



Сибирское отделение Российской Академии наук  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера

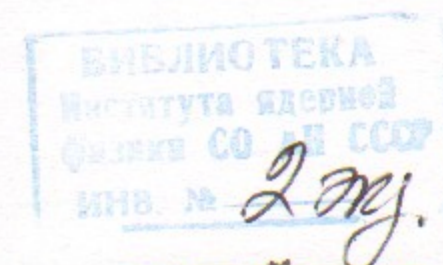
*B.68*  
*1999*

В.И. Волосов, А.А. Иванов, Э.П. Кругляков,  
А.М. Кудрявцев

РАЗРАБОТКА МАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ  
ДЛЯ ИНЖЕКТОРОВ УСТАНОВКИ  
“ВОДОРОДНЫЙ ПРОТОТИП”

ИЯФ 98-87

<http://www.inp.nsk.su/publications>



НОВОСИБИРСК  
1998

## Разработка магнитных экранов для инжекторов установки "Водородный прототип"

*В.И. Волосов, А.А. Иванов, Э.П. Кругляков, А.М. Кудрявцев*

Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера  
630090, Новосибирск, Россия

### Аннотация

Рассматривается система магнитных экранов для инжекторов установки "Водородный прототип". Обсуждаются требования на предельно допустимые магнитные поля для основных элементов инжектора: источника ионов, нейтрализатора, сепаратора ионов и др. Проводится сравнительный анализ различных вариантов магнитного экранирования инжектора. Показано, что комбинированная система экранирования, включающая компенсирующие продольную компоненту поля витки с током и магнитные экраны позволяет получить требуемую экранировку.

## Development of magnetic shields for injectors of "Hydrogen Prototype" device

*V.I. Volosov, A.A. Ivanov, E.P. Kruglyakov, A.M. Kudryavtsev*

Budker Institute of Nuclear Physics  
630090, Novosibirsk, Russia

### Abstract

The system of magnetic shields for injectors of "Hydrogen prototype" device is considered. The requirements of an extreme permissible magnetic field for basic elements of an injector (the ion source, neutralizer, ion separator and etc.) are considered. The comparative analysis of various variants of magnetic shielding of the injector is fulfilled. It's shown, that the combined shielding system including a coils with a current and magnetic shields canceling a longitudinal component of fields allows to obtain a required shielding.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение
2. Инжекторный тракт установки "Водородный прототип" и требования к магнитным полям отдельных элементов инжектора ВП.
3. Принципы магнитной экранировки инжекторного тракта и конструкция экранирующей системы

## 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.

Экспериментальная установка Водородный Прототип (ВП) разрабатывается и 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-ом (в 2 – 2.5 раза). Однако, даже в этом случае, инжекторная система остается достаточно сложной. Одним из принципиальных элементов инжекторных систем как нейтронного источника ИН, так и Водородного Прототипа (ВП) является система экранирования инжекторов от внешних магнитных полей.

Ниже рассматривается система экранирования инжекторов (инжекторного тракта) установки Водородный Прототип. Ранее эта проблема частично рассматривалась в работе [3].

## 2. Инжекторный тракт установки "Водородный прототип" и требования к магнитным полям отдельных элементов инжектора ВП

### 2.1 Инжекторный тракт установки

Основным требованием к параметрам ВП является возможность моделирования процессов протекающих в ИНе с модельным множителем не превышающем 2 (в некоторых случаях 2.5). Исходя из этого условия и были выбраны основные параметры инжекторной системы ВП (параметры ИН-а приведены в [2]). Общий вид прототипа приведен на рис.1.

Инжектор состоит из следующих основных элементов: источника 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.

#### *Основные параметры инжектора ВП*

Инжектор осуществляет 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; эквивалентный ток атомарной инжекции 150 А ( $3 \times 50$  А; каждый источник ионов дает 70 А ионного тока, после нейтрализатора остается 50 А эквивалентного атомарного тока). Угол инжекции выбран равным 30 градусам.

Длительность инжекции 20 мс. Время между импульсами инжекции не должно превышать 10 минут.

