

33

И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И Я Ф 77 - 46

Г. И. Димов

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕН-
ТАЛЬНОЙ ЛОВУШКИ С АМБИПОЛЯРНЫМИ
ПРОБКАМИ АМБАЛ - I

Новосибирск

1977

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЛОВУШКИ
С АМБИПОЛЯРНЫМИ ПРОБКАМИ АМБАЛ-1

Г.И. Димов

Приводимые ниже основные параметры экспериментальной установки АМБАЛ-1 получены в результате эскизного проектирования этой установки в ИЯФ СО АН СССР на протяжении 1976 года. В разработке эскизного проекта установки принимали участие Е.Д.Бендер, В.Г.Дудников, М.Е.Книжневский, Г.С.Крайнов, Г.В.Росляков, И.Я.Тимошин и Е. Шумько.

Установка АМБАЛ-1 предназначена для экспериментальной проверки принципов работы ловушки с амбиполярными (двойными) пробками, предложенной несколько лет тому назад в ИЯФ СО АН СССР /1/ и позднее в Ливерморской лаборатории в США /2/. В качестве основной ставится задача получения устойчивой плазмы в торцевых пробкотронах за счет стабилизации ее более холодной изотропной центральной плазмой.

Основные расчетные параметры плазмы в ловушке приведены в таблицах 1 и 2. В торцевых пробкотронах предполагается использование легководородной плазмы вследствие того, что протоны эффективно нагревают центральную плазму и имеют минимальный ларморовский радиус. В центральной области предполагается создавать дейтериевую плазму. С целью нагрева центральной плазмы до высоких температур и уменьшения тока инжекции в центр объем центральной плазмы сведен до минимума. Плотность плазмы принята достаточно высокой, чтобы ослабить вакуумные требования, и не очень высокой, чтобы необходимый ток инжекции в центр - был не очень большим.

При выборе основных параметров установки мы стремились к реализации, по возможности, максимального отношения поперечных размеров плазмы к ионному ларморовскому радиусу. Определенную роль в выборе размеров ловушки сыграло то обстоятельство, что с увеличением ее размеров возрастает относительный размер окон для инжекции атомарных пучков. В конечном счете поперечные размеры ловушки были установлены, исходя из мощности имеющегося генератора тока для возбуждения магнитного поля. При этом длина ловушки была выбрана минимальной.

Магнитная система установки представлена на рис. 1. Она состоит из 14^{ти} медных катушек общим весом в 8 т, охлаждаемых жидким азотом. Магнитное поле торцевых пробкотронов имеет конфигурацию с минимумом В, оно возбуждается парами катушек типа Инь-янь. Центральная соленоидальная часть поля сведена до минимума с целью уменьшения объема центральной плазмы. Переход от полей с минимумом В на торцах к соленоидальному полю в центре осуществляется с помощью квадрупольных катушек из 4^х катушек. Общая длина магнитной системы 410 см, поперечный размер катушек Инь-янь 136 см (по меди), поперечные размеры квадрупольных катушек 156 см x 110 см. Параметры магнитного поля представлены в табл. 3. С целью уменьшения мощности питания катушки возбуждения поля решено охлаждать жидким азотом. Во время импульса тока температура катушек будет подниматься не более, чем на 10⁰С. Охлаждение будет производиться в течение 10-ти минут. Основные технические параметры магнитной системы приведены в табл. 4.

Плазму в ловушке предполагается накапливать в два этапа. Сначала накопление плазмы производится на мишенной холодной плазме

с помощью стартовых инжекторов с повышенным током в течение 200 мксек. Затем производится докопление плазмы с помощью основных инжекторов. Основные характеристики процесса накопления приведены в табл. 6. Мишенная плазма создается с помощью плазменных пушек, размещаемых в торцевых приемниках плазмы. Основные параметры инжекторов приведены в табл. 5. Как видно из этой таблицы, по току инжекции основных инжекторов предусматривается запас в 2 + 3 раза. Уменьшение диаметра плазмы в эксперименте до 10 см в торцевых пробкотронах (с помощью скребка) позволит иметь запас по току основных инжекторов в 6 раз и по току стартовых инжекторов в 4 раза. Иметь значительный запас по току инжекции в центральную область не представляется необходимым.

