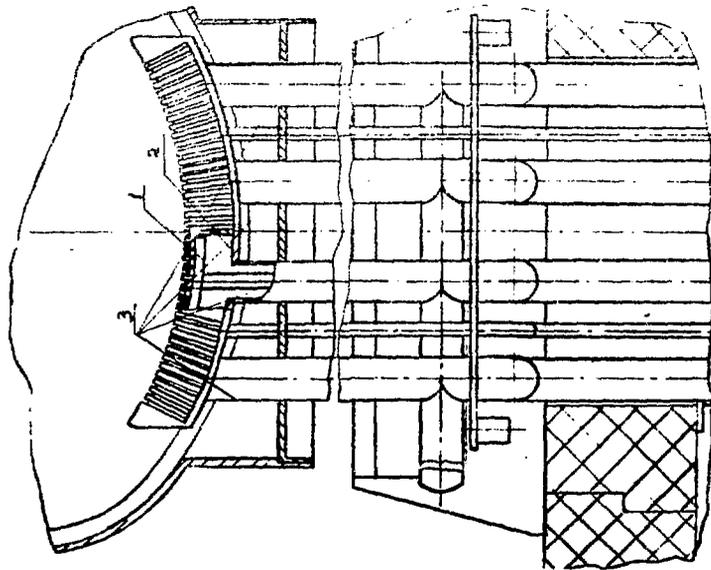
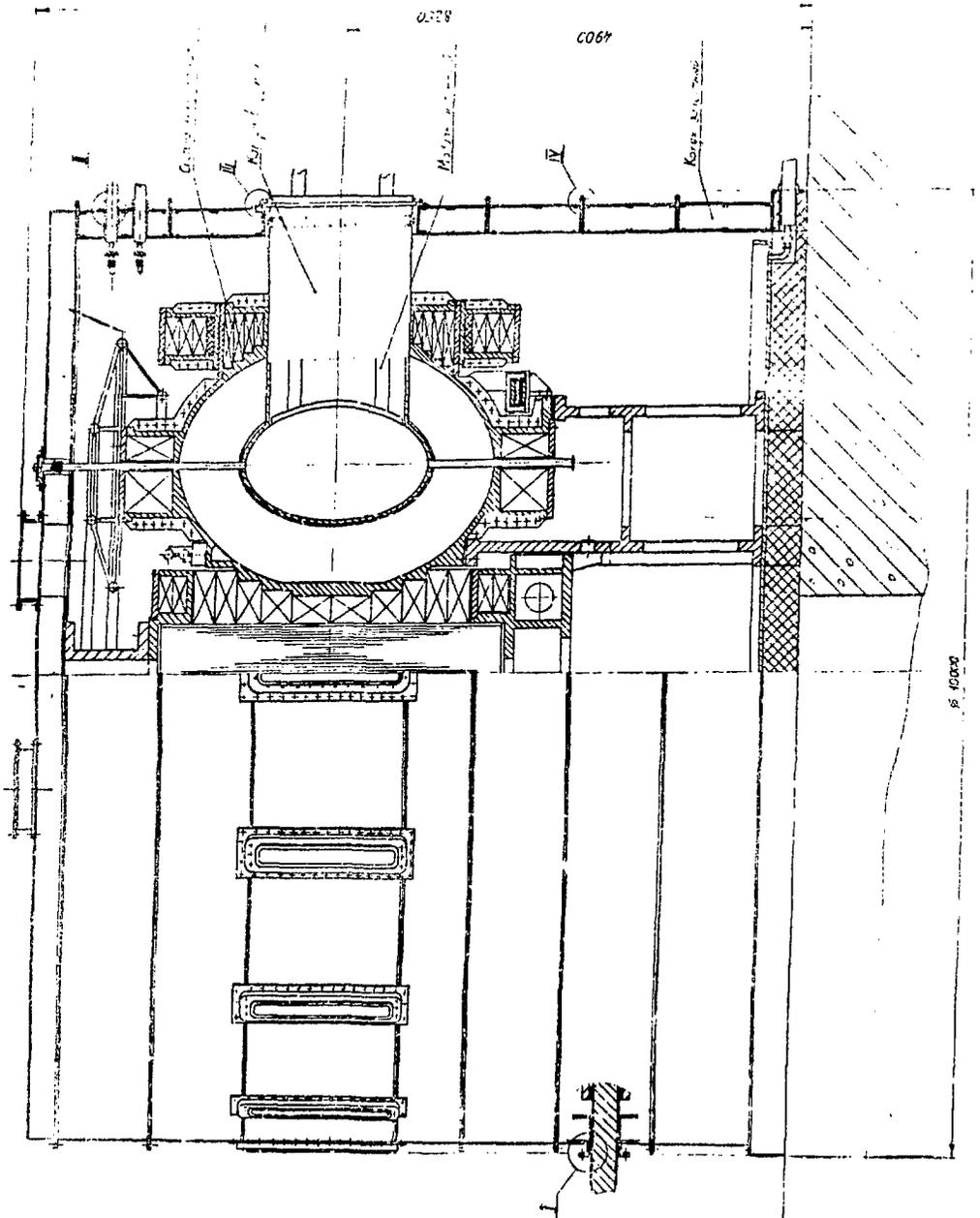


