

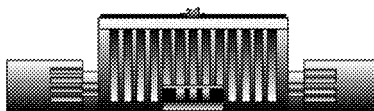


**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН
(ИЯФ СО РАН)**

В.В. Гамов, Р.В. Воскобойников, К.Ф. Жимулёв, П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин,
К.С. Колесниченко, С.В. Мурахтин, Д.В. Моисеев, В.В. Приходько, Е.И. Солдаткина,
Н.В. Ступишин, А.Д. Хильченко, И.С. Черноштанов

**Экспериментальная установка КОТ: система управления и
диагностический комплекс.**

ИЯФ 2026-05



**НОВОСИБИРСК
2026**

Оглавление

Аннотация	2
ВВЕДЕНИЕ.....	2
1. Установка КОТ.....	5
1.1. Схема эксперимента и принцип работы.....	7
1.2. Магнитное поле	8
1.3. Вакуумная система.....	12
1.4. Генератор плазмы.....	15
1.5. Система атомарной инжекции	16
1.6. Система управления и контроля	20
Базовые модули системы управления	21
1.7. Программное обеспечение системы управления	26
Схема взаимодействия программных и аппаратных компонент.....	26
Многоуровневая архитектура ПО установки КОТ	27
Динамическая конфигурация и верификация топологии крейта.....	28
Автономные распределенные алгоритмы («Python-сценарии»).....	29
Сервисное диагностическое ПО (Тестовая утилита).....	29
Верхний уровень системы управления	30
2. Диагностический комплекс установки.....	33
2.1. Измерение параметров атомарных пучков	33
2.2. Магнитные измерения	35
Диаманитные петли.....	35
Магнитные зонды.....	39
2.3. Ленгмюровские зонды	42
Тройные зонды	42
Азимутальная сборка одиночных ленгмюровских зондов.....	44
2.4. СВЧ-интерферометр	46
2.5. Анализатор нейтралов перезарядки	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	52
Список литературы	53

Экспериментальная установка КОТ: система управления и диагностический комплекс

*В.В. Гамов, Р.В. Воскобойников, К.Ф. Жимулёв, П.В. Зубарев, А.Н. Квашинин,
К.С. Колесниченко, С.В. Мурахтин, Д.В. Моисеев, В.В. Приходько, Е.И. Солдаткина,
Н.В. Ступишин, А.Д. Хильченко, И.С. Черноштанов*

Аннотация

В настоящей статье приведено описание установки КОТ (Компактный Осесимметричный Торонд), введённой в эксплуатацию в ИЯФ СО РАН в 2021 году, научная программа которой нацелена на исследование плазмы с высоким относительным давлением. Рассмотрены конструкция установки, её диагностический комплекс и система управления.

ВВЕДЕНИЕ

Классическим схемам удержания плазмы в открытых ловушках присущи трудности, связанные, в частности, с наличием больших потерь энергии и вещества вдоль силовых линий магнитного поля. Эффективность новых методов подавления продольных потерь энергии и вещества в ловушках открытого типа была продемонстрирована в последнее время на установках ГОЛ-3 и СМОЛА (ИЯФ СО РАН), где удалось добиться заметного увеличения времени удержания плазмы. Дальнейшее развитие физики открытых ловушек привело к появлению проекта ГДМЛ (Газодинамическая многопробочная ловушка) – установки для удержания плазмы с термоядерными параметрами. Проект ГДМЛ [1] активно развивается в настоящее время и является естественным продолжением концепции газодинамической ловушки ГДЛ с использованием дополнительных методов подавления продольных потерь плазмы, таких как многопробочное и винтовое запираение потока плазмы, а также диамагнитное удержание [2]. Для изучения и отработки отдельных методов удержания термоядерной плазмы в ИЯФ проводятся поддерживающие эксперименты на установках ГДЛ [3], СМОЛА [4], ГОЛ-NB [5] и КОТ [6–8].