Одной из особенностей ловушки АМБАЛ - I является достаточно большое ожидаемое время жизни плазмы, что влечет за собой повышенные требования к вакуумным условиям в установке. Высокие требования к вакууму и стенкам установки вытекают также из необходимости минимального взаимодействия плазмы со стенками, особенно по электронной компоненте, без чего нельзя реализовать в плазме амбиполярные поля достаточно большой напряженности. Основные требования на вакуум и к стенкам приведены в табл. 5. Допуски на вакуум и поток вторичных частиц с первой стенки в торцевых пробкотронах определяются перезарядочными потерями периферийной плазмы, которые могут привести к "схлопыванию" плазменного столба. Аналогичные допуски в центральной области ловушки определяются общими допустимыми перезарядочными потерями. Уменьшение плотности плазмы в торцевых приемниках за счет сильного расширения магнитного потока позволяет сильно ограничить вторичную эмис-

сию электронов с поверхностей, принимающих плазму, за счет постановки отрицательно заряженной сетки с высокой прозрачностью (дебаевский радиус составляет несколько сантиметров).

На рис. 2 и 3 схематически представлена вакуумная система установки. Ее основная часть, представленная на рис. 2, имеет двойной вакуум: наружный для размещения магнитной системы и внутренний в области удержания плазмы. Область удержания плазмы ограничена сверхвысоковакуумной прогретой тонкой стенкой. Общая длина вакуумной системы около 8 м. В табл. 8 приведены состав и некоторые характеристики вакуумной системы. Откачка системы производится в основном встроенными поверхностями с напыленным титаном и охлаждаемыми азотом. Область удержания плазмы откачивается через многочисленные отверстия. В камерах инжекторов допускается относительно низкий вакуум. При этом предусматривается постановка параметаллических струй, загорающих поток водорода в область удержания плазмы и пропускающих инжектируемые пучки.

На рис. 4 приведены расчетные зависимости некоторых стационарных параметров торцевых пробкотронов от энергии инжекции протонов при постоянном отношении радиуса плазмы к среднему ионному радиусу и при постоянном магнитном поле. При указанных условиях объем плазмы растет как энергия инжекции в степени 3/2, а захватываемый ток ионов не зависит от энергии инжекции. Вверху на рис. 4 приведены атомарный ток инжекции I(H) и первичный протонный ток инжекции при условии нейтрализации в парах кадмия I+(Cd). Видно, что с целью снижения тока инжекции протонов необходимо принимать энергию инжекции в диапазоне 10 + 40 КэВ. Внизу на рис. 4 приведены допускаемые из условия 3,3-процентных перезаря-

дочных потерь периферийной плазмы коэффициенты отражения атомов водорода с I-ой стенки I(H)/I(H_{пер}) и из приемника пучка I(H)/I(H⁺), а также допускаемое давление водорода между плазмой и стенкой p(H₂). Наиболее жестким требованием является допуск на коэффициент отражения атомов от I-ой стенки. Однако этот допуск сильно ослабляется с повышением энергии инжекции. Повышение энергии инжекции протонов до 40 КэВ позволяет сильно ослабить влияние отраженных от стенки атомов на потери периферийной плазмы. Однако с повышением энергии инжекции растут размеры ловушки (или необходимо увеличивать магнитное поле) и возрастает мощность инжекторов. Учитывая выше сказанное по рис. 4, мы и приняли энергию инжекции протонов в торцевые пробкотроны в 25 + 30 КэВ.

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Димов, В.В.Заканданов, М.Е.Кишиневский. Физика плазмы, 2, вып. 4, 597 (1976).
2. Т.К.Fowler, B.G.Logan, Comments on plasma phys. and contr. fusion, 11, N 6, 167 (1977).

