

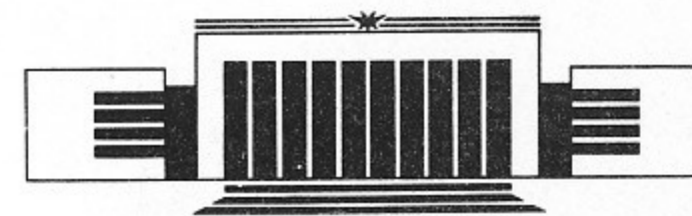


72
Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера

Г.Ф. Абдрашитов, А.С. Александров,
Е.Д. Бендер, В.И. Волосов,
Д.А. Пахомов, Ю.С. Попов,
М.В. Таубер, Ю.Н. Юдин

ИНЖЕКТОРНАЯ СИСТЕМА
УСТАНОВКИ
ВОДОРОДНЫЙ ПРОТОТИП
(ПРОЕКТ)

ИЯФ 94-101



НОВОСИБИРСК

Инжекторная система установки водородный прототип (проект)

Г.Ф. Абдрашитов, А.С. Александров, Е.Д. Бендер,
В.И. Волосов, Д.А. Пахомов, Ю.С. Попов,
М.В. Таубер, Ю.Н. Юдин

Аннотация

Рассматривается проект инжекторной системы установки Водородный Прототип (ВП). Обсуждаются требования к инжекторной системе. Дается описание основных элементов инжекторного тракта: источника ионов, нейтрализатора, сепаратора ионов, вакуумной системы магнитных экранов. Описана система поглотителя атомарных пучков.

Содержание

1	Введение	5
2	Требования к инжекторной системе ВП	5
2.1	Ток инжекции	6
2.2	Энергия быстрых атомов	6
2.3	Угол инжекции	6
2.4	Длительность инжекции	6
2.5	Частота повторения	7
2.6	Требования к магнитной экранировке	9
2.7	Требования к вакуумной системе и технологические требования	9
2.8	Схема инжекторного и приемного трактов	10
3	Инжектор	10
3.1	Источник ионов	11
3.2	Нейтрализатор (перезарядная камера)	14
3.3	Жалюзийный канал	14
3.4	Сепаратор (отклоняющий магнит)	14
3.5	Приемник сепаратора	15
3.6	Вакуумная система	16
3.7	Расчет вакуумной системы	17
3.8	Система питания	21
3.9	Магнитная экранировка инжекторного тракта	22
4	Приемник нейтральных пучков (поглотитель)	25
5	Литература	28
6	Приложение 1	29

1 Введение

В Институте ядерной физики СО РАН ведутся исследования с целью создания нейтронного технологического источника (ИН) на основе газодинамической ловушки [1, 2]. В нейтронном источнике одним из ключевых и наиболее сложных элементов установки является система инжекции быстрых атомов дейтерия и трития. По сложности и основным параметрам эта система превосходит инжекторные системы таких установок как T-15, JET и TFTR. Достаточно отметить, что этот источник должен работать в непрерывном режиме, при токах до 1 кА и энергии атомов 80–100 кэВ.

Экспериментальная установка Водородный Прототип (ВП) создается с целью моделирования основных физических процессов, идущих в ИН в режимах, когда вместо дейтерия и трития используется водород; при моделировании можно снизить требования ко многим параметрам установки по сравнению с ИН (в 2–2,5 раза). Однако, даже в этом случае инжекторная система остается достаточно сложной (и все еще близкой к системе T-15). Ниже рассматривается проект инжекторной системы (тракта) установки Водородный Прототип.

2 Требования к инжекторной системе ВП

Основным требованием к параметрам ВП является возможность моделирования процессов протекающих в ИН с модельным множителем не превышающем 2,0 (в некоторых случаях 2,5). Исходя из этого условия и были выбраны основные параметры инжекторной системы ВП (параметры ИН приведены в [2]). Общий вид прототипа приведен на рис. 1.

2.1 Ток инжекции

Необходимым параметром ВП и (ИН) является плотность горячей плазмы в точках остановки "горячих" ионов (порядка $2 - 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$). Суммарный эквивалентный ток инжекции задан на уровне 600 А. Время жизни горячей компоненты определяется временем остывания на электронах и равно ~ 10 мс, что дает необходимую плотность плазмы при данном токе инжекции. Целесообразно в начальный момент инжекции в течение 1–5 мс предусмотреть повышение этого тока в 1,5–2 раза для улучшения условий захвата атомарного пучка. Кратковременное повышение тока инжекции можно осуществить за счет включения от 6 до 8 дополнительных инжекторов, например, типа "Старт".

2.2 Энергия быстрых атомов

В проекте ИН предполагается энергия инжекции 80–100 кэВ. При этих энергиях достаточно высок нейтронный выход в $D-T$ реакции, а сечения перезарядки и ионизации позволяют реализовать достаточно эффективный захват пучка быстрых атомов. В Водородном Прототипе предлагается снизить эту энергию до 30–40 кэВ. Это существенно упрощает конструкцию и систему питания источников, а также дает возможность использовать уже имеющиеся сегодня разработки источников.

2.3 Угол инжекции

Одна из особенностей нейтронного источника на основе ГДЛ это использование эффекта пикировки плотности в точках остановки быстрых ионов. При этом инжекция быстрых атомов в ловушку ведется под углом относительно оси системы. Уменьшение этого угла приводит к возрастанию максимальной плотности в точках остановки ионов, однако по целому ряду технических причин (габаритный размер катушек, рассеянное магнитное поле и т.д.) этот угол не может быть выбран слишком малым.

Исходя из конструктивных особенностей в проекте ВП этот угол выбран равным 30 градусам.

2.4 Длительность инжекции

Нейтронный генератор в принципе должен работать в непрерывном режиме. Поэтому при моделировании его работы на установке ВП даже

в импульсном режиме желательно иметь максимально возможную длительность импульса инжекции. Эта длительность должна быть, кроме того, в несколько раз больше времени релаксации быстрой ионной компоненты в плазме. Как видно из таблицы 1 это время порядка 5–10 мс.

Рассматривались два варианта: в первом предполагалось иметь длительность инжекции порядка 0.1 секунды — время достаточное для моделирования любых достаточно медленных процессов протекающих в плазме: при этой длительности еще могут использоваться достаточно простые импульсные инжекторы. Во втором предлагается время инжекции сократить до 20 мс (или $\sim 25-35$ мс от момента включения газовых клапанов), это время в 2–3 раза больше, чем время релаксации.

Выбор рабочего варианта определяется стоимостью системы питания инжекторов. В первом варианте необходимо использовать систему высоковольтного питания инжекторов работающую непосредственно от сети, что требует использования мощных высоковольтных трансформаторов и, соответственно, целого ряда стационарных высоковольтных элементов (преобразователи частоты, выпрямители, стабилизаторы и т.д.) для каждого источника (12 источников). Эта система требует больших затрат на разработку и приобретение в промышленности этих трансформаторов и высоковольтных элементов, а также относительно больших площадей для размещения трансформаторной площадки вблизи здания ВП. Стоимость этого варианта системы питания составляет от 30 до 40% стоимости всего проекта (около 12 млн. руб в ценах 1989 г).

Во втором варианте может быть использована система питания с накопительными конденсаторами, которые размещаются вблизи установки. По оценкам стоимость этой системы питания в 5–10 раз меньше чем первый вариант. В силу изложенных выше факторов был принят второй вариант системы питания и, соответственно, время инжекции 20 мс. Краткое описание этой системы приводится ниже.

2.5 Частота повторения

Время между импульсами инжекции определяется несколькими факторами: остыванием сеточного узла инжектора, зарядкой конденсаторов блока питания инжекторов, установлением необходимых вакуумных условий во всех элементах установки. Для удобства проведения экспериментов это время не должно превышать 10 минут.

Таблица 1

Параметр	Величина	Примечание
Энергия ионов, кэВ	30	
Ток ионного пучка, А	70	
Мощность пучка ионов, МВт	2,1	
Длительность импульса, с	$2 \cdot 10^{-2}$	(до 0,1 с)
Ток разряда, кА	1,5	
Напряжение разряда, В	60	80 – 100
Ток накала, кА	1,5	до 2,0 кА
Напряжение накала, В	10 – 15	до 20 В
Оптимальная плотность тока, А/см ²	0,5	неоднородность 10 – 15%
Площадь эмиссионных щелей, см ²	144	
Число щелей	60	
Число секций электродов	5	
Начальное сечение пучка, см ²	12 × 25	
Угол расходимости, град	±2	
Угол расходимости, град	±0,5	
Выход атомарных ионов, %	82%	15% Н ₂ ⁺ , 3% Н ₃ ⁺
Оптимальное давление газа, Торр	$6 \cdot 10^{-3}$	(0,8 Па)
Газовая эффективность, %	до 60 %	В пересчете на атомарные частицы
Максим. внешн. магн. поле, эрстед	1,0 – 3,0	

2.6 Требования к магнитной экранировке

Основные элементы инжекторной системы: источники ионов, нейтрализатор, сепаратор ионов могут нормально работать лишь при условии, что внешние магнитные поля не влияют существенным образом на работу этих элементов. Для нормальной работы источника ионов (например типа ИПМ-1) допускается магнитное поле в объеме источника не выше 0,5–1 Э, источник может работать и в более высоких магнитных полях, однако при этом ухудшаются условия фокусировки атомарного пучка. Одно из основных требований к инжекторной системе — это максимально возможные токи в точке захвата на оси установки, поэтому условие 0,5–1 Э в области источника является необходимым.

Для нейтрализатора ионов желательно иметь магнитные поля также на уровне одного эрстеда. Угол поворота ионов в нейтрализаторе не должен превышать $2,0 \cdot 10^{-3}$, при этом смещение атома на оси установки порядка 2 см. Учитывая что длина пейтрализатора 100 см, для поля в 1 Э. получим угол $2,0 \cdot 10^{-3}$ в среднем и $4,0 \cdot 10^{-3}$ для максимальных отклонений ($\alpha_{\max} = l/\rho$; $l = 100$ см; $\rho = 2,5 \cdot 10^4$ см)

$$\rho = 147,5\sqrt{3} \cdot 10^4 = 2,5 \cdot 10^4 \text{ см}$$

Сепаратор ионов — магнитная система отклоняющая быстрые ионы, которые не перезарядились в нейтрализаторе. Эти ионы сбрасываются на специальную мишень, нейтрализуются на ее поверхности и затем откачиваются. Напряженность собственного магнитного поля сепаратора около 500 Э, поэтому в области сепаратора допускаются внешние поля (или искажение рабочего поля) порядка нескольких процентов от основного поля сепаратора (5–10%).

2.7 Требования к вакуумной системе и технологические требования

Одно из основных требований к вакуумной системе инжекторного тракта — это достаточно высокий вакуум на выходе из тракта (10^{-6} – 10^{-7} Торр) при условии, что ионный источник в течение 20–30 мс работает в оптимальном режиме (давление водорода в источнике 2 – $40 \cdot 10^{-3}$ Торр). Исходя из этого требования строится система дифференциальной откачки тракта. Она состоит из нескольких объемов, разделенных диафрагмами, пропускающими пучок быстрых атомов водорода, причем в каждом из этих объемов размещены достаточно мощные криогенные насосы: скорость откачки каждого из них порядка миллиона литров в секунду.

Аналогичные требования предъявляются к вакуумной системе приемного тракта. Заметная доля быстрых атомов отражается от приемных элементов с энергией в несколько килоэлектронвольт [3]. Эти атомы движутся в направлении камеры испытывая повторные отражения от стенок и теряя энергию. Для удаления этих атомов должны использоваться системы откачки типа "азотит" или аналогичные им системы, позволяющие принимать относительно большие потоки тепла на откачивающую поверхность при достаточно высокой скорости откачки ($10^4 - 10^5$ литров в секунду).

Заметим, что в ближней к камере секции откачка должна проводиться либо крионасосом с переохлажденным гелием, либо каким-либо сорбционным насосом (это может быть и криосорбционный насос и, например, "азотит"). Это требование связано с тем, что давление паров водорода над обычным крионасосом равно 10^{-6} Торр тогда как в перечисленных выше системах оно может достигать $10^{-7} - 10^{-8}$ Торр.

2.8 Схема инжекторного и приемного трактов

Суммарный эквивалентный ток инжекции необходимый для работы установки равен 600 А, поэтому требуется 12 источников типа ИПМ-1 разместить равномерно по азимуту (в оптимальном варианте). Выбран вариант размещения источников группами по три источника в 4-х инжекторных трактах.

Приемные тракты пучков выполнены по той же схеме, три пучка, от каждой группы источников, приходят на один приемник: вблизи приемника эти пучки движутся практически по одной траектории (совпадая один с другим в пространстве).

3 Инжектор

Инжектор (или инжекторный тракт) состоит из следующих основных элементов: источники ионов, перезарядные камеры, сепаратор, поглотитель ионов сепаратора, вакуумная система инжекторного тракта, система экранирования тракта от внешних магнитных полей, система питания элементов тракта.