Установка КОТ (Компактный Осесимметричный Торонд) представляет собой пробкотрон, рабочий объём которого заполняется мишенной плазмой при помощи генератора кольцевого типа [6]. Мишенная плазма нужна для захвата мощных атомарных пучков, создающих популяцию быстрых ионов, осциллирующих между точками остановки. Особенностью эксперимента является высокая плотность тока атомарной инжекции (до 3 экв.А/см²), позволяющая создать в малом объёме плазменное образование (плазмод) с субтермоядерными параметрами и высоким относительным давлением (отношением поперечной составляющей давления плазмы к давлению магнитного поля):

$$\beta = 8\pi \frac{P_{\perp}^2}{B^2} \approx 1.$$

При $\beta \approx 1$ создаваемое плазмой собственное диамагнитное поле почти полностью вытесняет ведущее магнитное поле и формирует область с повышенным эффективным пробочным отношением:

$$R = \frac{B_{mir}}{B_0} \gg 1,$$

где B_{mir} – индукция магнитного поля в пробке, B_0 – поле в центре плазмоида. Режим с $R \gg 1$ должен приводить к эффективному увеличению времени жизни плазмы [9].

Потенциальные преимущества режима с $\beta \approx 1$ (так называемое диамагнитное удержание), такие как предельно большое давление плазмы и подавление продольных потерь, стимулировали попытки достичь его экспериментально. Следует отметить эксперименты по формированию конфигурации с обращённым полем (Field Reversed Configuration, FRC) на установке 2ХИБ, где было достигнуто ослабление магнитного поля на оси на 90% [10], и недавние эксперименты на установке Norm компании Tri Alpha Energy, где было продемонстрировано формирование конфигурации с $\beta \approx 1$ в пробкотроне с наклонной атомарной инжекцией [11].

Отличительной особенностью экспериментов на установке КОТ является способ удержания и стабилизации плазмы. В отличие от эксперимента на 2ХИБ, плазма является осесимметричной, что благоприятно для удержания быстрых ионов. Другим важным отличием установки КОТ является нормальная, а не наклонная, инжекция атомарных пучков, что позволяет сделать область движения быстрых ионов максимально компактной. Высокая анизотропия распределения быстрых ионов в такой конфигурации может спровоцировать развитие кинетических неустойчивостей: альфвеновской ионно-циклотронной (АИЦН) и дрейфово-конусной (ДКН). Однако АИЦН приводит к диффузии быстрых ионов по питч-углу, но не вызывает прямых потерь быстрых ионов, а лишь уширяет их распределение по продольной координате (делает область движения быстрых ионов менее компактной), поэтому в условиях установки КОТ не ожидается существенного влияния АИЦН на энергобаланс быстрых ионов. Кроме того, конструкция установки допускает переход к наклонной инжекции с углом порядка 80° , что можно использовать для стабилизации АИЦН. ДКН в свою очередь, согласно оценкам, должна стабилизироваться продольной неоднородностью области с горячей плазмой и наличием большой доли мишеных ионов со сравнительно высокой температурой.

Кроме этого, на установке КОТ используется достигнутый в ИЯФ существенный прогресс в системах мощной атомарной инжекции [12], позволяющий получить ранее

недостижимую плотность эквивалентного тока нейтральных атомов в пучках на поверхности мишенной плазмы. Возможность работы с максимально достижимым относительным давлением плазмы и осевая симметрия магнитной системы являются преимуществами установки.

Как показывает выполненное двумерным гибридным кодом [13] PIC-моделирование, при отсутствии неустойчивостей возможно накопить популяцию быстрых ионов, достаточную для обращения магнитного поля на оси в такой компактной конфигурации. Однако для проверки возможности формирования и поддержания данного режима удержания требуется ответить на целый ряд принципиальных вопросов, касающихся оптимизации накопления быстрых частиц, поддержания МГД устойчивости, транспорта частиц на границе плазмы и т.д. В силу новизны предложенного подхода для большинства отмеченных вопросов отсутствуют или крайне скудны какие-либо экспериментальные исследования в данной области. Таким образом, проверку положенных в основу концепции диамагнитного удержания идей представляется целесообразным провести на небольшой и легко модифицируемой установке открытого типа. Реализация такого метода удержания двухкомпонентной плазмы проложит путь к компактным реакторам на основе открытой ловушки с большим относительным пробочным отношением и откроет возможность использования в термоядерном реакторе перспективных видов топлива, таких как дейтерий, ^3He и ^{11}B [11].

Программа экспериментов на установке КОТ ориентирована на отработку методов удержания и стабилизации плазмы с популяцией быстрых ионов, обладающих высоким относительным давлением и субтермоядерными параметрами (энергия 9 кэВ и плотность 10^{13} см^{-3}), формирование базы данных для будущих термоядерных приложений на основе открытых ловушек.