### 2.2. Требования к магнитным полям и к магнитной экранировке отдельных элементов инжектора ВП

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.

#### *Источник ионов*

Схема источника ионов ИПМ, рассчитанного на получение тока ионов до 70 А приведена на рис.3. Источник состоит из двух основных элементов: газоразрядной камеры (ГРК) и ионно-оптической системы (ИОС). Для нормальной работы источника ионов (например типа ИПМ-1) допускается магнитное поле в объеме источника не выше 0.5 – 1.0 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 – 1.0 Э в области источника является необходимым. 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 равно мерно по периметру ГРК.

Более подробное описание источника и информация о его параметрах приведены в работе [3].

#### *Нейтрализатор (перезарядная камера)*

Нейтрализатор (перезарядная камера) выполнен в виде трубы прямоугольного сечения  $15 \times 30$  см<sup>2</sup> длиной 120 см присоединенной к источнику ионов. Труба нейтрализатора изготовлена из магнитно-мягкого материала и является магнитным экраном; при необходимости может быть установлен дополнительный экран. Внешнее рассеянное магнитное поле не должно превышать 1–5 Э. Внутри экранирующей трубы желательно иметь магнитные поля на уровне

0.5–1.0 эрстеда. Это требование следует из условия, что угол поворота ионов в нейтрализаторе не должен превышать  $2.0 \times 10^{-3}$ , при этом смещение атома на оси установки ВП (в точке инъекции) порядка 2 см. При длине нейтрализатора 100 см, для поля в 1 Э, получим угол  $2.0 \times 10^{-3}$  в среднем и  $4.0 \times 10^{-3}$  для максимальных отклонений ( $\alpha_{\max} = L/R$ ;  $L=100$  см;  $R=2.5 \times 10^4$  см); здесь  $R$  – лармовский радиус иона в нейтрализаторе:

$$R = 147.5 \sqrt{3 \times 10^4} = 2.5 \times 10^4 \text{ см,}$$

откуда  $\alpha_{\max} = 100/2.5 \times 10^4 = 4 \cdot 10^{-3}$  см.

#### Жалюзийный канал

Последовательно с перезарядной камерой расположен жалюзийный канал, вдоль которого происходит откачка холодного газа, вытекающего из нейтрализатора. Канал выполнен в виде прямоугольной трубы сечением  $15 \times 30$  см<sup>2</sup>, длиной 50 см с отверстиями на боковых стенках. Внешнее рассеянное поле в жалюзийном канале не должно превышать 1–5 Э. Магнитное поле внутри жалюзийного канала не должно превышать 0.5–1.0 Э. Это условие аналогично требованиям к перезарядной камере. Жалюзийный канал также как и канал нейтрализатора является одновременно магнитным экраном с коэффициентом экранирования  $K > 10$ .

#### Сепаратор (отклоняющий магнит)

Сепаратор ионов — это магнитная система отклоняющая быстрые ионы, которые не перезарядились в нейтрализаторе. 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%).

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  $196 \times 450$  см. Ве-

личина поля при зазоре 20 см составляет 0.7 кЭ. при токе в обмотках  $1.5 \times 10^4$  Ампер/витков.

Расчет траекторий отклоненных ионов с учетом рассеянных полей, а также наличия магнитного экрана сепараторов был проведен численно см [3]. Величина внешнего рассеянного поля не должна превышать 50 Э.

### 3. Принципы магнитной экранировки инжекторного тракта и конструкция экранирующей системы

Как уже отмечалось выше, для нормальной работы источника ионов и перезарядной камеры необходимо снизить магнитные поля до уровня порядка долей эрстеда; в сепараторе до 50 эрстед. 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 инъекции равен  $30^\circ$ , 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 ( $R_t = 8$  м,  $R_t$  – расстояние вдоль оси тракта от центра ловушки) внешнее поле меньше ( $H_{\parallel 0} = 200$ ,  $H_{\perp 0} = 162$ ) (см., рис.5), но обе компоненты поля существенно превышают поля до-

пустимые 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.