Табл.1 Плазма в установке АМБАЛ-1

Основные расчетные параметры плазмы	Обозначение	В центральной области	В торцевых пробкотронах
Род ионов		d	p
Плотность (в средней плоскости)	n	10^{13} см^{-3}	$2,5 \pm 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$
Средняя энергия ионов	$\langle E_i \rangle$	0,9 ± 1,4 КэВ	21 ± 27 КэВ
Температура электронов	T_e	1,5 ± 1,9 КэВ	
Время удержания частиц	τ_p	110 ± 230 мсек	20 ± 30 мсек
Относительный радиус плазмы	$\tau / \langle \rho_i \rangle$	10 ± 12	6 ± 6,6

Табл.2. Плазма в установке АМБАЛ-1

Расчетные параметры плазмы	Обозначение	В центральной области	В торцевых пробкотронах
Объем (приведенный)	V	140 л	2 x 7 л
Диаметр (в средней плоскости)	D	50 см	20 см
Средний ионный радиус	$\langle \rho_i \rangle$	2 ± 2,5 см	1,5 ± 1,7 см
Относительное давление	β	0,13 ± 0,18	0,1 ± 0,15
Параметр удержания частиц	$n \tau_p$	$3 \pm 7 \cdot 10^{12}$	$6 \pm 8 \cdot 10^{11}$
Ионный удерживающий потенциал	$\Delta \phi$	-	1,3 ± 2,1 КэВ
Электронный удерживающий потенциал	ϕ_k	-	7 ± 9,5 КэВ

Табл.3 Магнитное поле АМБАЛ-1

Параметр	Обозначение	Значение
Поле в пробках (на оси)	B_m	30 кгс
Поле в центре торцевых пробкотронов	B_k	15 кгс
Пробочное отношение в пробкотронах	R_k	2 ± 1,8
Радиальное пробочное отношение (на 10 см)	R_r	1,04
Длина пробкотронов	L_k	75 см
Длина центральной области (между пробками)	L_o	230 см
Поле в центре системы	B_o	2,5 кгс

Табл. 4 Магнитная система АМБАЛ-1

Параметр	Значение
Время становления поля	4 сек
Длительность плато	1 сек
Энергия поля	7,5 Мдж
Вес меди	8 т
Мощность на плато	5,2 Мвт
Запасаемая энергия	23 Мдж
Расход жидкого азота за импульс	100 л

Табл. 5. Система инъекции АМБАЛ-1

Параметры инжекторов	Обозначение	В торцы		В центр
		Стартовые	Основные	Основной
Энергия инъекции	E_1	25 КэВ	25+30КэВ	1+2 КэВ
Первичный ионный ток	I^+	2x80а	2x30 а	10а
Расчетный захватываемый ток	I_c^+	2x8 а	2x0,8+1,5а	1+2а
Расчетный атомарный ток	I^0	2x30а	2x7 + 11а	3+9а
Расчетный первичный ионный ток	I^+	2x40а	2x11+15 а	3,2+9,5а
Длительность импульсов	τ_1	200мксек	0,2 + 0,5 сек	
Скорость откачки инжекторных камер		20м ³ /сек	2x100м ³ /сек	50 м ³ /сек

Табл. 6. Накопление плазмы в торцевых пробкотронах

Параметр	Значение
Длительность старта	200 мксек
Плотность в конце старта	10^{12} см^{-3}
Время докопления	100 мсек
Плотность мишенной плазмы на старте	$2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$
Электронная температура на старте	30-50 эВ
Допустимая концентрация атомов на старте	0,5%
Время жизни быстрых ионов в мишенной плазме	10 мсек

Табл. 7. Требования на вакуум и стенки в АМБАЛ-1

Допускаемые и справочные величины	В торцевых пробкотронах	В центральной области
Концентрация атомов, допускаемая по перезарядке ($\tau_d \geq 3\tau$)	$6 \cdot 10^{-6}$	$2+4 \cdot 10^{-6}$
Равновесная концентрация атомов по рекомбинации	$5 \cdot 10^{-8}$	
Пробег атомов с франк-кондоновской энергией	0,5 см	2 см
Допустимые потери периферийной плазмы на перезарядку	10%	30%
Допускаемое давление водорода около плазмы	10^{-7} тор	10^{-7} тор
Допускаемый суммарный коэффициент отражения, десорбции и распыления первой стенки	10%	5%
Допуск. коэффициент отражения приемников пучков	1%	5%
Прозрачность запирающей сетки приемников плазмы	99%	-