На рис. 2 представлена схема инжектора, показана геометрия инжектируемых пучков, входных патрубков центральной камеры ВП, размеры мишенной плазмы.

Инжектор может обеспечить введение в камеру ВП трех пучков быстрых атомов водорода общей мощностью $3 \times 1,5$ МВт с энергией 30 кэВ через окно диаметром 750 мм расположенное между обмотками магнитного поля.

Инжектор имеет вакуумную камеру на торцевом фланце которой устанавливаются три ионных источника, каждый со своим юстировочным сильфонным узлом, шиберным клапаном, нейтрализатором, жалюзийным магнитным экраном и отклоняющим магнитом. Наличие шиберного клапана на каждом источнике позволяет произвести замену источника без нарушения вакуума в инжекторе. Вакуумная камера разделена диафрагмами на отсеки. В вакуумной камере располагаются также средства откачки газа и приемники отсепарированных ионов.

Источники ионов и отклоняющие магниты имеют систему внешней магнитной экранировки. Для уменьшения продольной компоненты магнитного поля в области от ионных источников до сепаратора установлены компенсирующие витки. Для уменьшения поперечной компоненты магнитного поля используются железные магнитные экраны.

Между центральной камерой ВП и инжектором установлен шиберный клапан и сильфонная развязка, позволяющая производить независимый прогрев частей установки до 200° С.

Инжектор имеет автономные системы низковольтного и высоковольтного питания для каждого источника ионов и отклоняющих магнитов.

Инжектор снабжен средствами диагностики, позволяющими контролировать работу и параметры системы.

3.1 Источник ионов

Для использования в инжекторе ВП рассматривалось два типа близких по параметрам источника.

Источник ИПМ-1М (с периферийным магнитным полем) разработанный на основе источников ИПМ и ИПМ-1, созданных ранее в ИАЭ им Курчатова, был переконструирован для изготовления в ИЯФ. Его габариты в поперечном сечении (без магнитного экрана) 360×480 мм.

Источник ИК-50, разработанный в ИЯФ в лаборатории Г.И. Димова с минимальным диаметром 500 мм (без магнитного экрана).

Было принято решение установить в инжекторе источник ИПМ, имеющий в поперечном сечении меньший габаритный размер. Это позволяет компактней расположить источники (что облегчает задачу введения трех пучков атомов в относительно небольшой входной патрубок центральной камеры ВП), проще решить задачу магнитной экранировки

источников. Кроме того, источник ИПМ имеет конструкцию электродов ионно-оптической системы, позволяющую фокусировать пучок в двух плоскостях в отличие от ИК-50, в котором фокусировка производится только в направлении широкой стороны пучка.

Схема источника ИПМ, рассчитанного на получение тока ионов до 70 А изображена на рис. 3.

Источник состоит из двух основных блоков: газоразрядной камеры (ГРК) и ионно-оптической системы (ИОС).

ГРК представляет собой охлаждаемую водой камеру из нержавеющей стали прямоугольного сечения 20 × 33 см, глубиной 12 см. На задней крышке камеры смонтирован изолированный от крышки охлаждаемый водой катодный узел состоящий из 18 прямонакальных катодов общей площадью 60 см² выполненных в виде шпилек из вольфрамовой проволоки диаметром 1 мм и расположенных в два ряда вдоль длинных сторон камеры.

Подача водорода в ГРК производится через электромагнитный клапан, расположенный также на задней крышке камеры.

Периферийная магнитная система образована с помощью постоянных магнитов в форме параллелепипедов из феррита бария, уложенных на боковых стенках камеры перпендикулярно эмиссионной поверхности и крышке камеры. Общая длина магнитов составляет 600 см. Величина магнитного поля вблизи стенки достигает 600 Гс. Площадь потерь ионов 750 см². Для увеличения эффективности разряда и доли протонной компоненты желательное использование в магнитной системе магнитов с большей индукцией, например, из сплава самарий-кобальт при использовании которых магнитное поле может быть увеличено до 2,5 кГс.

Плотность тока ионов водорода на эмиссионной границе плазмы достигает 0,5 А/см² при неоднородности менее ±10% на поверхности 300 см² (12 × 25 см). Компонентный состав извлекаемого пучка: 82% ионов Н¹⁺; 15% — Н²⁺ и 3% — Н³⁺.

Извлечение и формирование ионного пучка осуществляется с помощью многощелевой ИОС состоящей из трех электродов (эмиссионного, ускоряющего и заземленного), установленных на изоляторном узле. Каждый электрод содержит пять решеток по 12 щелей в каждой. Размер щелей в эмиссионном электроде 0,2 × 12 см. Щели расположены на поверхности 12 × 25 см и составляют полную поверхность эмиссии 144 см². Геометрия щелевой ячейки представлена на рис. 3. Прозрачность ИОС составляет 48%. ИОС обеспечивает получение ионных пучков с углом расходимости ±2° в направлении поперек щели и ±0,5° — вдоль щели.

Следует также отметить, что при формировании пучка в ИОС на электродах выделяется энергия порядка 0,5–1,0% мощности первичного ионного пучка. В связи с этим держатели решеток ИОС охлаждаются водой.

Секционирование электродов ИОС на пять частей позволяет осуществить ступенчатую фокусировку пучка в направлении поперек щелей путем сдвига в секциях решеток ускоряющего электрода по отношению к решеткам эмиссионного электрода или путем расположения секций электродов на окружности с радиусом кривизны равным фокусному расстоянию. Фокусировка пучка в направлении вдоль щелей может осуществляться за счет изгиба решеток с радиусом кривизны равным фокусному расстоянию. Фокусное расстояние получающееся при относительном сдвиге электродов определяется из выражения (см. [4]).

$$F = \frac{1.5y_0d_{ef}}{\Delta y} \quad (1)$$

где y_0 — расстояние от сдвигаемой решетки до оси пучка, Δy — относительный сдвиг электродов, d_{ef} — эффективная длина ускоряющего промежутка.

При $F = 10^3$ см, $y_0 = 10$ см, $d_{ef} = 0,7$ см, $\Delta y = 10^{-2}$ см; при $y_0 = 5$ см, $\Delta y = 0,05$ мм.

Таким образом, видно, что Δy сопоставимо с точностью изготовления и установки решеток электродов, т. е. данный метод при $F = 10$ м неэффективен.

При расположении секций электродов на окружности радиусом F эффект возможен, так как при $F = 10^3$ см и $y_0 = 10$ см угол поворота секции 10^{-2} рад (0,55 градуса). Следует отметить, что за плоскостью фокусировки расходимость пучка увеличивается по сравнению с нефокусированным пучком (дефокусировка).

Источник может работать в диапазоне давлений от $2 \cdot 10^{-3}$ до $4 \cdot 10^{-2}$ Торр. Оптимальное давление $6 \cdot 10^{-3}$ Торр (0,8 Па). Газовая эффективность источника в пересчете на атомы достигает 60% [5].

Источник чувствителен к рассеянному магнитному полю (особенно к продольному), которое нарушает однородность эмиссии. Это поле не должно превышать одного эрстеда. Для того чтобы поля токов накала и разряда, достигающие нескольких килоампер, не ухудшали однородности эмиттера, токоподводы распределены равномерно по периметру ГРК.

Блок-схема системы электрического питания ионного источника приведена на рис. 3,а. Система состоит из блоков низковольтного питания разряда и накала ионного источника, блока питания импульсного электромагнитного газового клапана и блока высоковольтного питания ИОС.

Основные характеристики источника представлены в таблице 1.

3.2 Нейтрализатор (перезарядная камера)

Нейтрализатор (перезарядная камера) выполнен в виде трубы прямоугольного сечения 15×30 см² длиной 100–20 см присоединенной к источнику ионов. Толщина перезарядной мишени на газе вытекающем из источника через нейтрализатор равна $1 \cdot 10^{16}$ мол/см² (при необходимости с дополнительной подачей водорода непосредственно в нейтрализатор в направлении источника). В нейтрализаторе происходит практически полная диссоциация ионов H_2^+ и H_3^+ ; при энергии $E_0 = 30$ кэВ образуются также протоны с энергией 15 и 10 кэВ. Эффективность преобразования протонов в атомы с энергией E_0 , $E_0/2$, $E_0/3$ равна соответственно 0,7; 0,85; 0,9. Труба нейтрализатора изготовлена из магнитно-мягкого материала и является магнитным экраном, при необходимости может быть установлен дополнительный экран. Внешнее рассеянное поле не должно превышать 1–5 Э (см. подробнее п.2 и п.3.6).

3.3 Жалюзийный канал

Последовательно с перезарядной камерой расположен жалюзийный канал, вдоль которого происходит откачка холодного газа, вытекающего из нейтрализатора. Конструктивно канал выполнен в виде прямоугольной трубы (15×30 см) с отверстиями на боковых стенках. Давление газа на участке от среза нейтрализатора до диафрагмы расположенной перед отклоняющим магнитом уменьшается до давления близкого к давлению в первом отсеке вакуумной камеры (10^{-4} Торр в конце 20 мс импульса). Прозрачность жалюзийного канала 50%, длина 50 см. Внешнее рассеянное поле в жалюзийном канале не должно превышать 1–5 Э. Жалюзийный канал является одновременно магнитным экраном с коэффициентом экранирования $K \approx 10$

3.4 Сепаратор (отклоняющий магнит)

Поворот ионного пучка (не перезарядившегося в нейтрализаторе) при сепарации производится в плоскости, где пучок имеет наибольший размер. Магнитное поле создается электромагнитом с полюсными наконечниками прямоугольной формы 196×450 см. Величина поля при зазоре 20 см составляет 0,7 кЭ при токе в обмотках $1,5 \cdot 10^4$ Ампер/витков.

Максимальные радиусы поворотов ионов с энергией 30 кэВ в поле 0,7 кЭ, рассчитанные по формуле $R(\text{см}) = 147,5 \sqrt{E(\text{эВ})}/V(\text{Гс})$, соответственно 36,5; 26 и 21 см. Средний угол отклонения траектории 45° .

Расчет траекторий отклоненных ионов с учетом рассеянных полей, а также наличия магнитного экрана сепараторов проведен численно. Расчетные траектории приведены на рис. 4. Величина внешнего рассеянного поля не превышает 50 Э.

3.5 Приемник сепаратора

Отклоненные пучки ионов вводятся в приемник сепаратора через отверстия в разделяющей отсеки перегородке. Мощность отклоненных в приемник пучков ионов составляет до 30% суммарной мощности пучков. Плотность мощности пучка с энергией 30 кэВ может достигать в районе приемника 5 кВт/см² (25 кал/см² за импульс=20 мс). При изготовлении приемных пластин из 12X18H9T температура поверхности приемных пластин поднимается на 180–200° С.

Приемные пластины желательнее изготовить из медного листа толщиной около 5 мм с напылением на них слоя титана перед каждым выстрелом. Пластины должны охлаждаться водой за время между выстрелами.

Поток протонов после отклонения в сепараторе проходит через диафрагму в секцию приемника протонов. Протоны вбиваются в приемную поверхность, охлаждаемую водой, и запыляемую перед каждым импульсом свежей титановой пленкой. Возникающее газоотделение состоит из отраженных горячих и неравновесных частиц, десорбированных молекул, и обратного выхода газа, возрастающего по мере увеличения внедренной дозы протонов. Коэффициент внедрения протонов с энергией ~ 30 кэВ составляет 0,9 – 0,96 на чистой поверхности титана. Обратный выход газа при комнатной температуре с учетом десорбции не превышает 10–15% даже при наличии одного монослоя газа на поверхности, если внедренная доза протонов не превышает 10^{19} атомов на см².

Напыление титановой пленки позволяет создать перед рабочим импульсом атомарно чистую поверхность и таким образом свести к минимуму десорбцию с поверхности. Отраженные горячие частицы не вызывают дополнительной десорбции или размножения на запыленных титаном стенках при комнатной температуре и откачиваются более эффективно, чем молекулярный водород, так как коэффициент внедрения быстрых частиц и коэффициент прилипания неравновесных частиц (атомов, ионов, возбужденных молекул) на свеженанесенной пленке титана

при комнатной температуре превышают (примерно в 10 раз) коэффициент прилипания молекулярного водорода. Газоотделение за счет обратного выхода газа может стать значительным при большой внедренной дозе протонов. Поэтому поток атомов напыляемого титана должен соответствовать потоку протонов. Из учета того, что титан удерживает растворенный в нем водород в соотношении 1 молекула H_2 на атом Ti, и принимая во внимание неравномерность запыления поверхности, а также неопределенность в распределении плотности потока протонов следует установить расход напыляемого металла в пределах 3–5 атомов Ti на 1 молекулу H_2 , что при токе протонов 60 А и продолжительности импульса инжектора 0,1 с составляет 1,5–2,5 мг за импульс. Такое количество титана напыляется дуговым испарителем в течение 150–250 мс.