#### Пассивная экранировка

Рассмотрим сначала возможности 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  $H_{||}$  (поле в железе) приблизительно равно  $H_{0||}$  — полю вне железа. За счет этого поперечная компонента поля экранируется с коэффициентом  $K_{\perp}$  равным (см. [4]),

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

при  $D = 15$  см;  $\Delta = 1$  см;  $B_{\max} = 15 \times 10^3$  и  $H_{||} = 0.2 \times 10^3$  получим  $K_{\perp} \sim 6$ . 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,  $K_{2\perp} \sim K_{\perp}^2$ , дает коэффициент  $K_{\perp}$  не более 36. При  $H_{0\perp} \sim 200$  Э, это дает  $\sim 6$  Э в источнике, что неприемлемо для гарантированной работы источника.

Заметим, что в этом случае:

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

т.е. имеется очень сильная зависимость от амплитуды внешнего поля. С другой стороны, следует заметить, что  $H_{i||} \sim H_{||}$ , 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  $\Delta$  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  $H_{\perp} < 1.0$  Э. В этом варианте существенно усложняется откачка жалюзийного участка тракта. Поэтому необходимо рассмотреть другой (более сложный) вариант экранировки — с использованием компенсирующих витков.

#### Активная экранировка — компенсационный метод экранирования

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  $\mu$ ) 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. 1). Величина тока в этих витках фиксирована ("квантована") поскольку очевидно, что эти витки следует включать последовательно с основными катушками магнитной системы. За счет этого компенсация выполняется автоматически независимо от величины тока в основных катушках ВП. Очевидно также, что продольную компоненту поля необходимо закомпенсировать достаточно точно (порядка 0.5% от величины внешнего поля). В связи с этими условиями и требованиями компенсирующее магнитное поле на оси тракта определяется только геометрическими размерами витков и их расположением. Схема размещения этих витков

(катушек) по отношению к другим элементам магнитной системы представлена на рис 4. Четыре катушки диаметром 2.3 м, содержащие по 2 витка шины 25×50 мм. размещаются снаружи вакуумной камеры, около переходных фланцев; среднее расстояние между ними 1.2 м. Полный ток в катушках 25 кА ( $2 \times 12.5$  кА), питание осуществляется от единого для всей магнитной системы источника.

Среднее магнитное поле на оси инжекторного тракта, направленное вдоль оси тракта ( $H_{||}$ ) при включенных компенсирующих витках, лежит в пределах 4 – 6 Э (см. рис.5), 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). Результат этого расчета приведен на рис.5. Как видно из расчета поперечное поле ослабляется этим экраном более чем в 20 раз. Поскольку при расчетах экран разбивается 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 продольное магнитное поле внутри экрана также снижается до уровня  $\sim 2$  Э. На рис.5 приведены поля внутри экрана полученные при этом расчете ( $H_{\perp 1}$ ,  $H_{||}$ ). 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. Заключение

Система экранирования, включающая компенсирующие продольное поле витки и пассивные магнитные экраны, позволяет получить в объеме инжекторного тракта достаточно малые поля необходимые для нормальной работы инжектора.

Работа выполнена при поддержке фонда МНТЦ, грант №492-98.

#### 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. Г.Ф.Абдрашитов, А.С.Александров, Е.Д.Бендер и др. Инжекторная система установки Водородный Прототип (проект), препринт ИЯФ, 94-101, 1994, Новосибирск.
4. Г.Каден. Электромагнитные экраны. М.-Л., Госэнергоатомиздат, 1957.