Ключевые аспекты экспериментальной программы установки КОТ:

- отработка сценариев генерации горячей термоизолированной стартовой плазмы с помощью кольцевого генератора дугового типа;
- изучение кинетических и МГД-неустойчивостей плазмы с высоким относительным давлением в аксиально-симметричной системе, а также определение наиболее эффективных методов стабилизации этих неустойчивостей;
- исследование поведения накопленных горячих ионов в компактном плазмоеде;
- изучение энергетического и материального баланса двухкомпонентной плазмы в различных режимах работы экспериментальной установки.

1. Установка КОТ

Установка КОТ состоит из осесимметричного пробкотрона с расстоянием между магнитными пробками 0.6 метра, торцевого бака, выполняющего функцию МГД-стабилизатора, камеры источника плазмы с расположенным в нём генератором плазмы, и системы атомарной инжекции. Схематическое изображение установки КОТ показано на рисунке 1.1.

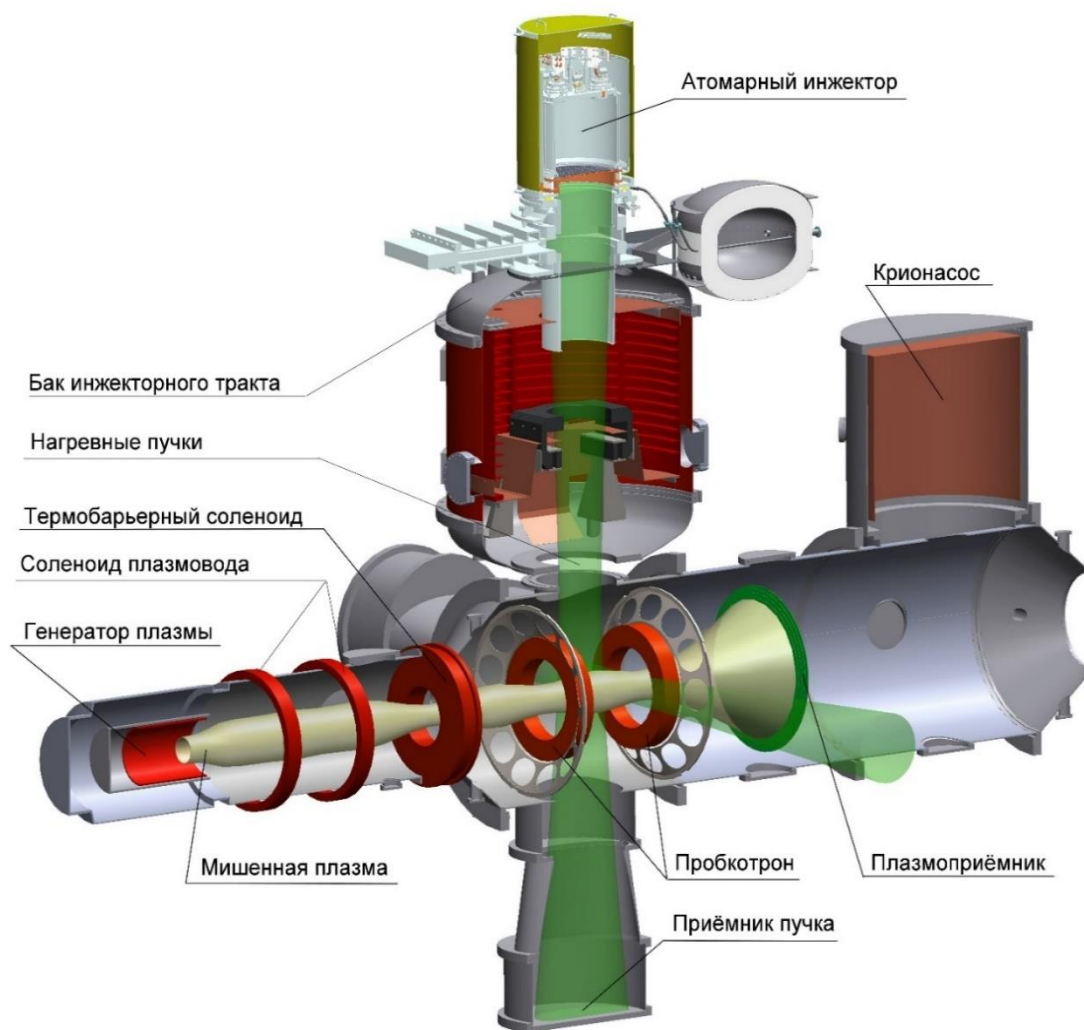


Рисунок 1.1. Экспериментальная установка КОТ.