3.6 Вакуумная система

Для обеспечения дифференциальной откачки газа вакуумная камера разделена на отсеки (рис. 5). Отсек 1 — отсек ионных источников и нейтрализаторов, отсек 2 — отклоняющих магнитов и транспортировки атомов, отсек 3 — отклоненных ионов и отсеки 4, 5, 6 — отсеки атомопровода. Распределение откачных средств (скоростей откачки газа) оптимизировано по отсекам и произведено в соответствии с распределением газовых нагрузок, с учетом максимально допустимых по условиям работы инжектора давлений в отсеках. Так, давление в 1 отсеке не должно превышать 10^{-4} Торр, чтобы незначительно влиять на работу источника и нейтрализатора и не увеличивать газовую нагрузку во второй отсек. Во 2 и 3 отсеках желательно иметь одинаковое давление $5 \cdot 10^{-5}$ Торр. В 4, 5 отсеках давление от $1 \cdot 10^{-5}$ Торр до $1,5 \cdot 10^{-6}$ Торр, чтобы потери пучка из-за обдирки атомов от отклоняющего магнита до входа в центральную камеру не превышали 2–3%. В 6 отсеке давление до $2 \cdot 10^{-7}$ Торр.

Откачка газа в инжекторе осуществляется двумя заливаемыми гелиевыми крионасосами, производительностью соответственно $3 \cdot 10^5$ л/с, и $2 \cdot 10^5$ л/с, и дуговыми титановыми распылителями, напыляющими пленку титана на оребренные, охлаждаемые водой панели (~ 100 м²). Это обеспечивает скорость откачки в приемнике сепаратора порядка $1 \cdot 10^5$ л/с (дополнительно к скорости откачки крионасоса 150–180 тыс. л/с).

Гелиевые крионасосы выполнены по конструктивной схеме, изображенной на рис. 6. Рабочая поверхность насоса — поверхность тороидальной трубы (нержавеющей), заполненной жидким гелием при температуре 4,2 К, экранирована стенками азотного бака и жалюзи, находящимися при температуре жидкого азота (77 К). Гелиевый и азотный питатели

вынесены в отдельный цилиндрический бак и отделены от рабочего объема вакуумноплотными перегородками, являющимися одновременно тепловыми развязками. В баке питателей, кроме вакуумной тепловой изоляции между гелиевым и азотным объемами, имеется тепловой экран, находящийся при температуре 20 К.

В каждом из отсеков 4 и 5 атомопровода инжектора установлены дуговые испарители титана в виде согнутого по кольцу титанового прутка [6]. Прохождение пучков через отсеки тракта сопровождается бомбардировкой пучком краев диафрагм и стенок отсеков. При больших плотностях потока это может привести к значительному газоотделению за счет обратного выхода газа либо к блистерингу при длительной эксплуатации. Чтобы избежать этого эффекта, диафрагмы делаются прогретыми для удаления внедренного водорода в паузах между рабочими импульсами и изготавливаются из прямонакальных лент молибдена либо ниобия.

Дуговой титановый испаритель аналогичен системе описанной ранее в работе [6] и используемой в качестве насоса на установке АМБАЛ-М. Производительность порядка $1 \cdot 10^5$ л/с с расходом титана $5 \cdot 10^{-3}$ грамм за импульс. Испаритель включается за 5 секунд до начала работы инжектора атомарных пучков, время работы испарителя 10–60 с. На рис. 5 приведена схема распределения газовых нагрузок и давлений по отсекам инжекторного тракта с учетом откачных систем.

При необходимости в отсеках 4 и 5 могут быть установлены гелиевые крионасосы близкие по конструкции к описанным выше.

3.7 Расчет вакуумной системы

1. Расчет газовых нагрузок инжектора.

При токе источника ИПМ-1 70 А, считая, что минимальная газовая эффективность 50%, определим количество молекул H_2 , подаваемых в ГРК источника. Известно, что 100 А соответствуют 9 лТорр/с молекул H_2 .

Следовательно, в источник должно подаваться, с учетом газовой эффективности, $2 \cdot 2 \times 0,7 \times 9 = 12,6$ лТорр/с, из которых 6,3 лТорр/с — вытекающие из источника холодные молекулы водорода. С учетом компонентного состава газа (82% H_1^+ , 15% H_2^+ , 3% H_3^+), количество газа должно быть увеличено на $\approx 20\%$ и составит на один источник ≈ 15 лТорр/с. На три источника подача газа составит 45 лТорр/с. При работе источников без пучка (эта стадия может длиться 5–10 мс) $Q = 45$ лТорр/с будет являться газовой нагрузкой вакуумной системы инжектора. При этом нагрузка в вакуумную камеру 1 отсека будет ≈ 40 лТорр/с, в 3 отсек

$\approx 4 \div 6$ лТорр/с. В первом приближении газовые нагрузки в отсеках распределяются пропорционально проводимостям жалюзи и коллимирующей входной диафрагмы 3 отсека, при условии, что давление в вакуумной камере 1 отсека не выше 10^{-4} Торр, в 3 отсеке не выше $5 \cdot 10^{-5}$ Торр.

При работе источников с пучком (длительность импульса — 20 мс) газовая нагрузка по отсекам инжектора распределится следующим образом:

- а) Газ из источников с возможной дополнительной подачей газа в нейтрализатор ≈ 40 лТорр/с в 1 отсек, $\approx 4 \div 6$ лТорр/с — во второй отсек.
- б) Газ от пучка ионов, отклоненных сепараторами ≈ 8 лТорр/с в 3 отсек (до 30% от пучка источника ионов).
- в) Газ от оседания пучка быстрых атомов на коллиматорах и диафрагмах $\approx 2 \div 3$ лТорр/с в 1, 2, 4, 5 отсеки (до 10% от пучка быстрых атомов). Расчет проводился на ЭВМ с учетом реальной геометрии в предположении, что коэффициент размножения равен 2.
- г) Газ от реионизованных атомов пучка, высыпавшихся на стенки отсеков в рассеянном магнитном поле установки $\approx 0.4 \div 0.6$ лТорр/с во 2, 4, 5 отсеки (2–3% пучка быстрых атомов).
- д) Прямопролетные молекулы H_2 из нейтрализаторов в центральную камеру установки $\approx 0.12 \div 0.3$ лТорр/с.

2. Расчет давлений газа в отсеках вакуумной камеры инжектора.

На рис. 5 приведена схема вакуумной системы инжектора, определенная в процессе проектирования с учетом предварительных расчетов параметров элементов вакуумной системы, с указанием газовых нагрузок в отсеках, производительности насосов, проводимостей диафрагм и объемов отсеков.

При расчете вакуумную систему можно разбить на три условно-независимые части:

- 1 — отсек с расположенными в нем источниками, нейтрализаторами и жалюзийными магнитными экранами;
- 2 — отсек приемников сепаратора;
- 3, 4, 5, 6 — отсеки атомпровода быстрых атомов.

Можно считать (с учетом опыта расчета аналогичных систем, см. [4]), что независимость первого отсека обеспечивается, если давление в вакуумной камере первого отсека не превышает 10^{-4} Торр, (при давлении в 3 отсеке не превышающем 10^{-5} Торр). Тогда отношение потока газа в вакуумную камеру первого отсека через жалюзийный экран, к потоку, поступающему во входную диафрагму третьего отсека будет примерно пропорционально их проводимостям ($G_{ж}/G_3 \approx 7$).

Независимость второго отсека определяется тем, что откачные средства отсека обеспечивают получение давления в отсеке примерно равного давлению в третьем отсеке.

При расчете давления в отсеках атомпровода существенной будет являться газовая нагрузка в 3 отсек из 1 отсека и газовая нагрузка от оседания пучка на диафрагмах и стенках отсеков, а также за счет прямопролетных молекул из нейтрализатора. При этом, как будет показано ниже, давление в 5 и 6 отсеках будет определяться в основном газовой нагрузкой от оседания пучка атомов на диафрагмах и стенках отсеков.

3. При расчете использовались следующие формулы [7].

Формула для расчета давления в баке с расположенным в нем насосом:

$$P - P_0 = \frac{Q}{S}(1 - e^{St/V}) \quad (2)$$

Формула для расчета давления в баке, не имеющем откачки:

$$P - P_0 = \frac{Q \cdot t}{V} \quad (3)$$

Формула для расчета потока газа в объем через диафрагму (отверстие)

$$Q_2 = (P_1 - P_2) \cdot G_2 \quad (4)$$

где P — давление (Торр); V — объем (л); Q — поток газа (лТорр/с); S — производительность насоса (л/с); G — проводимость диафрагмы (л/с); t — время (с); i — номер последовательно соединенных отсеков. Приближенные выражения для (2) имеют вид:

$$P = Q \cdot t / (V + S \cdot t/2) \quad \text{при } t \leq T_s \quad (2')$$

$$P = Q \cdot t / (V + S \cdot t) \quad \text{при } t > T_s \quad (2'')$$

где $T_s = V/S$ — постоянная времени откачки.

С учетом перетекания газа между соседними отсеками эти формулы имеют вид при $P_n \gg P_{n+1}$:

$$P = Q \cdot t / (V + (S + G) \cdot t/2) \quad \text{при } t \leq T_s$$

$$P = Q \cdot t / (V + (S + G) \cdot t) \quad \text{при } t > T_s.$$

Изменение давления в 1 отсеке (где установлены источники и нейтрализаторы) вычислялось для $t = 25 \cdot 10^{-3}$ с, с интервалом $5 \cdot 10^{-3}$ с и $t = \infty$, при заданных $V_1 = 4 \cdot 10^3$ л, $Q_1 = 40$ лТорр/с для двух случаев:

- а) в вакуумной камере отсека установлен крионасос производительностью $S_1 = 3 \cdot 10^5$ л/с — по формуле (2).
- б) в вакуумной камере насос отсутствует — по формуле (3).

Вычисление давления во 2 отсеке (отсек приемников отклоненных ионов) проводилось для $t = 5 \div 25 \cdot 10^{-3}$ с (с интервалом $5 \cdot 10^{-3}$ с) и $t = \infty$ при заданных $V_2 = 1,3 \cdot 10^3$ л, $Q_2 = 8$ лТорр/с для двух случаев:

- а) в отсеке установлен крионасос производительностью $S_2 = 2 \cdot 10^5$ л/с;
- б) в отсеке насос отсутствует.

Изменение давления в 3, 4, 5, 6 отсеках атомпровода определялось для $t = 0 \div 25 \cdot 10^{-3}$ с (с интервалом $5 \cdot 10^{-3}$ с) и $t = \infty$, при заданных объемах отсеков, производительности насосов, проводимостях диафрагм, газовых нагрузках от оседания пучка и прямопролетных молекул из нейтрализатора.

Вычисления проводились в режиме работы инжектора без пучка и с пучком, а также для двух случаев:

- а) с установленными согласно схеме средствами откачки в отсеках;
- б) без насосов в отсеках.

На рис. 5 приведена схема распределения газовых нагрузок и давлений по отсекам инжекторного тракта с учётом откачных систем полученная в результате данных аналитических расчетов. Таким образом имеется два возможных режима работы:

1. При наличии встроенных криогенных насосов выполнены все требования, необходимые для нормальной работы установки при временах инжекции более 25 мс (до стационарного режима).
2. При отсутствии криогенных насосов те же условия (давление в нейтрализаторе, степень ренейтрализации пучка по длине, давление газа в камере) выполняются только в течение 10–15 мс.

3.8 Система питания

В технологической части проекта ВП предполагается разработка источников питания для обмоток магнитного поля и системы инжекции. Электрический комплекс должен состоять из определенного набора квазистационарных выпрямителей, обслуживающих “медленные” катушки магнитной системы с питанием от сети 10 кВ 50 Гц и импульсных блоков для пробочных катушек, реализуемых с помощью емкостных накопителей. Для питания инжекторов — из высоковольтных блоков, формирующих импульсы до 40 кВ с $\tau = 20$ мс. Для разогрева катодов газовых разрядов плазменных эмиттеров инжекторов требуются низковольтные источники питания имеющие разделительную изоляцию относительно земли порядка ≈ 40 кВ.

Катушки медленного магнитного поля имеют собственное время $\cong 4$ с и запасают энергию порядка 200 МДж, а в стационарном режиме полная мощность питания ≈ 40 МВт. Для реализации питания катушки предлагается уже опробованный в ИЯФ вариант выпрямителя на 20 МВт с выходным напряжением до 850 В и током 25 кА, в состав которого входят: понижающий трансформатор с расщепленными вторичными обмотками и тиристорные мосты. В системе питания “медленных” катушек необходимо иметь два таких блока. Для изменения магнитного поля по условиям эксперимента используются встроенные в трансформатор ступенчатые переключатели, а в пределах ступеней — фазовый принцип регулирования тиристорных мостов, что позволяет понизить влияние преобразователей на качество энергии в энергосистеме. Питание “быстрой” пробочной катушки осуществляется от емкостного накопителя.