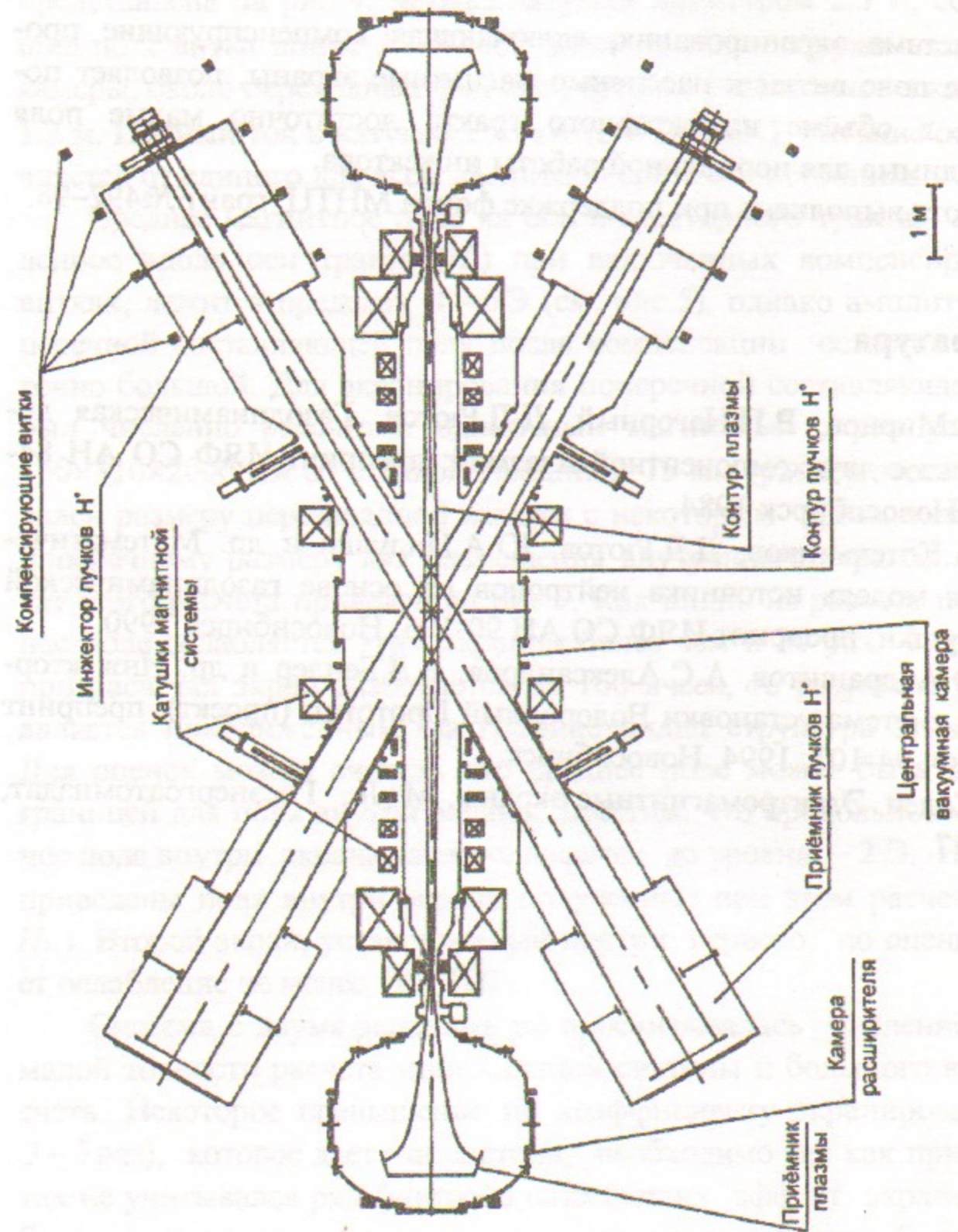


Рис. 1. Общий вид установки ВП.