Табл.8. Вакуумная система АМБАЛ-1

Часть системы	Объем м ³	Откачива- ющая поверх- ность, м ²	Способ на- пыления	Вакуум тор
Область, занимаемая катуш- ками магнита	10	-	-	$10^{-4}+10^{-6}$
Область удержания плазмы	2	-	-	$10^{-7}+10^{-8}$
Торцевые приемники плазмы	2x5	2x10	термич.	$10^{-7}+10^{-8}$
Камеры стартовых инжекторов	2x2	2x2	термич.	$10^{-4}+10^{-5}$
Камеры основных инжекторов	2x2	2x10	электро- дуговой	$10^{-4}+10^{-5}$
Камера центрального инжек- тора	2	5	-"-	$10^{-4}+10^{-5}$
Приемники пучков	5x1,5	5x5	термич.	$10^{-8}+10^{-9}$
Насосы	2x1,5	2x5	-"-	$10^{-8}+10^{-9}$
Итого	42	84		

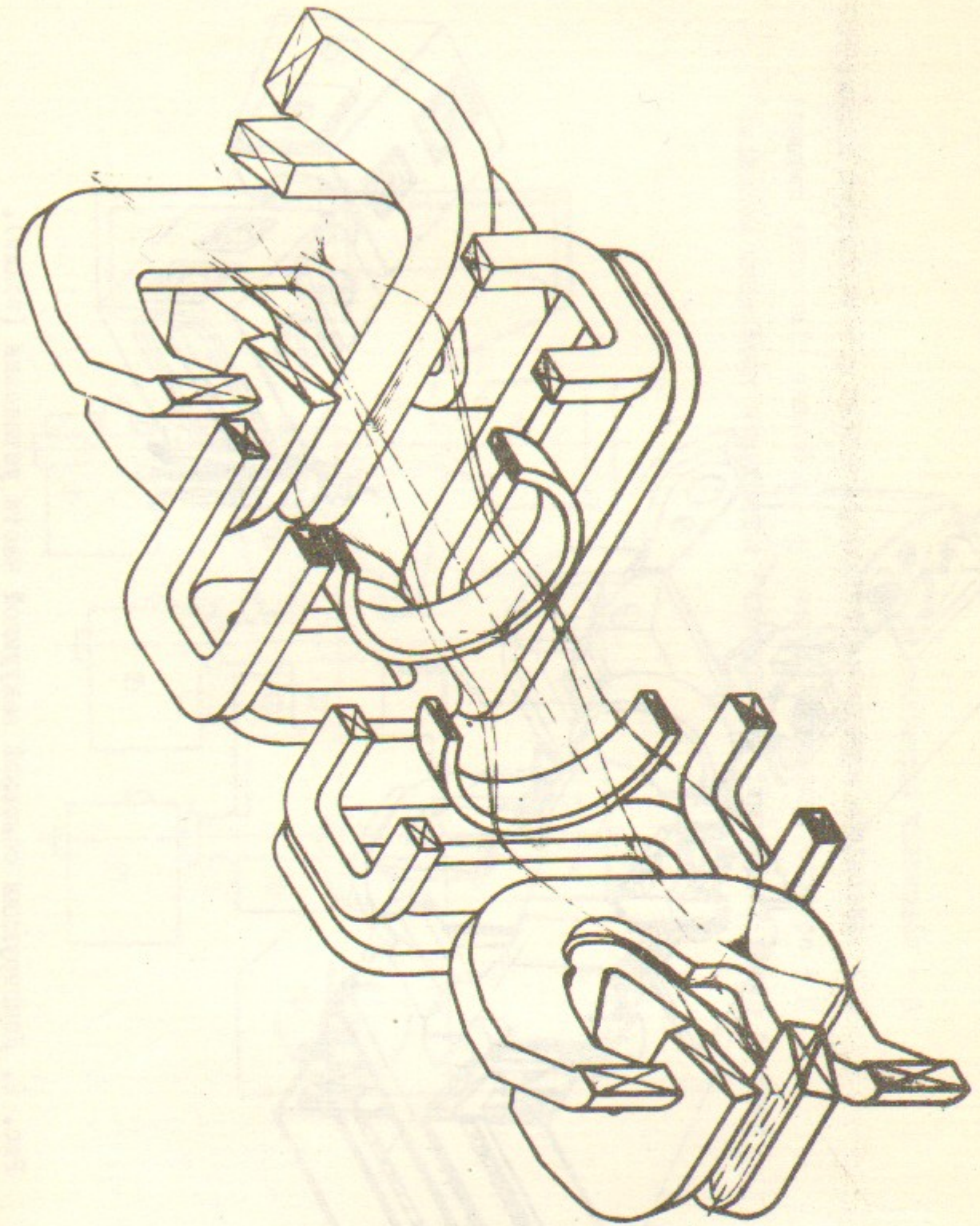


Рис. 1. Магнитная система.