Рис.4.1



деталь 9

Рис. 5.1

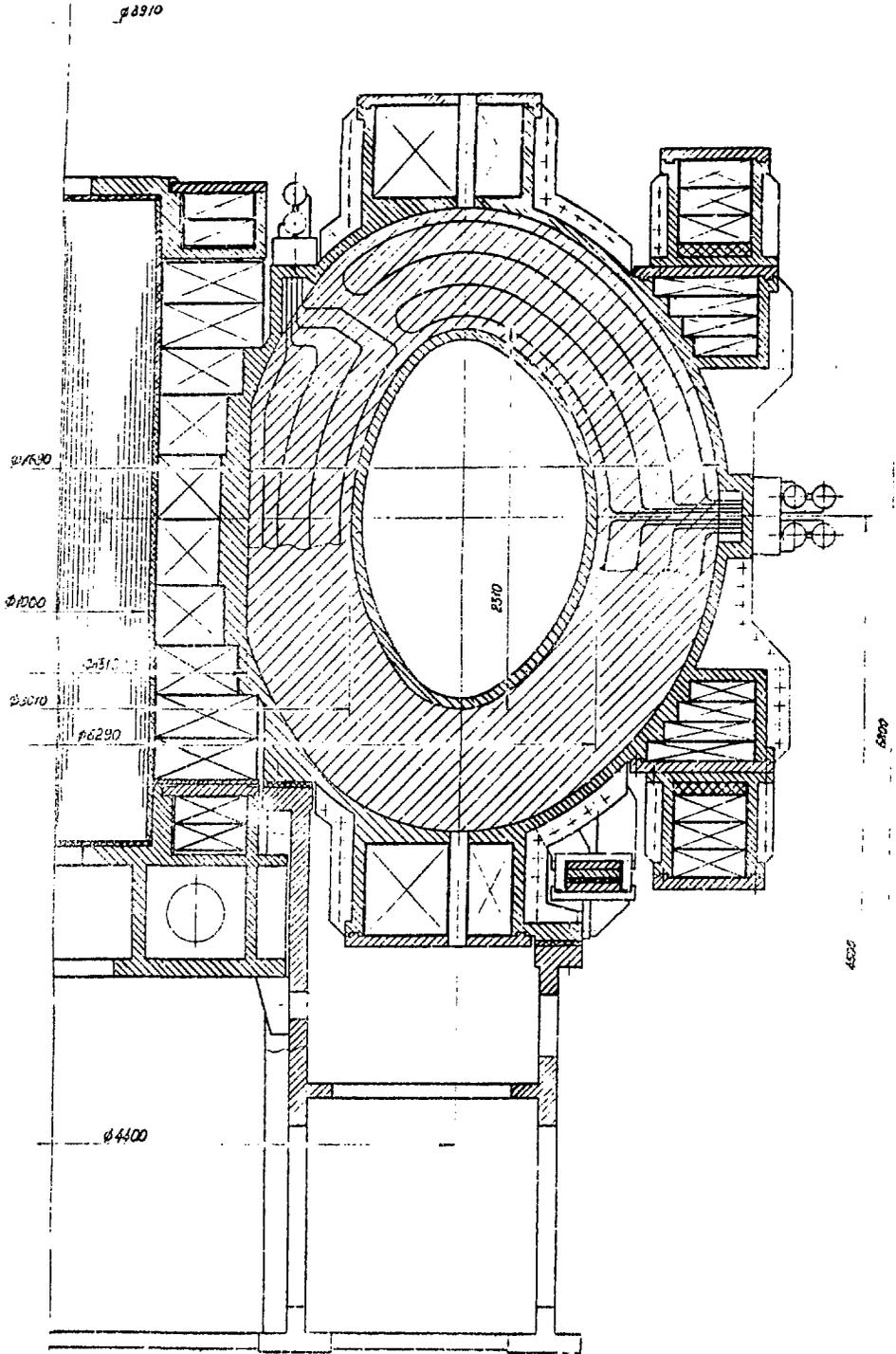


Рис. б.2