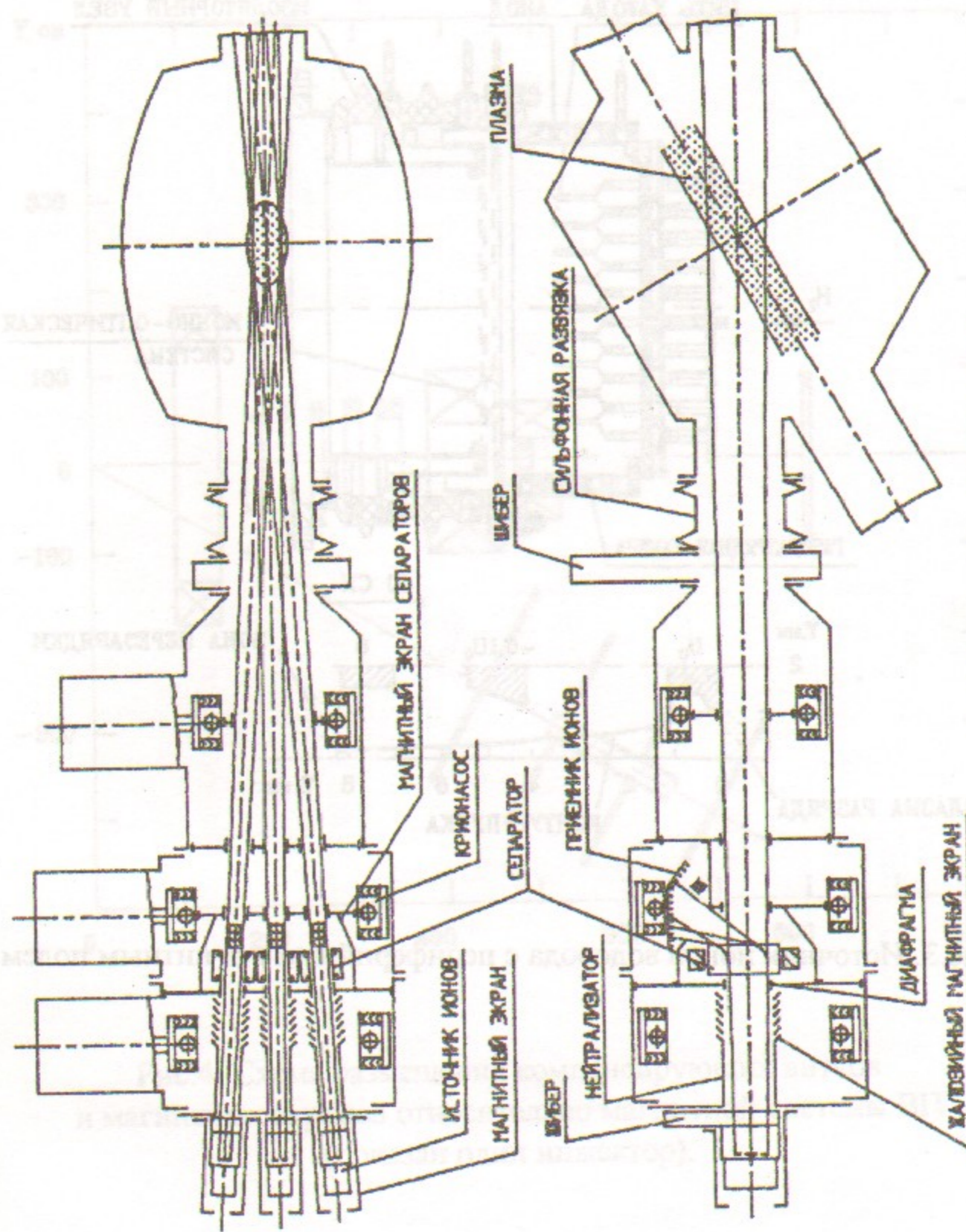


Рис. 2. Схема инжекторного тракта ВП.