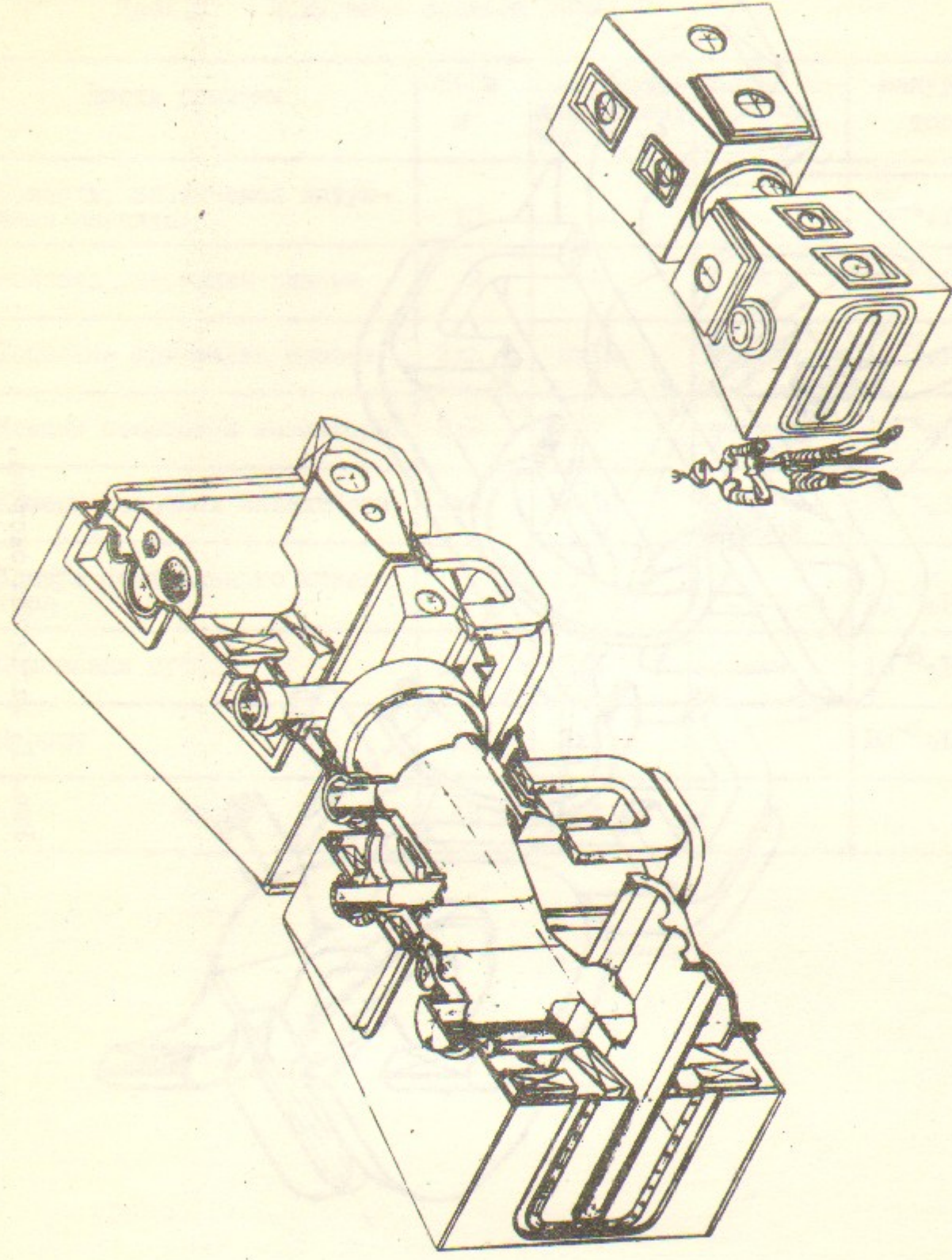


Рис. 2. Конструкция основной вакуумной части установки (эскиз).

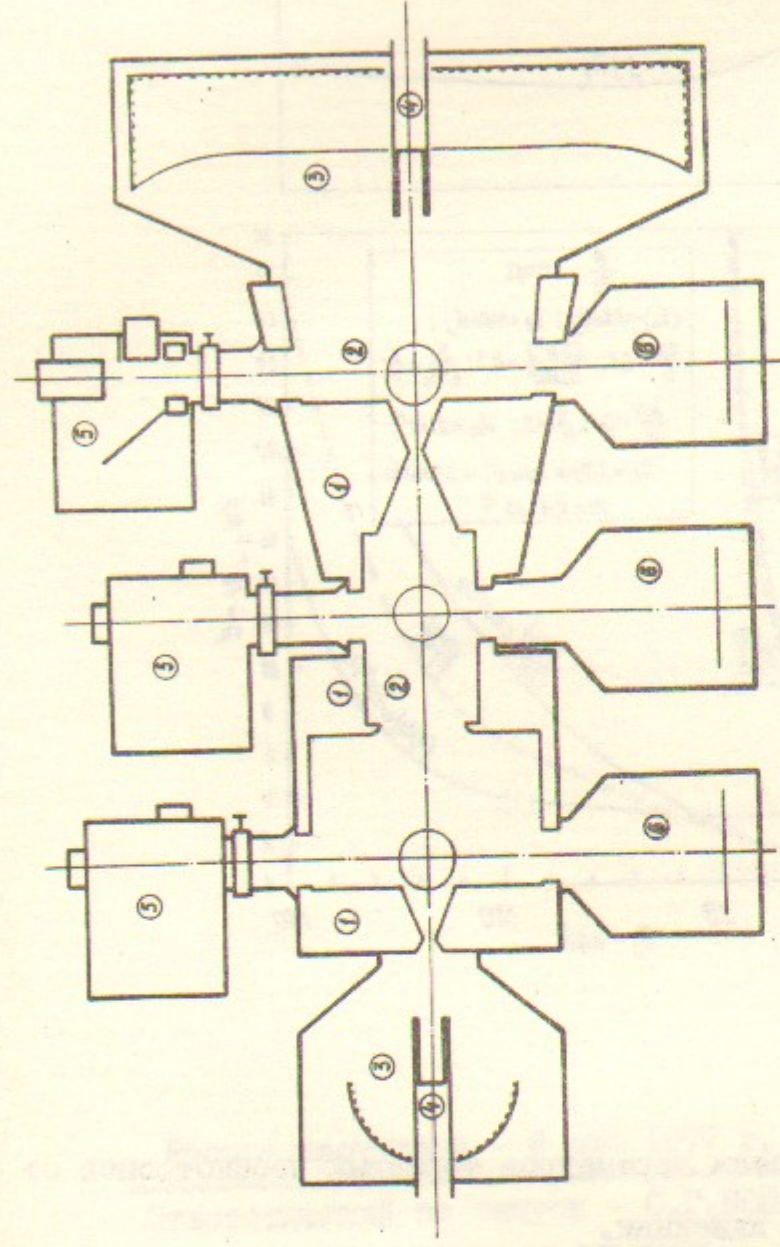


Рис. 3. Схема установки; 1 - область, занимаемая катушками магнита; 2 - область удержания плазмы; 3 - торцевые приемники плазмы; 4 - генераторы мишенной стартовой плазмы; 5 - атомарные инжекторы; 6 - приемники атомарных пучков.