Для формирования пучка нейтралов необходим импульс напряжения +40 кВ в течение 20 мс с пульсацией на полке $\approx 1\%$. Полезный запас энергии в накопителе при этом 64 КДж. Обычно для формирования импульса используется длинная линия с повышающим трансформатором. В нашем случае выбран несколько иной подход, т. е. используется емкостной генератор напряжения, в котором изменение напряжения составляющих его конденсаторов при разряде компенсируется схемой вольтодобавки. Количество секций, компенсирующих разряд емкостного генератора, — 16, что и определяет величину пульсаций напряжения на выходе на уровне 5%. С помощью дополнительного фильтра пульсация понижается до 0,5%. Подключение инжектора к блоку питания осуществляется с помощью тиристорных ключей с характерным временем порядка микросекунд.

Образование плазмы в камере источника происходит за счет зажи-

гания газового разряда с накаливаемыми катодами, для разогрева которых необходима энергия порядка 60 кВт при токе ~ 3 кА и $U = 20$ В. В момент инжекции катоды и конструктивные узлы источника оказываются под напряжением +40 кВ относительно "земли". Существует еще одна особенность в режиме работы катодов — это различные режимы тренировки по обезгаживанию как в начале рабочего цикла, так и перед каждым выстрелом. Катоды каждого источника разделены на две группы, для питания которых используются отдельные блоки мощностью до 30 кВт.

Для поддержания газового разряда в камере источника инжектора в течение 20 мс необходимо иметь источник с параметрами: выходное напряжение 120 В; ток 1 кА. В этом случае в качестве источника питания используется длинная линия, которая согласуется с нагрузкой через трансформатор. Требования к конструкции трансформатора упрощаются, так как и линия и трансформатор располагаются на потенциале источника +40 кВ. При этом несколько усложняется заряд конденсаторов линии, так как он осуществляется через разделительный высокочастотный трансформатор, но в целом конструкция блока при этом упрощается. Блок-схема питания ионного источника приведена на рис. 7.

3.9 Магнитная экранировка инжекторного тракта

Как уже отмечалось выше, для нормальной работы источника ионов и перезарядной камеры необходимо снизить внешние магнитные поля до уровня порядка одного эрстеда; в сепараторе до 5–10 Э. Подобная проблема существует практически для всех инжекторных систем в магнитном УТС, однако в данном случае условия экранировки много сложнее чем в обычных системах. Это связано с тремя факторами:

- 1) Магнитная система установки ВП (как и любой другой открытой ловушки) имеет достаточно большой магнитный момент ($L = 10$ м, $H \sim 10 - 200$ кЭ) — в отличие от токамаков, где этот момент практически отсутствует.
- 2) Угол инжекции равен 30° , т. е. инжектор максимально приближен к магнитным катушкам одной из пробок магнитной системы.
- 3) Пробочное отношение $R \sim 20$, магнитное поле в пробках ~ 200 кЭ.

Два последних фактора приводят к необходимости экранировать инжекторный тракт от полей порядка 0.3 – 0.6 кЭ, причем как от перпендикулярных оси тракта H_{\perp} , так и параллельных тракту H_{\parallel} . В области

сепаратора поперечная компонента внешнего поля имеет величину сравнимую с собственным полем в зазоре сепаратора, что может вносить существенные искажения в траектории частиц. В области источника ионов ($R_i = 8$ м, R_i — расстояние вдоль оси тракта от центра ловушки) внешнее поле меньше ($H_{\parallel 0} \cong 200$, $H_{\perp 0} = 162$) (см., рис. 9), но обе компоненты поля существенно превышают поля допустимые при нормальной работе источника. Необходимость экранировки перезарядной камеры очевидна, так как поперечные поля превышающие 0,5–1,0 Э на этом участке приведут к заметным потерям пучка на стенках вакуумной камеры. Все это требует, как будет видно ниже, использования комбинированных методов экранирования.

Рассмотрим сначала возможность экранировки тракта с использованием только пассивных (железных) экранов. Оценим коэффициент экранирования. Необходимо учитывать, что при наличии продольных магнитных полей, (вдоль оси тракта), железные экраны, выполненные в виде прямоугольных труб сечением 15×30 см и длиной 200 см, намагничиваются за счет этой компоненты; причем $H_{i\parallel}$ (поле в железе) приблизительно равно $H_{0\parallel}$ — полю вне железа. За счет этого поперечная компонента поля экранируется с коэффициентом K_{\perp} равным [8]:

$$K_{\perp} = 1 + \frac{\mu_{\perp} \Delta}{D} = 1 + \frac{B_{\max}}{H_{\parallel}} \frac{\Delta}{D}$$

при $D = 15$ см; $\Delta = 1$ см; $B_{\max} = 15 \cdot 10^3$ и $H_{\parallel} = 0,2 \cdot 10^3$ получим $K_{\perp} \approx 6$. Эта формула справедлива только для однородного внешнего поля, перпендикулярного к экрану. Численный расчет для реальных полей (неоднородное, неперпендикулярное оси поле) дает для K_{\perp} коэффициент экранирования не превышающий 2.

Попытка численно рассчитать двойной экран оказалась неудачной из-за слишком большой погрешности счета. Однако даже наиболее оптимистичная оценка

$$K_{2\perp} \approx K_{\perp}^2$$

дает коэффициент K_{\perp} не более 36. При $H_{0\perp} \approx 200$ Э, это дает ≈ 6 Э в источнике, что неприемлемо для гарантированной работы источника.

Заметим, что в этом случае:

$$H_{i\perp} = \frac{H_{0\perp}}{K_{2\perp}} \sim H_{0\perp} \cdot H_{\parallel}^2 \sim H_0^3$$

т.е. очень сильная зависимость от амплитуды внешнего поля. С другой стороны, следует заметить, что $H_{i\parallel} \approx H_{\parallel}$, т. е. продольное поле практически не экранируется.

Существует возможность увеличить K_{\perp} , увеличивая толщину стенок экрана до 2–3 (и даже 5) см. Однако, хотя это и дает квадратичный эффект и при величине Δ порядка 3 см величина K_{\perp} становится почти приемлемой, но экраны уже не размещаются между пучками и их надо выносить за общую апертуру пучков. При этом величина K_{\perp} падает на порядок ($\sim D$), т. е. опять не выполняется условие $H_{\perp} \leq 1,0 \text{ Э}$. В этом варианте существенно усложняется откачка жалюзийного участка тракта. Поэтому необходимо рассмотреть другой (более сложный) вариант экранировки — с использованием компенсирующих витков.

Наиболее опасной является продольная компонента магнитного поля. Особенность этой компоненты в том, что она сама по себе полезна для проводки пучка ионов в перезарядной камере, однако из-за того, что она насыщает железный экран (или существенно снижает μ) экранирование поперечной компоненты поля становится малоэффективным. Поэтому наиболее рационально компенсировать токовыми витками именно продольную компоненту поля; поперечная компонента при этом хорошо экранируется железными экранами. Компенсирующие витки размещаются вблизи фланцев инжекторного бака (см. рис. 2). Величина тока в этих витках фиксирована (“квантована”) поскольку очевидно, что эти витки следует включать последовательно с основными катушками магнитной системы. Очевидно также, что продольную компоненту поля необходимо закомпенсировать достаточно точно (порядка 0,5% от величины внешнего поля). В связи с этими компенсирующее магнитное поле на оси тракта определяется только геометрическими размерами витков и их расположением. Схема размещения этих витков (катушек) представлена на рис. 8. Четыре катушки диаметром 2,3 м, содержащие по 2 витка шины 25 × 50 мм, размещаются снаружи вакуумной камеры, между переходными фланцами; среднее расстояние между ними 1,2 м. Полный ток в катушках 25 кА (2 × 12,5 кА), питание осуществляется от единого для всей магнитной системы источника.

Среднее магнитное поле на оси инжекторного тракта, направленное вдоль оси тракта (H_{\parallel}) при включенных компенсирующих витках, лежит в пределах 4–6 Э, однако амплитуда поперечной составляющей поля после компенсации остается достаточно большой. Для экранирования поперечной составляющей поля был численно рассчитан одиночный магнитный экран размером 160 × 310 × 2000 мм со стенкой толщиной 15 мм (размер этого экрана равен размеру перезарядной камеры с некоторым превышением по поперечному размеру для размещения внутреннего экрана). Как видно из расчета поперечное поле ослабляется этим экраном более чем в 20 раз. Поскольку при расчетах экран разбивался на 160

ячеек то результат расчета является приближенным, на графике видна структура этих ячеек; для оценок можно считать что среднее поле может быть верхней границей для поля внутри экрана. Заметим, что среднее продольное магнитное поле внутри экрана также снижается до уровня $\sim 2 \text{ Э}$.

На рис. 9 приведены поля внутри экрана полученные при этом расчете ($H_{\perp 1}$ $H_{\parallel 1}$). Второй экран, установленный внутри первого, по оценкам дает ослабление не менее 50–100. Система с двумя экранами не просчитывалась численно, из-за малой точности расчета многосвязной системы и большого времени счета. Некоторое превышение по коэффициенту экранирования (в 3–5 раз), которое дает эта система, необходимо так как при расчетах не учитывался ряд факторов снижающих эффект экранировки: близкое расположение нескольких магнитных экранов (в расчетах рассматривался одиночный экран), неидеальность компенсирующих витков, краевые эффекты вблизи торцов экранов.

4 Приемник нейтральных пучков (поглотитель)

На рис. 10 представлена схема приемника нейтральных пучков, показана геометрия вводимых в приемник пучков, геометрия выходных патрубков центральной камеры установки.

Приемник рассчитан на прием пучков мощностью до 4,5 МВт в рабочем режиме и прием пучка мощностью до 1,5 МВт (без плазмы в центральной камере установки) в режиме отладки инжектора.

Вакуумная камера приемника выполнена из одинаковых с инжектором по внешним габаритам цилиндрических баков. Приемник, также как и инжектор, подсоединен к центральной камере через шиббер и сильфонную развязку. Приемник разделен на 3 отсека диафрагмой и жалюзийной перегородкой, уменьшающей проводимость по сравнению с диафрагмой, имеющей равную площадь сечения, в 10 раз. Прием пучков осуществляется на приемный конус, покрытый слоем титана и охлаждаемый водой в промежутках между импульсами. Максимальная плотность потока на приемном конусе 600 Вт/см². Диафрагмы выполнены из титана (тонкого на краях).

Камера приемника пучков разделена на 4 отсека перегородками. В каждом из отсеков установлены дуговые испарители титана, аналогичные

кольцевым испарителям в камере инжектора. Прием пучков осуществляется на находящийся в дальнем отсеке приемный конус, запыляемый титановой пленкой в промежутках между импульсами инжектора. Конус должен иметь конструкцию, допускающую охлаждение а также прогрев с целью предварительного обезгаживания и очистки поверхности. Для напыления конуса установлен дополнительный испаритель титана. Периодическое напыление титановой пленки позволяет избежать возрастания обратного выхода газа.

Внутренняя поверхность цилиндрических баков и перегородок отсеков инжектора и приемника пучков покрыта продольными ребрами, увеличивающими сорбирующую поверхность в 3 раза. Это позволяет во столько же раз увеличить сорбционную емкость и скорость откачки по водороду. Распыление титана осуществляется дуговыми испарителями в течение импульсов вакуумного дугового разряда продолжительностью 200–300 мс, при токе 250–300 А. При этом за один импульс распыляется 2–3 мг титана. Максимальная сорбционная емкость титановой пленки с учетом неравномерности напыления и других факторов составляет 0,3 молекул H_2 на атом Ti , с другой стороны как угодно толстая титановая пленка не может поглотить более одного монослоя газа. Поэтому наиболее оптимальным является режим напыления трех монослоев титана в течение серии повторяющихся импульсов дуговых испарителей и длительной паузы, включающей рабочие импульсы инжекторов и последующую откачку поступившего в вакуумную камеру газа.

Сорбирующая оребренная поверхность в отдельных отсеках составляет 20–40 м² и может быть полностью покрыта тремя монослоями титана, соответственно за 20–35 импульсов дуговых испарителей. При этом сорбционная емкость каждого отсека составит 6–12 лТорр, что в 30–120 раз превышает необходимую для откачки газа в каждом отсеке (от 0,05 до 0,4 лТорр за один импульс инжектора). Это позволяет работать в режиме меньшего числа импульсов (1–3), либо более редкого напыления титановой пленки, либо комбинации этих режимов в зависимости от условий эксплуатации.

Схема распределения газовых нагрузок и давлений по отсекам приемника приведена на рис. 11.

Откачка газа во 2 и 3 отсеках производится сорбирующими панелями охлаждаемыми водой, площадь панелей $5 \cdot 10^5$ см² в каждом отсеке. Распыление титана осуществляется импульсными дуговыми распылителями титана (аналогичными установленными на АМБАЛ-М). Скорость откачки по водороду не менее $5 \cdot 10^5$ л/с. Пыление титана производится также на приемный конус. Распылители включаются за 5–10 секунд до

импульса инъекции на время 0,1–1,0 с. Расход титана за импульс 0,01 гр. Ресурс распылителя до 1000 выстрелов.