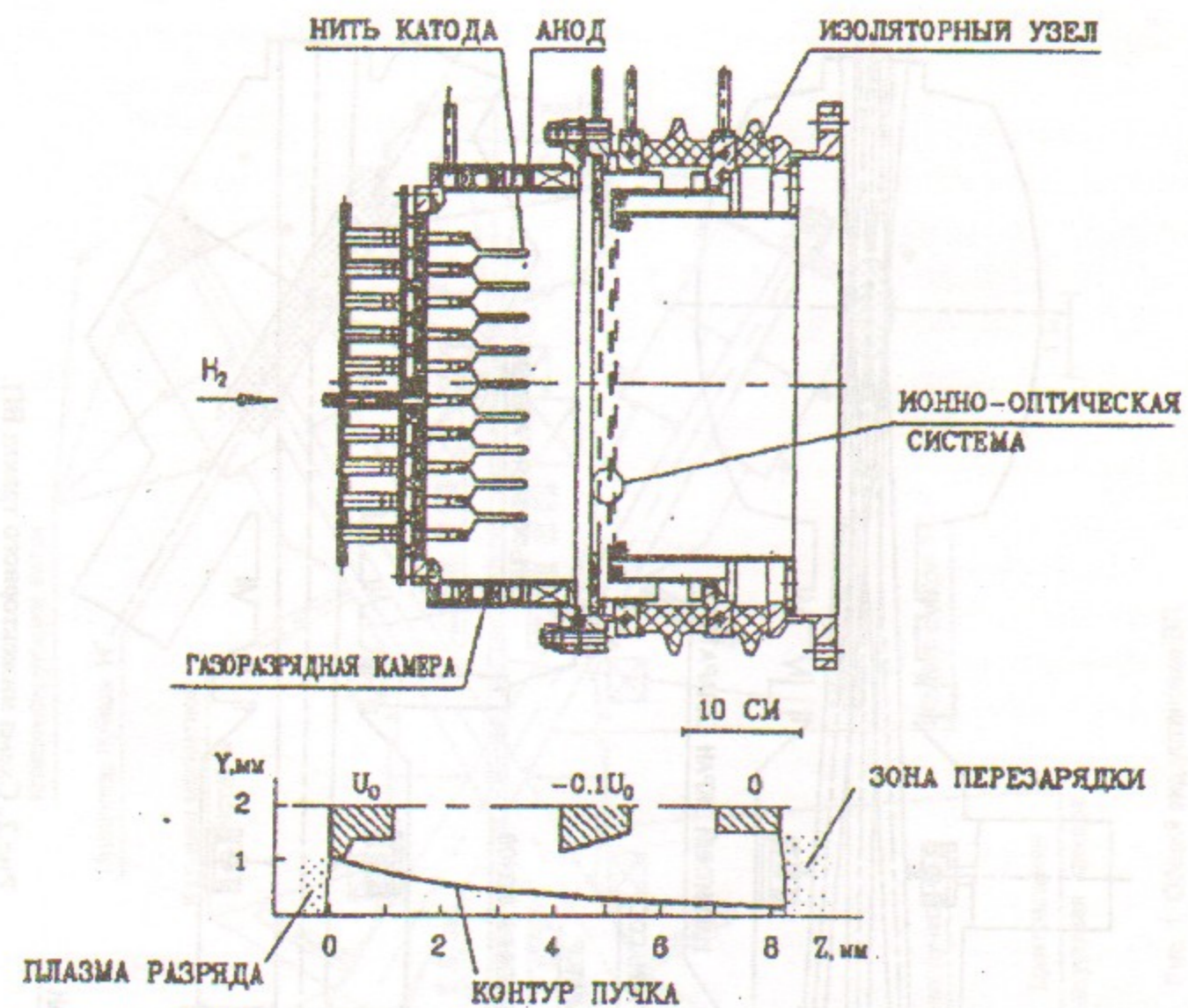


Рис.3. Источник ионов водорода с периферийным магнитным полем.