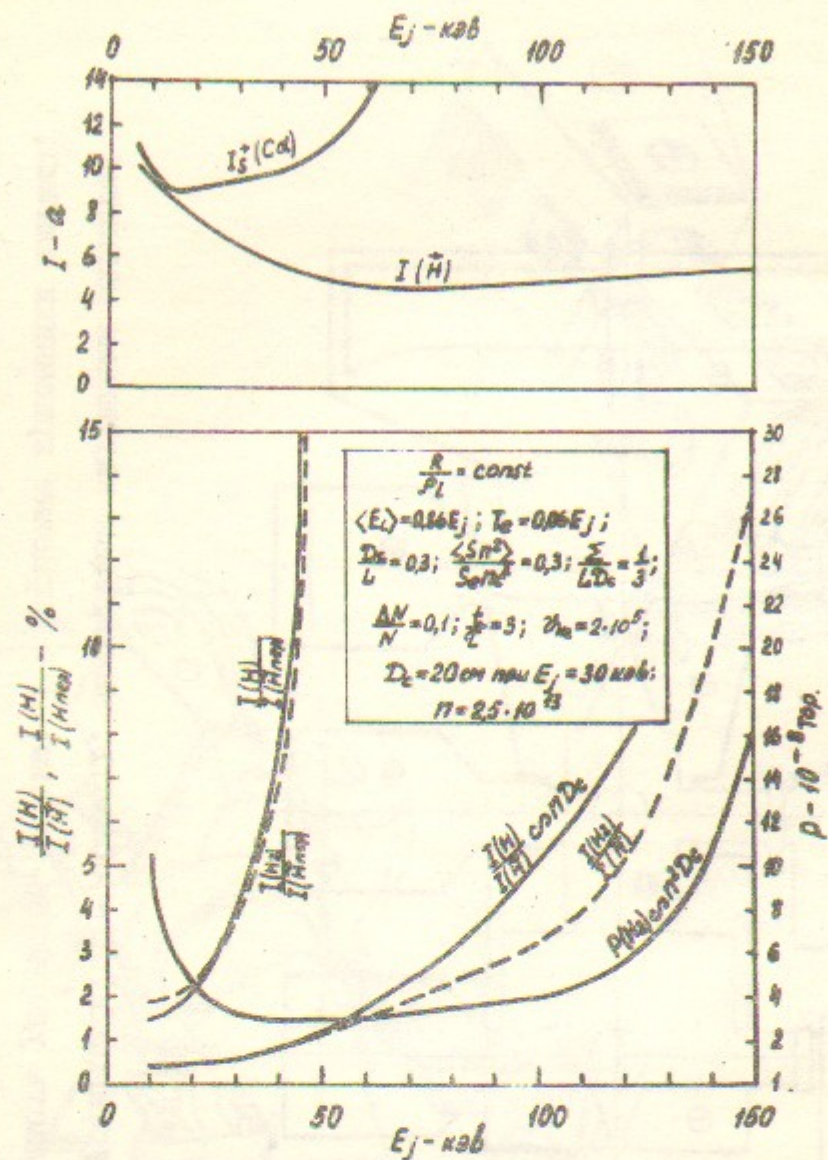


Рис. 4. Зависимости параметров торцевых пробкотронов от энергии инжекции.

Работа поступила - 6 мая 1977 г.

Ответственный за выпуск - С.Г. ПОПОВ
 Подписано к печати 21.VI-1977 г. МН 02869
 Усл. 0,9 печ.л., 0,7 учетно-изд.л. Бесплатно
 Тираж 200 экз. Заказ № 46.

Отпечатано на ротапринте ИЯФ СО АН СССР