5 Литература

1. В.В. Мирнов, В.П. Нагорный, Д.Д. Рютов. Газодинамическая ловушка с двухкомпонентной плазмой; препринт ИЯФ СО АН 84-40, Новосибирск 1984.
2. И.А. Котельников, Д.Д. Рютов, Ю.А. Цидулко и др. Математическая модель источника нейтронов на основе газодинамической ловушки; препринт ИЯФ СО АН 90-105, Новосибирск 1990.
3. R. Verish, Journal de physique, supplement au N 8, V.38, aout.1977, p.3-43.
4. Н.Н. Семашко, А.Н. Владимиров, В.В. Кузнецов и др. Инжекторы быстрых атомов водорода, М.: Энергоиздат, 1981, (Серия проблемы УТС).
5. А.А. Панасенков, С.А. Равичев, А.В. Рогов ВАНТ, серия ТС, 1984, вып. 2, (т.5), с.56-63.
6. Е.Д. Бендер Дуговые испарители титана для вакуумной установки АМБАЛ-Ю. ВАНТ, Сер.: Термоядерный синтез, 1987, вып 4. с.41-49.
7. А.А. Глазков, Г.Л. Саксаганский. Вакуум электрофизических установок и комплексов, М.: Энергоатомиздат, 1985.
8. Г. Каден. Электромагнитные экраны, М.-Л.: Госэнергоатомиздат, 1957.

6 Приложение 1

Обсуждение альтернативного варианта компоновки инжекторного тракта.

Одним из возможных вариантов компоновки инжекторного тракта является конструкция аналогичная конструкциям размещения инжекторов на установках 2XIB и TARA [1, 2]. На этих установках инжекторы размещались на вертикальном вакуумном баке диаметром $\sim 1,8$ метра и высотой ~ 3 метра. Инжекторы осуществляли инъекцию в боковые пробкотроны через инжекторные каналы, расположенные между этим баком и объемом пробкотрона, причем каждый пучок проходит через свой канал. Рассматривалась возможность использовать аналогичную конструкцию на установке ВП.

Основные преимущества этого варианта конструкции:

1. Увеличение объема первого отсека, что дает возможность увеличить время работы инжектора без откачки в динамическом режиме.
2. Дешевизна конструкции.
2. Легкая смена и установка криопанелей.

При использовании этого варианта в эксперименте ВП существенное значение имеет ряд его недостатков, которые проявляются в связи с рядом особенностей конструкции и условий работы установки ВП. Отметим следующие из них:

1. Существенное усложнение конструкции при не очень большом увеличении объема. Из-за сложности размещения в зале 1-го блока диаметр бака не может быть больше 2,0–2,2 метра. С другой стороны вертикальные баки перекрывают доступ к основной диагностической зоне; они требуют очень высокой точности изготовления фланцев расположенных под углом к поверхности баков (угол по высоте и по азимуту), что затруднено в условиях производства ИЯФ.
2. Невозможность юстировки трех пучков одновременно (на каждом баке в этом случае базируется две сборки по 3 пучка). Можно решить эту задачу разбив вертикальные баки на два и осуществляя юстировку за счет независимого перемещения каждого бака, но в этом случае теряются преимущества отмеченные в пп.2 и 3.
3. Вакуумные условия в случае использования вертикального большого бака и узких разделяющих каналов хуже, чем в случае использования секционированной системы рассматриваемой в данной

работе. Секционированная система (здесь 6 секций) имеет ряд преимуществ: дифференциальная откачка позволяет получать в квазистационарном режиме много лучший вакуум; в режиме отсутствия насосов в динамическом режиме время работы до момента критического ухудшения вакуума существенно увеличивается.

4. При использовании вертикальных баков экранировка от внешних магнитных полей становится практически невозможной, из-за отсутствия решений по размещению компенсирующих витков.

Совокупность этих аргументов однозначно определяет выбор варианта с продольным расположением баков инжекторного тракта, т. е. варианта рассмотренного в данном проекте.

1. Simonen T.C., Clauser J.A., Coensgen F.H. et al. Nucl. Fusion. Supplement 1979, "Plasma Physics and CNF Research" 1978, 7th Conf. Proceedings, (Innsbruck, 23-30 Aug. 1978), IAEA, Vienna, 1979, v.II, p.389.
2. Post R.S., Brau K., Casey J. et al. Gas Pressure Measurement and Control in the Tara Tandem Mirror Experiment. PFC/CP-86-17 DOE/ET-51013-202.

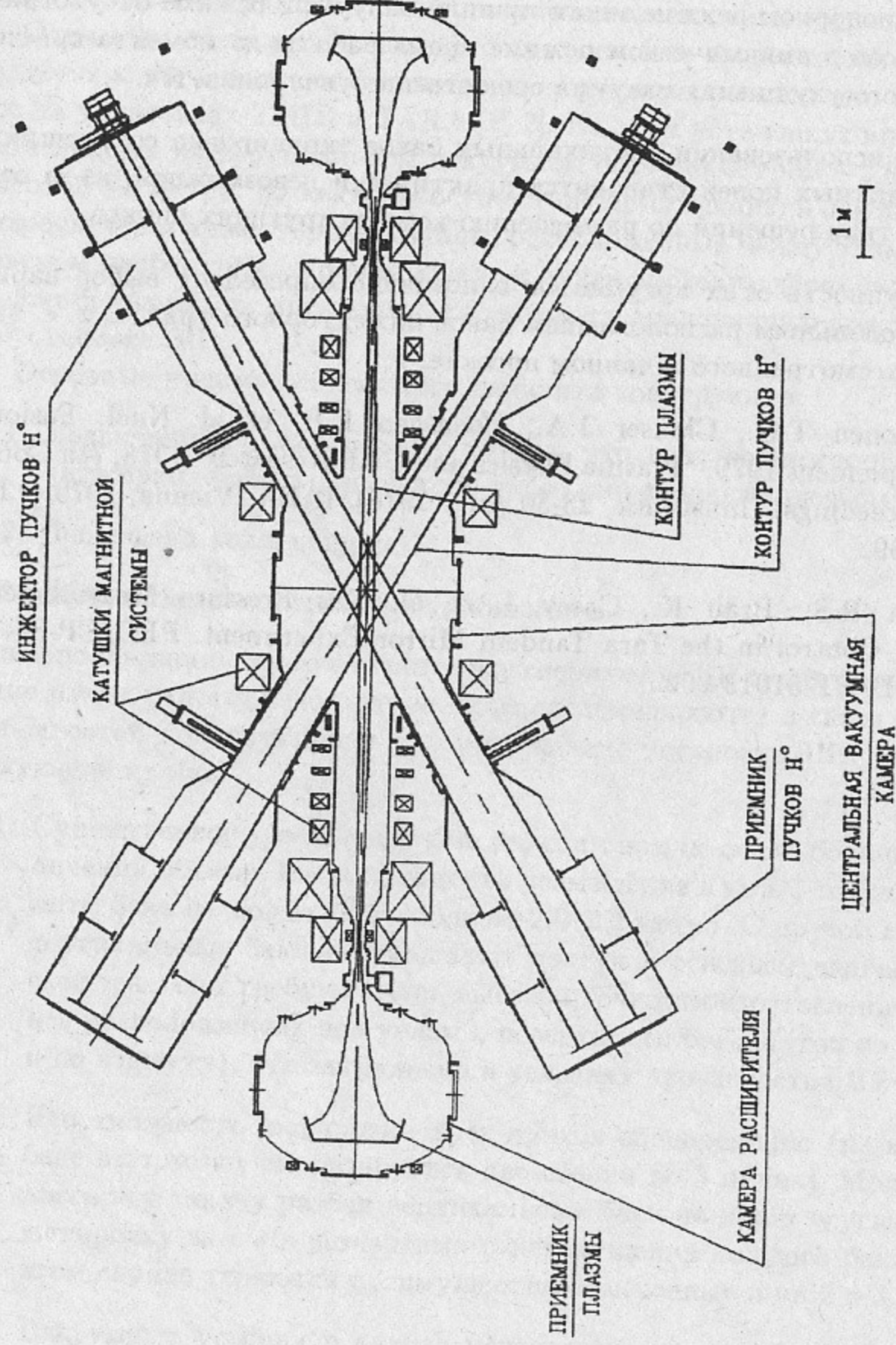


Рис. 1. Общий вид установки ВП.

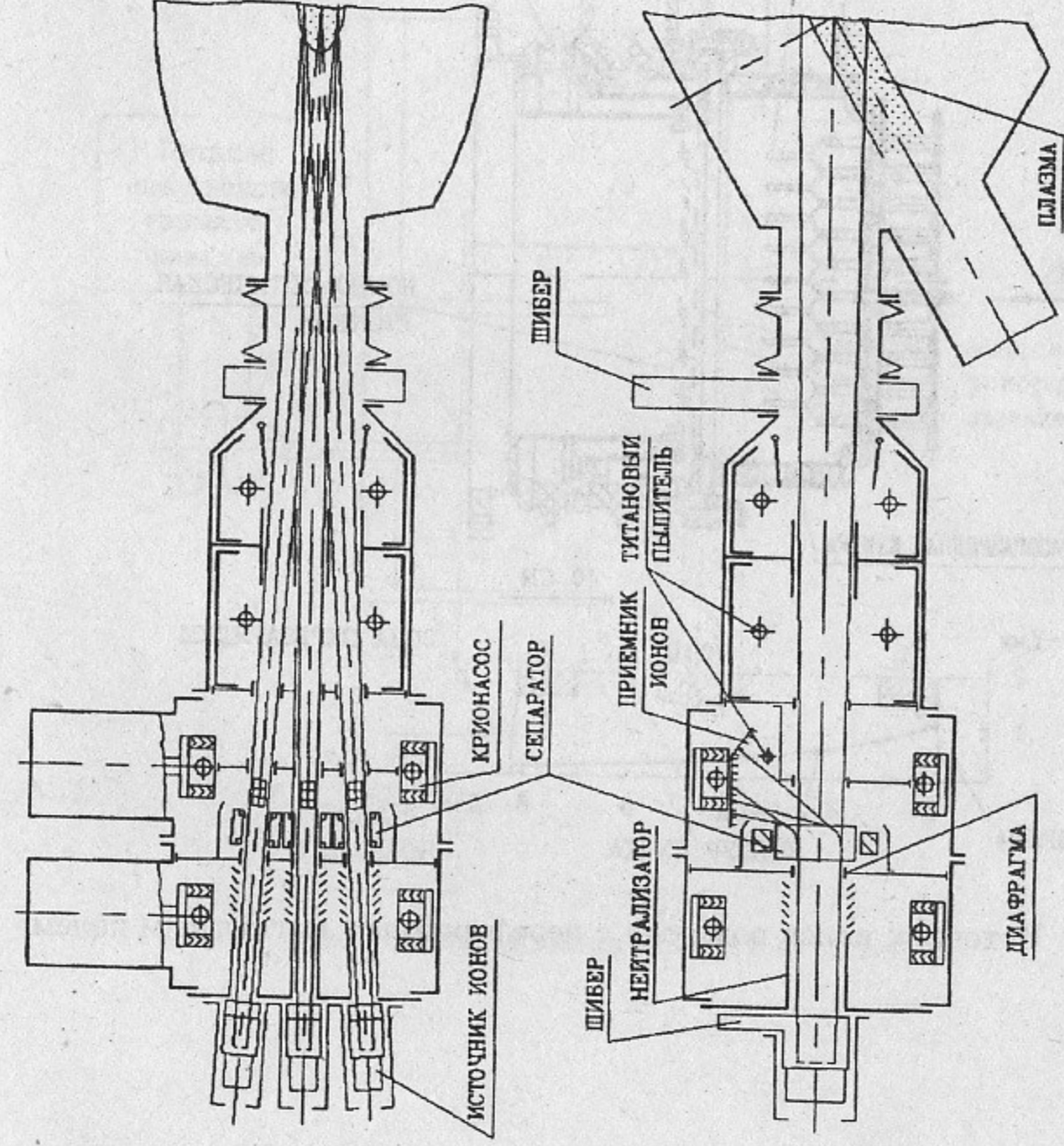


Рис. 2. Схема инжекторного тракта ВП.