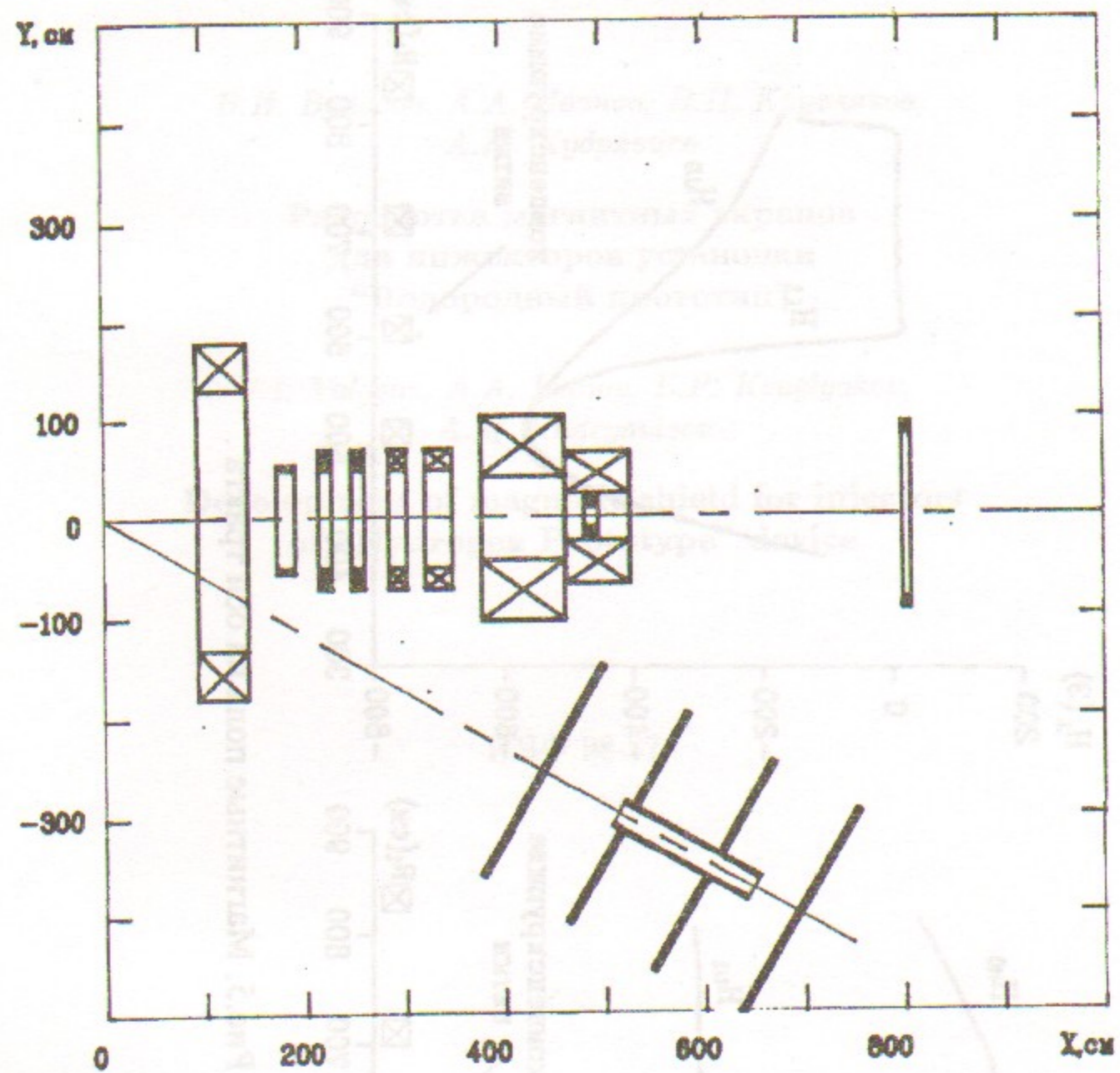


Рис.4. Схема размещения компенсирующих витков и магнитных экранов относительно магнитной системы ВП (показан один инжектор).