Магнитное поле установки в центральной части имеет вид классического пробкотрона и формируется семью соленоидами, два из которых установлены непосредственно в центральной вакуумной камере и являются пробочными узлами пробкотрона. Индукция магнитного поля в его центре составляет 3 кГс, в пробках 6 кГс (пробочное отношение $R = B_{mir}/B_0 = 2$). В систему атомарной инжекции входят два инжектора общей мощностью до 3 МВт и энергией инжектируемых частиц 15 кэВ. Инжекция осуществляется в

экваториальную плоскость под углом 90° к оси установки с прицельным параметром 6–10 см. Расширительный бак и секционированный плазмоприёмник расположены сразу за центральным пробкотроном. Плазмоприёмник общим радиусом 450 мм состоит из 13 плоских кольцевых секций, разделённых изоляторами из оксидной керамики. Зазор между плазмоприёмником и вакуумной камерой составляет 50 мм, зазоры между кольцевыми пластинами – 10 мм. Это позволяет эффективно откачивать газ, образующийся при рекомбинации плазмы, и поддерживать давление в расширительном баке на уровне 10^{-4} – 10^{-5} Па. Секционирование требуется для поддержания радиального распределения потенциала в плазме. Секции плазмоприёмника находятся под плавающим потенциалом, есть возможность заземлять произвольные секции либо подавать на них заданный потенциал. В перспективе подача потенциала на плазмоприёмник может потребоваться для реализации МГД-стабилизации плазмы методом вихревого удержания [14]. Область расширяющегося магнитного поля в зоне расположения плазмоприёмника необходима для подавления потока холодных вторичных электронов, рождаемых на поверхности электродов секционированного плазмоприёмника при их взаимодействии с вытекающей из пробки мишенной плазмой. Основные параметры установки КОТ сведены в таблицу 1.

Таблица 1. <i>Основные параметры КОТ.</i>	
Полная длина установки	6 м
Высота	5 м
Магнитное поле в пробках	6 кГс
Магнитное поле в центральной части	3 кГс
Рабочий вакуум	2×10^{-5} Па
Энергия инжекции	15 кэВ
Мощность инжекции	2×1.7 МВт
Плотность тока инжекции	2×1.5 А/см ²
Длительность эксперимента	4 мс
Угол инжекции	90°
Плотность мишенной плазмы	$2\text{--}3 \times 10^{13}$ см ⁻³
Электронная температура	20–40 эВ
Ионная температура	70–120 эВ
Плотность горячих ионов	10^{13} см ⁻³
Средняя энергия горячих ионов	9 кэВ

1.1. Схема эксперимента и принцип работы

Схема эксперимента (рисунок 1.2) заключается в инжекции двух мощных атомарных пучков в мишенную двухкомпонентную плазму [6]. Одна из компонент – столкновительная мишенная плазма с максвелловской функцией распределения электронов по скоростям, температурой 20–40 эВ, плотностью до $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и неизотропными в пространстве скоростей ионами со средней энергией 70–120 эВ. Другая компонента – быстрые ионы со средней энергией 7–9 кэВ и плотностью до $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, которая образуется в результате процессов ионизации и перезарядки при взаимодействии атомарных пучков с мишенной плазмой.