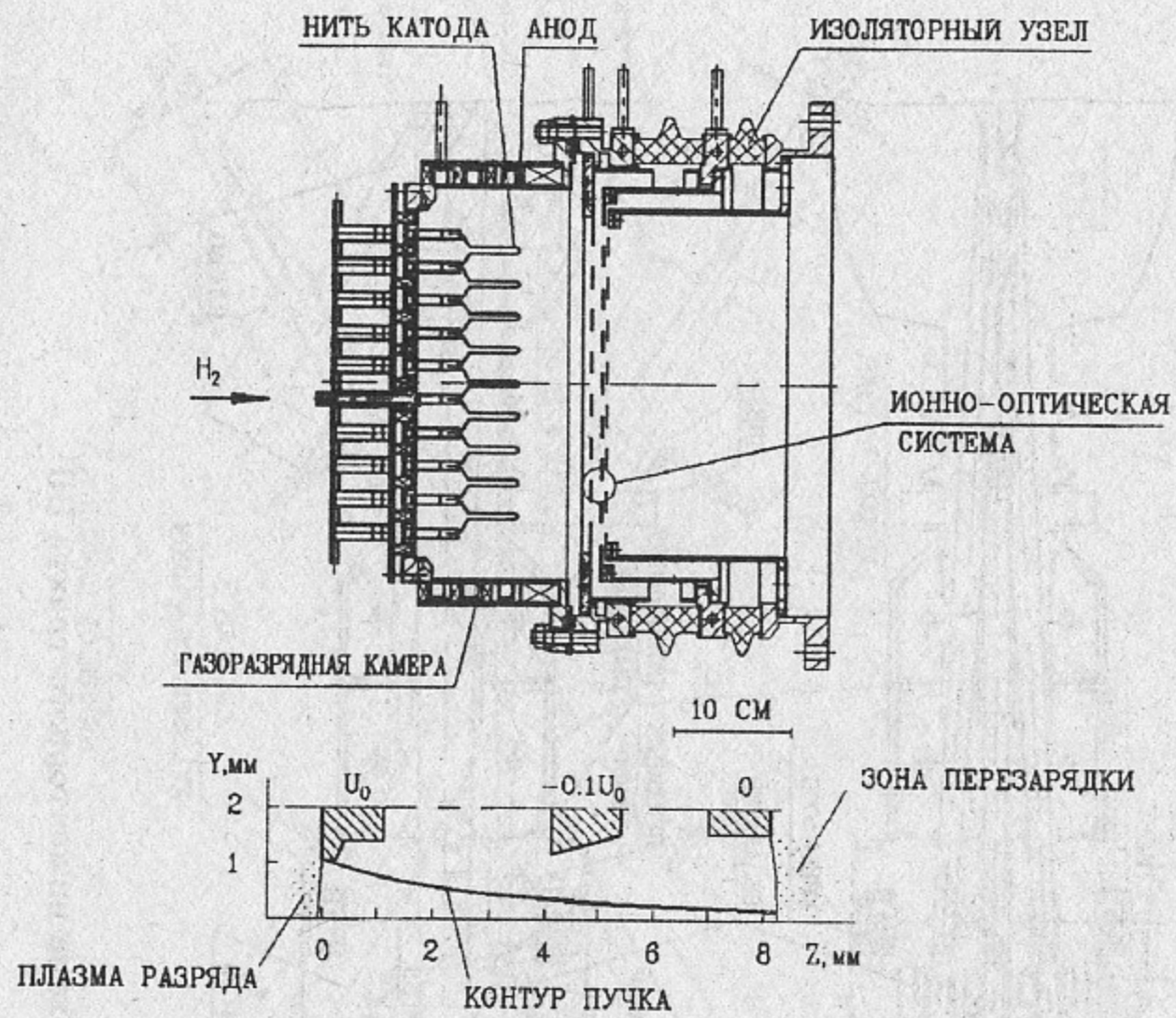


Рис. 3. Источник ионов водорода с периферийным магнитным полем.

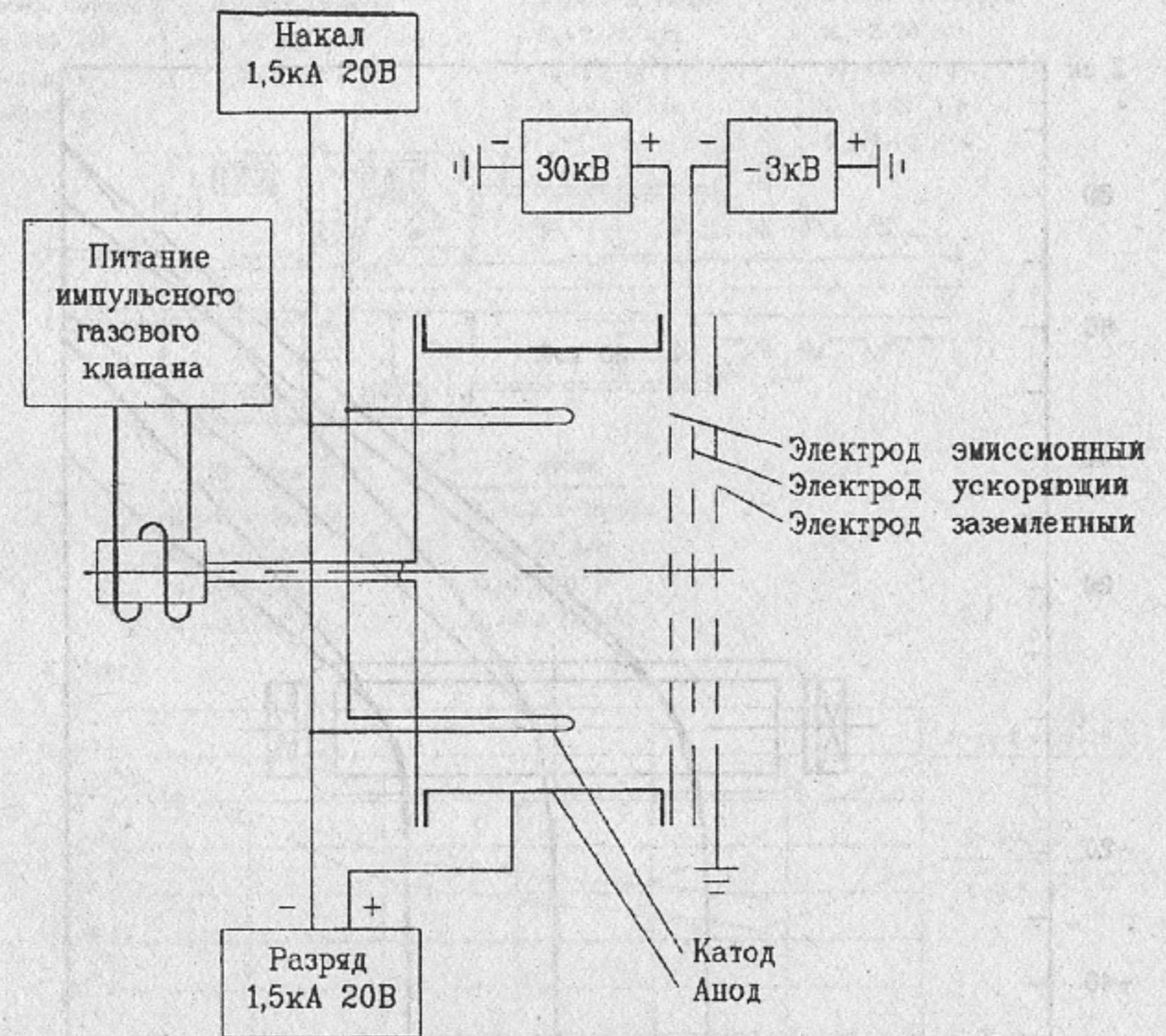


Рис. 3,а. Блок схема питания ионного источника.

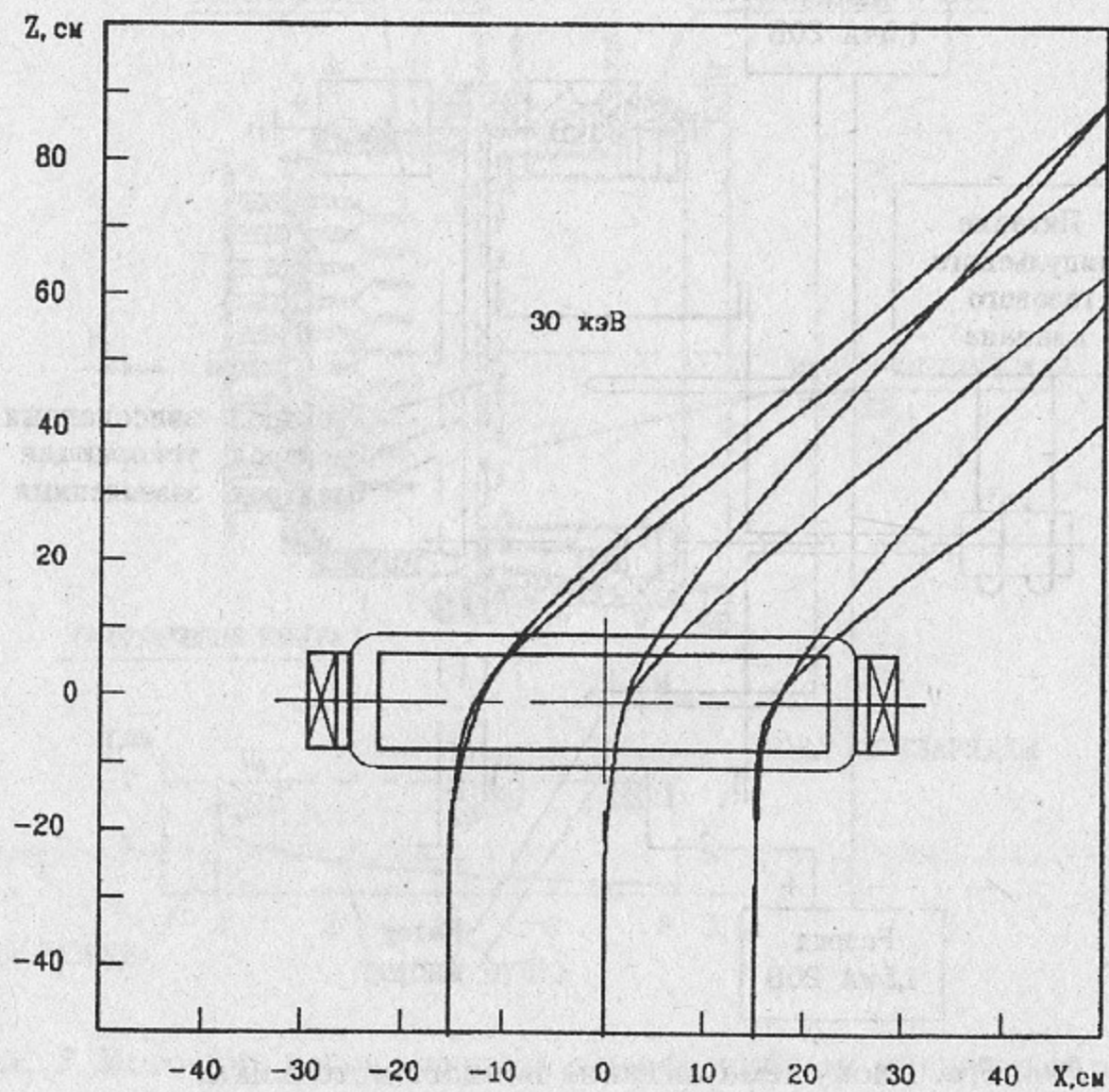


Рис. 4. Расчетные траектории ионов в сепараторе.

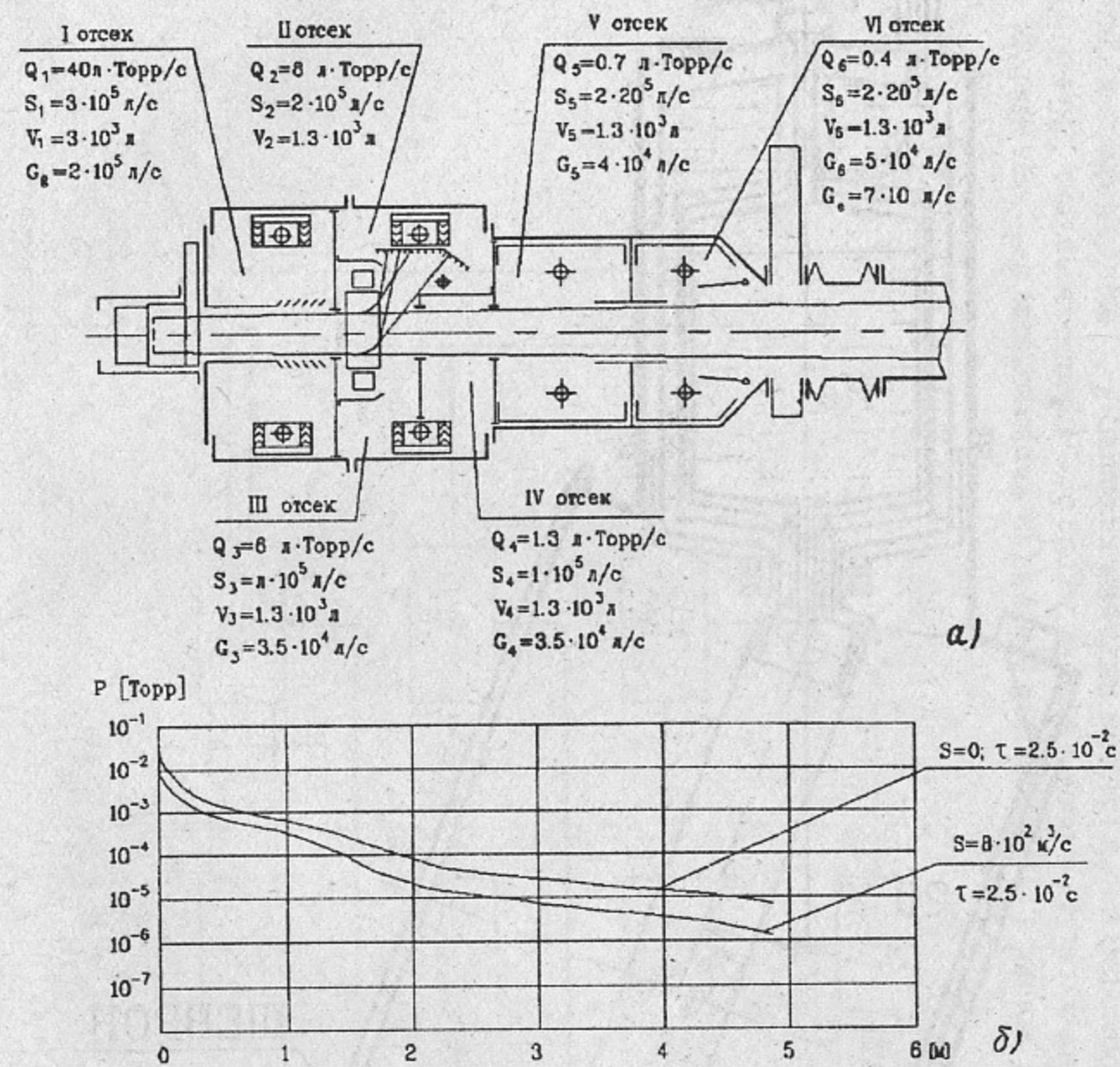


Рис. 5. Вакуумная схема инжекторного тракта: а — схема распределения газовых нагрузок по отсекам инжекторного тракта; б — схема распределения давлений по отсекам инжекторного тракта.