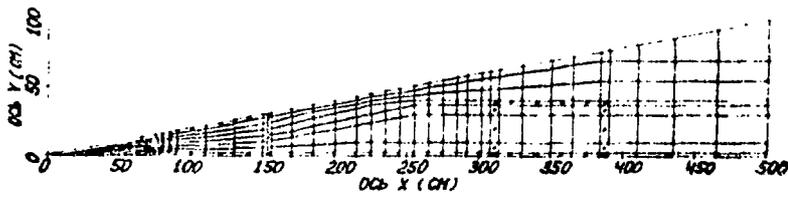
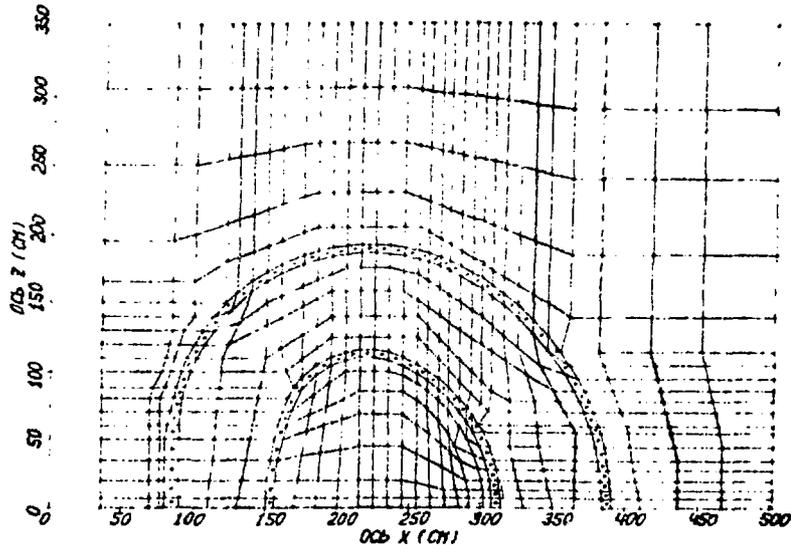