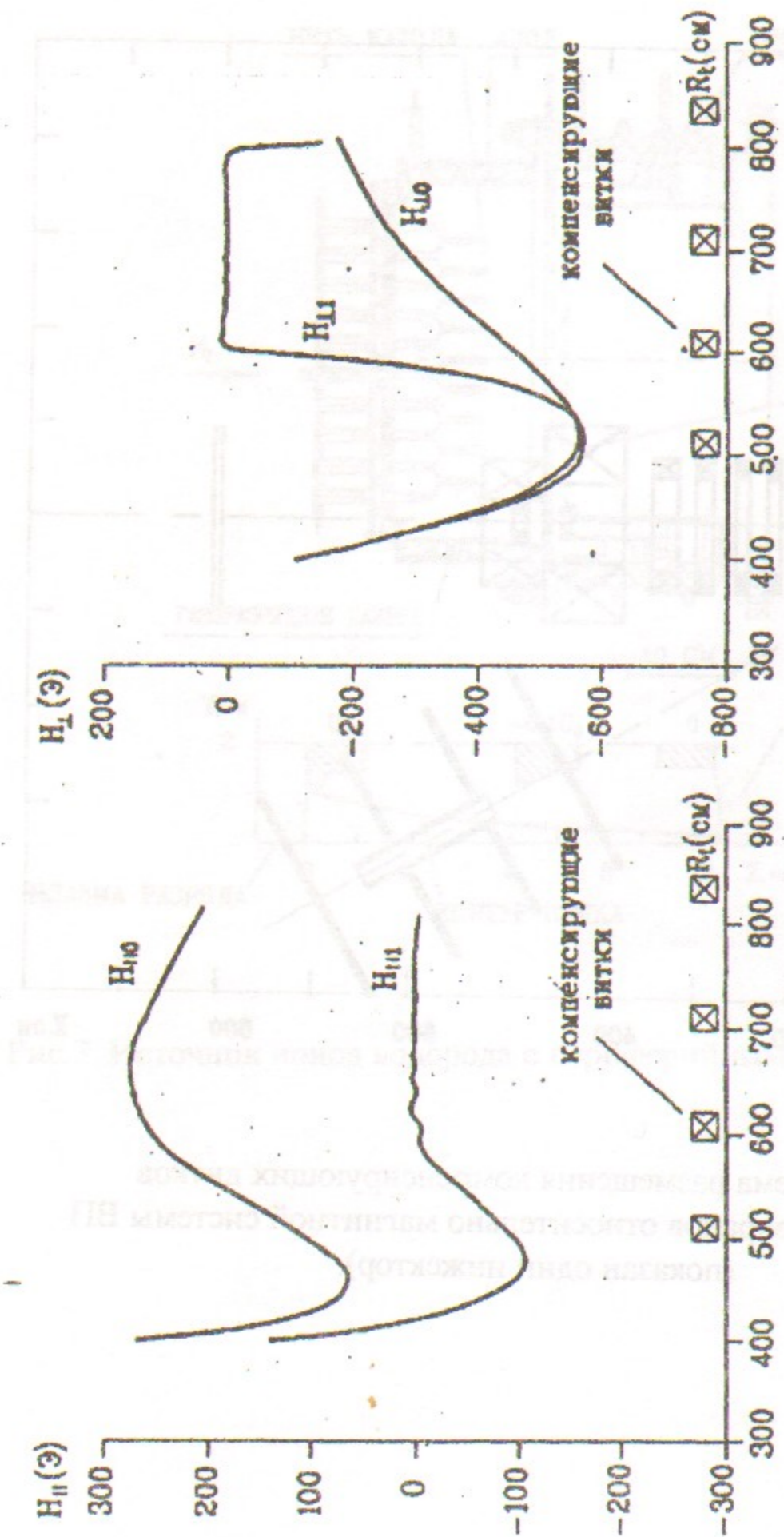


Рис.5. Магнитные поля на оси тракта.

В.И. Волосов, А.А. Иванов, Э.П. Кругляков,  
А.М. Кудрявцев

Разработка магнитных экранов  
для инжекторов установки  
"Водородный прототип"

V.I. Volosov, A.A. Ivanov, E.P. Kruglyakov,  
A.M. Kudryavtsev

Development of magnetic shield for injectors  
of "Hydrogen Prototype" device

ИЯФ 98-87

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 3.12. 1998 г.

Сдано в набор 4.12.1998 г.

Подписано в печать 4.12.1998 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.1 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 130 экз. Бесплатно. Заказ № 87

Обработано на IBM PC и отпечатано на  
ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.