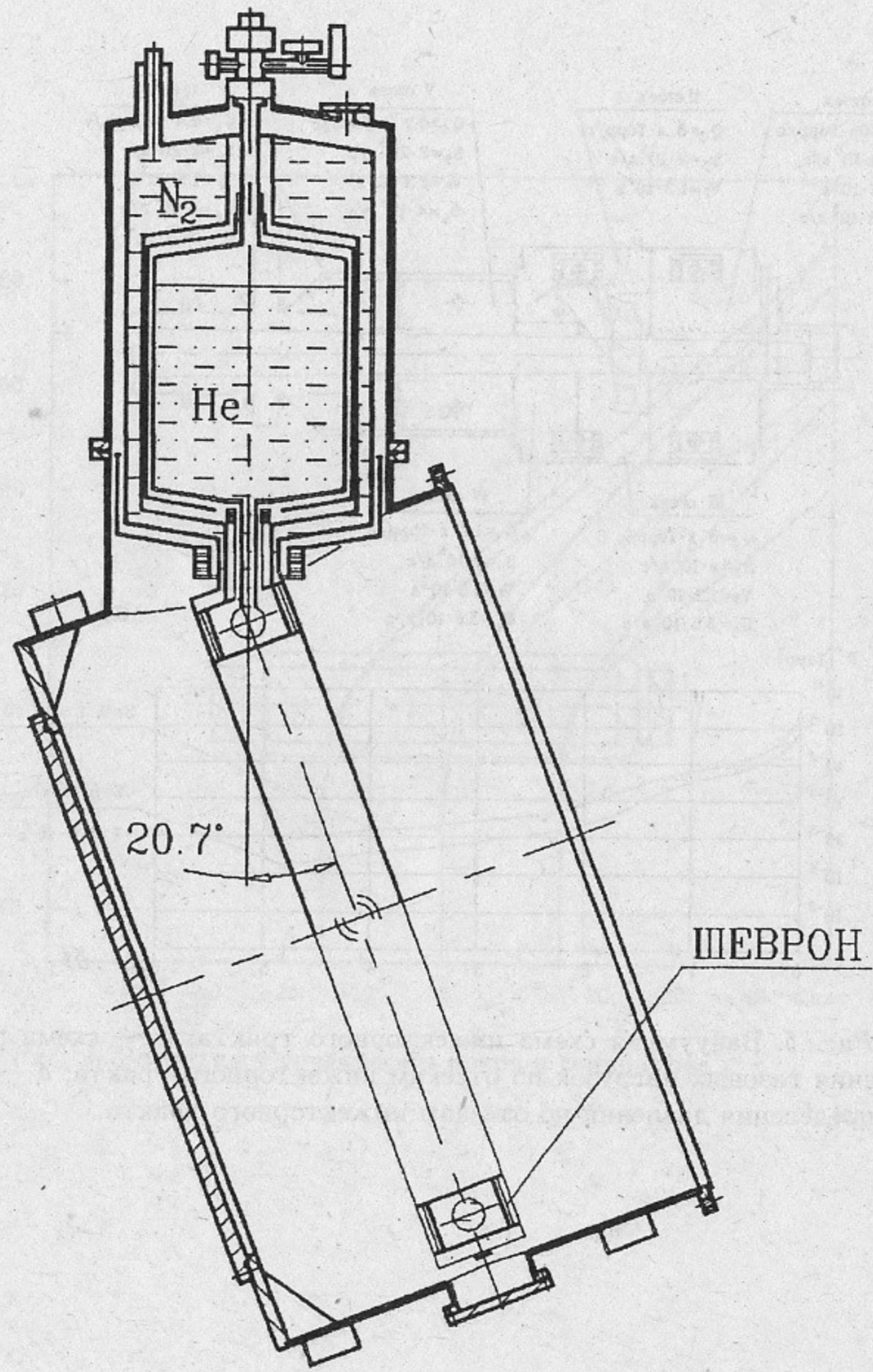


Рис. 6. Конструктивная схема гелиевого крионасоса.

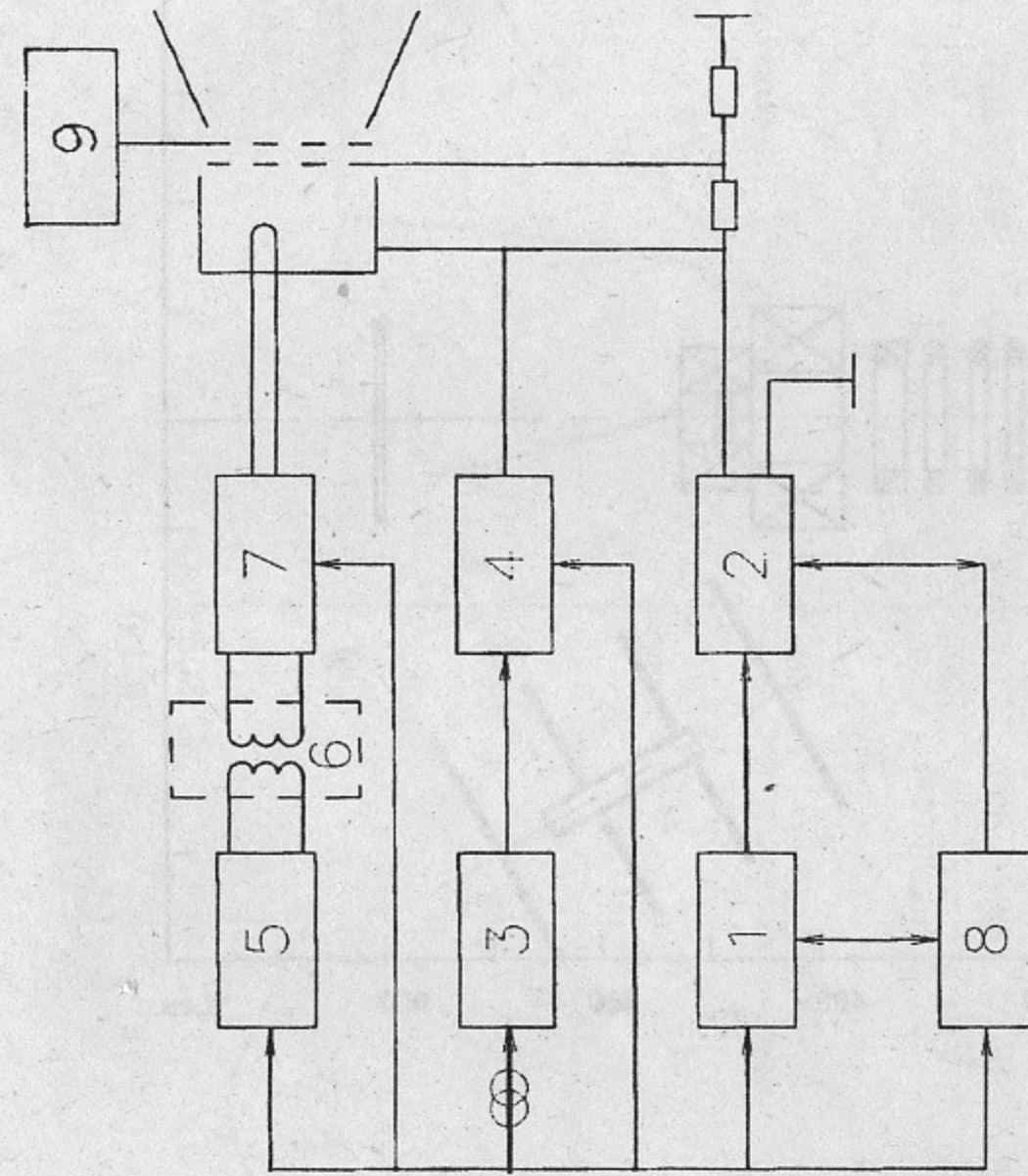


Рис. 7. Блок-схема источника ионов: 1 — емкостной генератор напряжения; 2 — модулятор; 3 — накопитель блока питания дуги; 4 — блок питания дуги; 5 — преобразователь 200÷5000 Гц; 6 — разделительный трансформатор на 40 кВ для питания катодов; 7 — выпрямитель и фильтр; 8 — блок питания 3 кВ; 9 — блок управления.

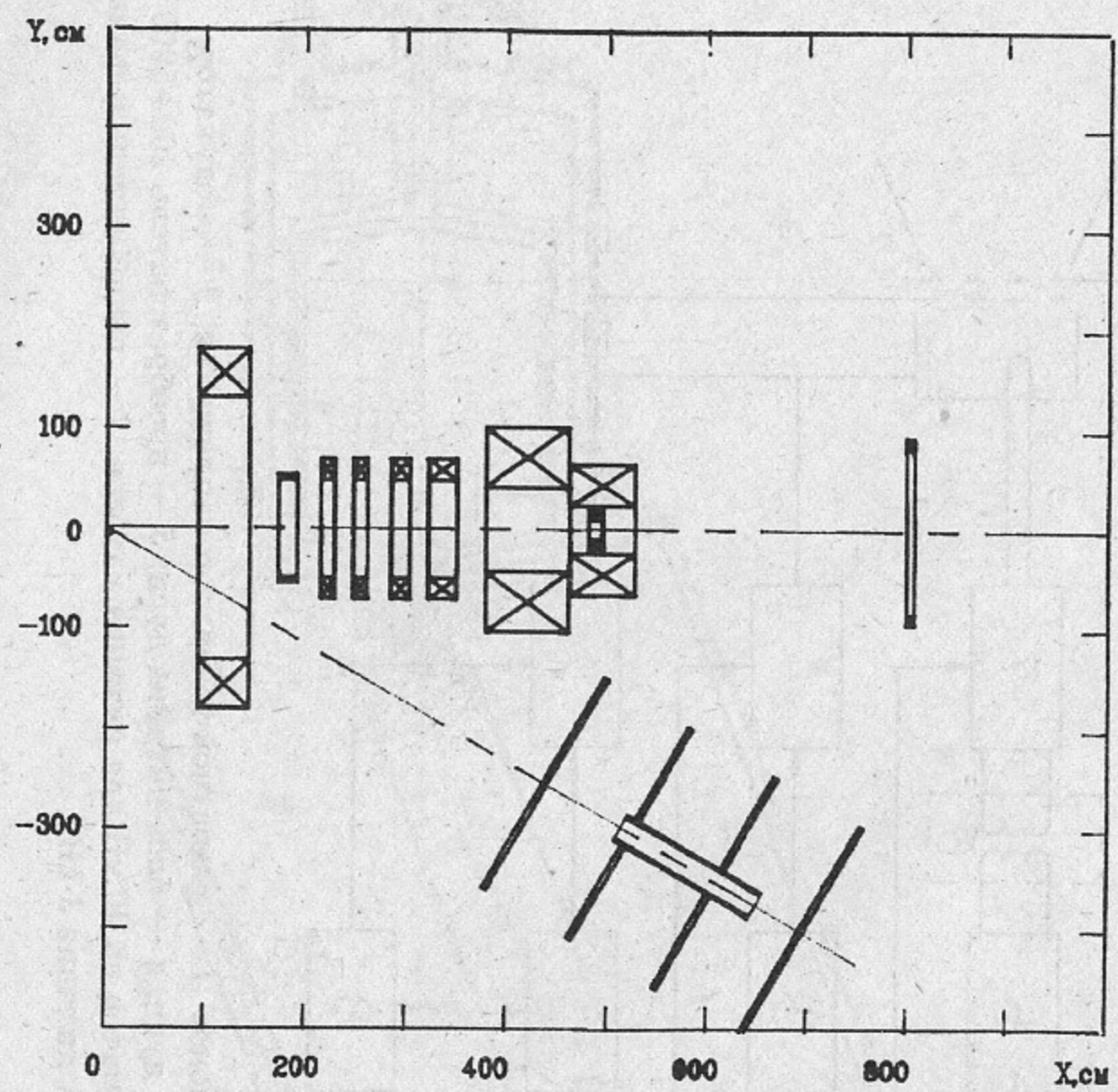


Рис. 8. Схема размещения компенсирующих витков и магнитных экранов относительно магнитной системы ВП.