Рис. 6.3

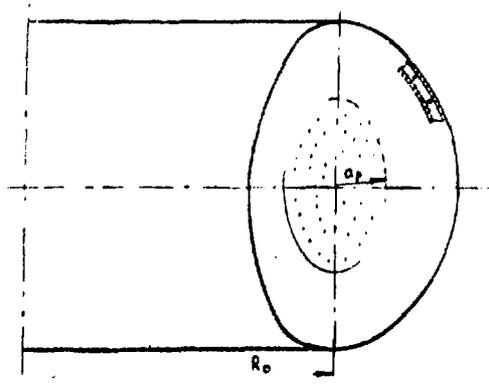


Рис. 6.1

37

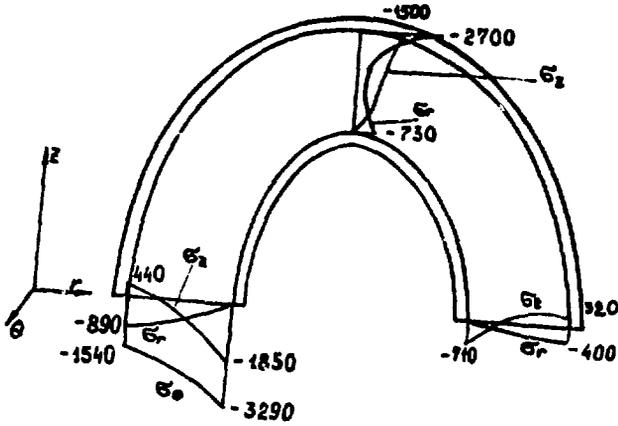


Рис.9.1

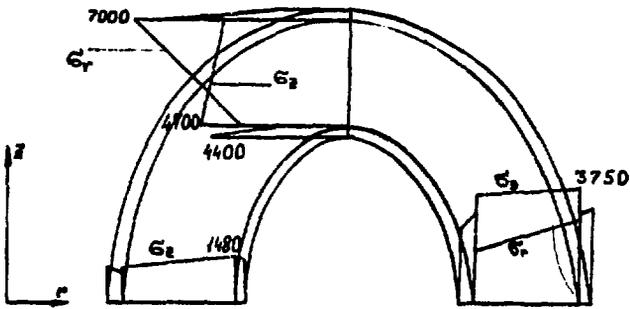


Рис.9.2

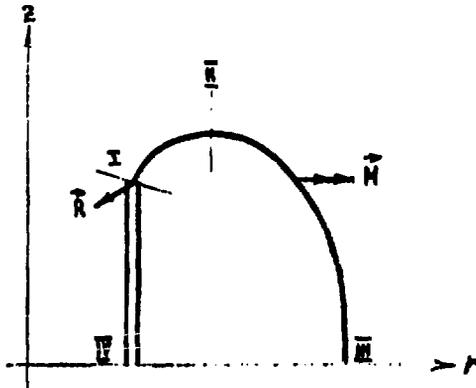


Рис.9.3

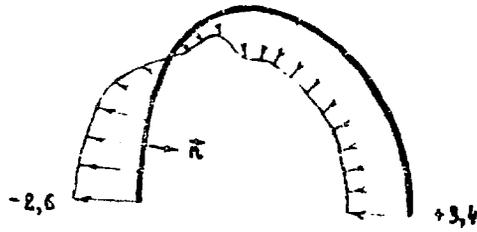


Fig. 10.1

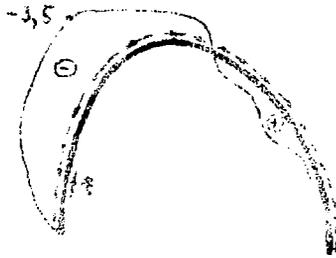


Fig. 10.2

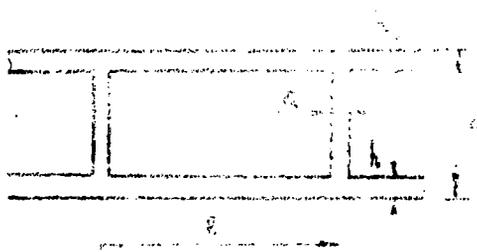


Fig. 10.3

Подписано в печать 15.11.1988. Т-17. Объем 120 экз.
Оформлена печать. Шрифт Т-17. Цена 120 экз.
Заг. 100/888. Индекс 100/888.

С. П. П. П. П. П.