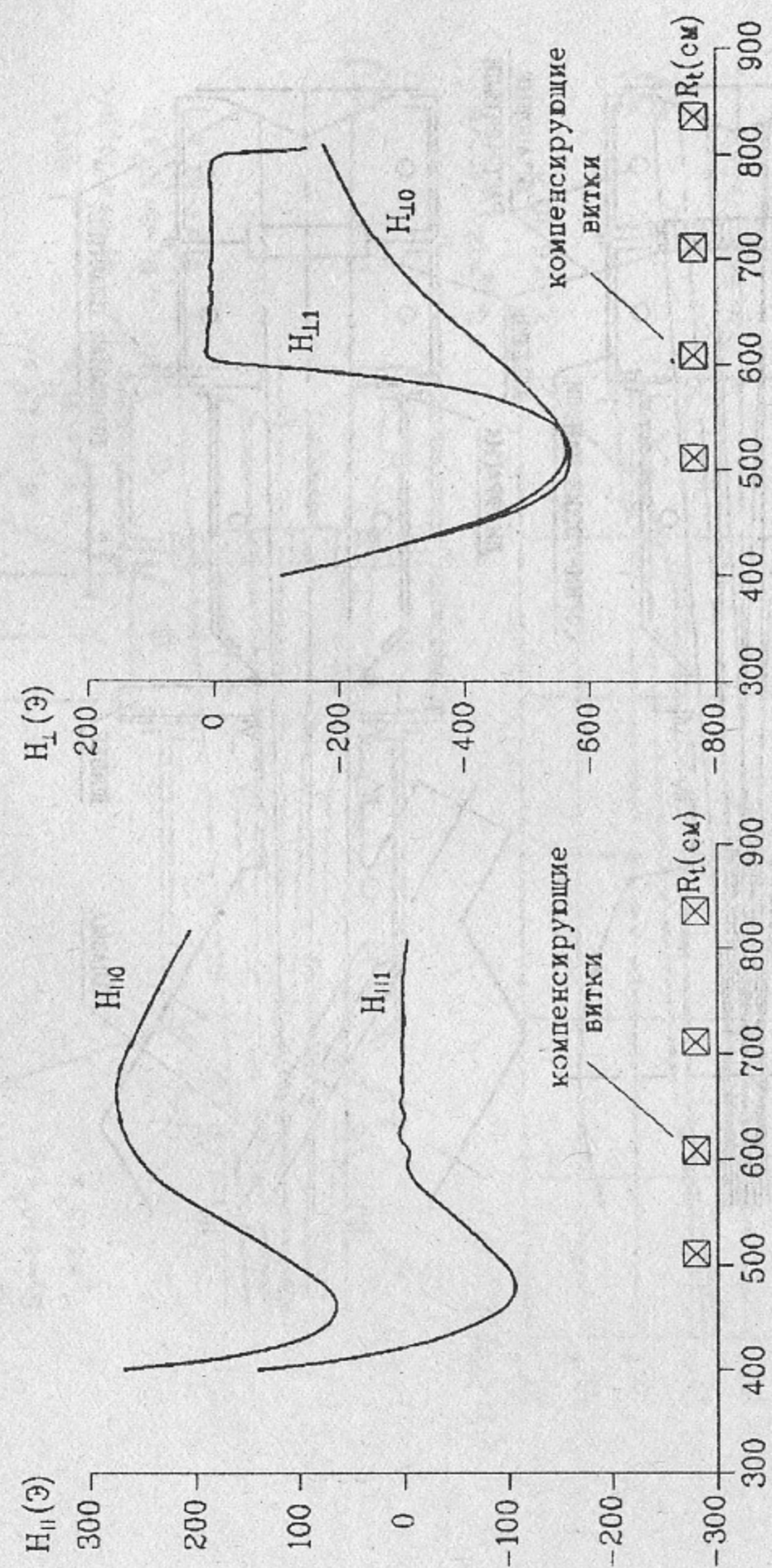


Рис. 9. Магнитные поля на оси тракта.

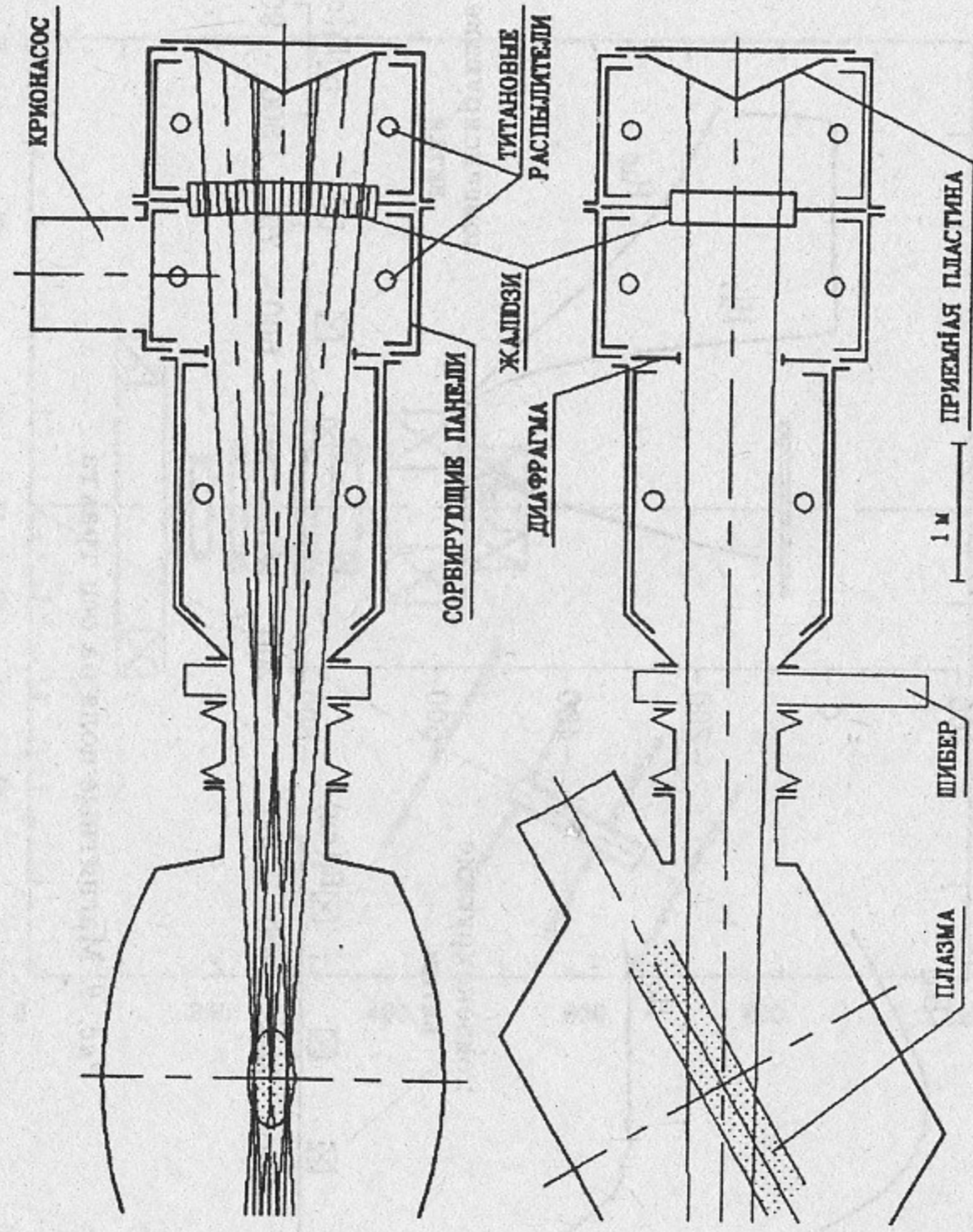


Рис. 10. Приемник нейтральных пучков №0.

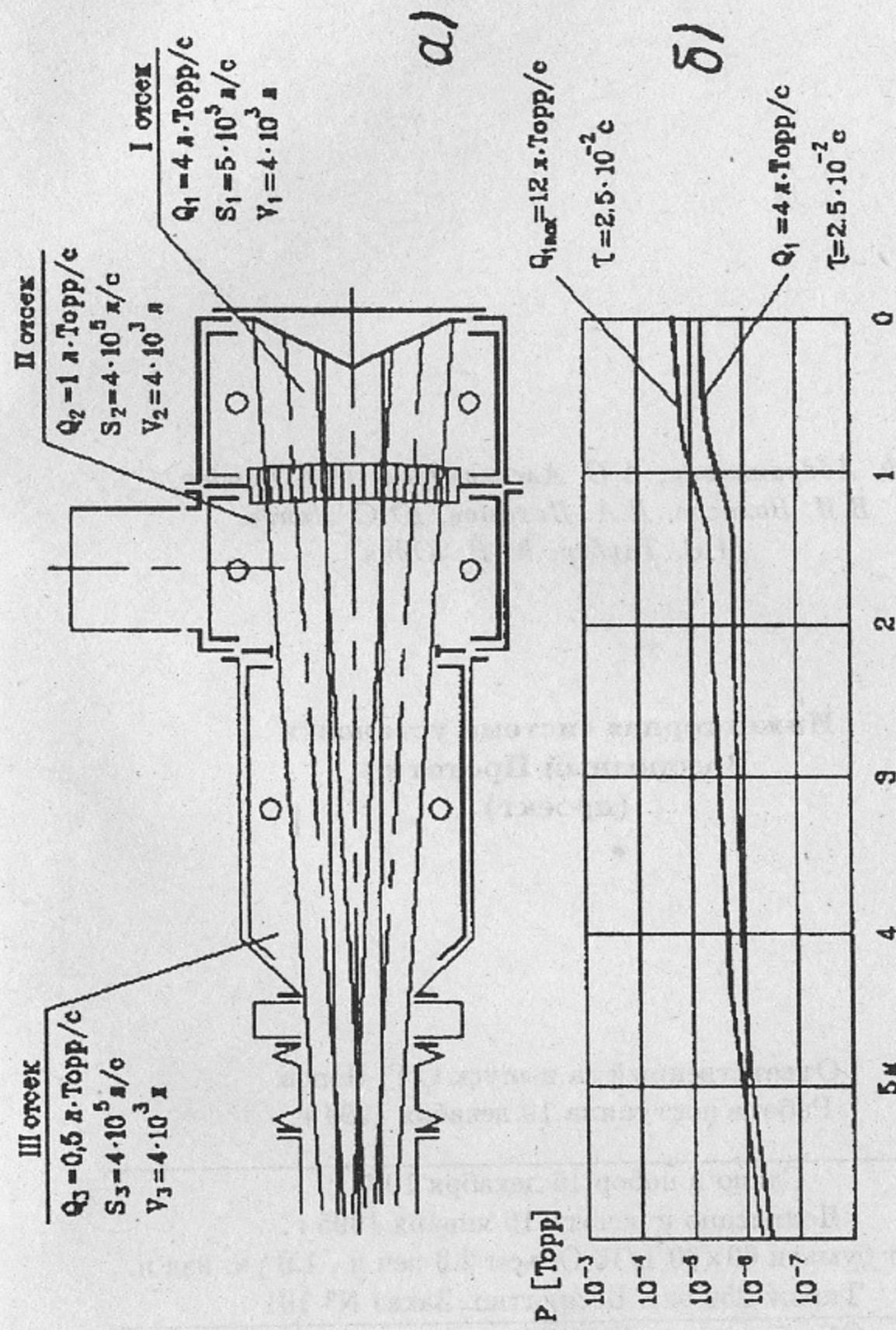


Рис. 11. а — вакуумная схема нейтральных пучков и схема распределения газовых нагрузок по отсекам приемника; б — схема распределения давлений по отсекам приемника.

*Г.Ф. Абдрашитов, А.С. Александров, Е.Д. Бендер,
В.И. Волосов, Д.А. Пахомов, Ю.С. Попов,
М.В. Таубер, Ю.Н. Юдин*

**Инжекторная система установки
Водородный Прототип
(проект)**

Ответственный за выпуск С.Г. Попов
Работа поступила 19 декабря 1994 г.

Сдано в набор 16 декабря 1994 г.

Подписано в печать 16 января 1995 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2.3 печ.л., 1.9 уч.-изд.л.

Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 101

Обработано на IBM PC и отпечатано на
роталпринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.