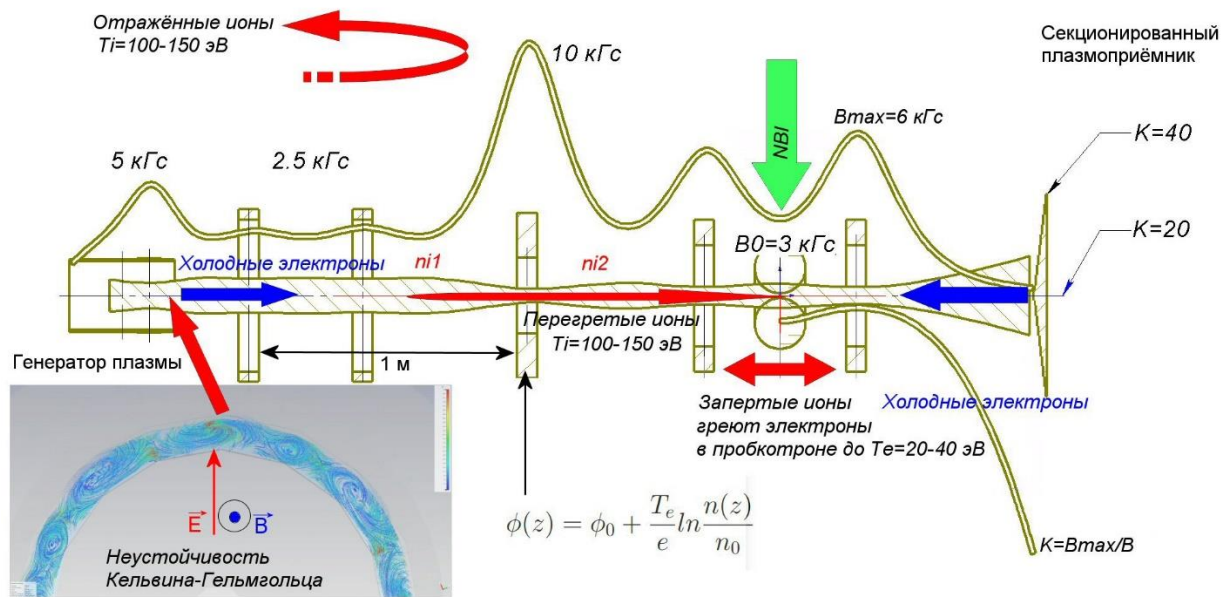


Рисунок 1.2. Схема эксперимента и индукция магнитного поля на оси установки.

Область между генератором плазмы и термобарьерным соленоидом заполняется неравновесной популяцией ионов мишенной плазмы с энергией до 100 эВ, которая возникает в результате развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (НКГ) в процессе дифференциального вращения плазмы в скрещенных $\vec{E} \times \vec{B}$ -полях. Область формирования популяции ионов мишенной плазмы имеет протяжённость около 1.5 м, индукцию магнитного поля 2 кГс. Индукция магнитного поля вдоль оси установки и ключевые физические процессы в рабочем импульсе показаны на рисунке 1.2.

Для образования потенциального барьера, разделяющего электроны по областям движения, необходимо создать локальный минимум плотности плазмы между генератором плазмы и центральной частью ловушки (областью захвата пучков). Потенциальный барьер для электронов эффективно уменьшает электронную теплопроводность вдоль магнитных силовых линий на торец генератора плазмы в том случае, когда длина свободного пробега

электронов $\lambda_e > L_\phi$, где L_ϕ – характерный продольный размер потенциального барьера, определяемого распределением Больцмана:

$$\varphi(z) = \varphi_0 + \frac{T_e}{e} \ln \left(\frac{n(z)}{n_0} \right).$$

Для случая бесстолкновительного режима течения плазменной струи в области термобарьерного соленоида функция распределения ионов по энергии становится анизотропной $T_\perp > T_\parallel$ и заметная доля ионов отражается от области сильного магнитного поля, создаваемого термобарьерным соленоидом. Эта популяция ионов удерживается в кинетическом режиме и имеет длину пробега относительно рассеяния больше, чем характерный размер переходного участка магнитного поля в термобарьерном соленоиде $\lambda_p > \left| B / \left(\frac{dB}{dz} \right) \right|$, в результате чего в области сильного магнитного поля образуется минимум плотности и формируется термобарьер, эффективно подавляющий продольные потери энергии из центрального пробкотрона по электронной теплопроводности на торец генератора плазмы. В результате в ловушке (область захвата атомарных пучков), температура электронной компоненты повышается до 30–40 эВ за счёт столкновений с ионами, нагретыми в результате развития НКГ [15].

Из-за небольшого радиуса расширительного бака (500 мм) плазмоприёмник находится в сравнительно небольшой степени расширения

$$K = \frac{B_{mir}}{B_{sorber}} = 20,$$

где B_{mir} – индукция магнитного поля в пробке, B_{sorber} – поле в области размещения плазмоприёмника. Степень расширения $K = 20$ может быть неблагоприятна с точки зрения электронного потока тепла. При $K > \sqrt{M/m} \cong 40$ поток холодных электронов из плазмоприёмника не может попасть через пробку в занятую горячей плазмой область, при этом каждая вылетающая ион-электронная пара уносит примерно $8T_e$ энергии. При $K < \sqrt{M/m}$ холодные электроны, ускоренные перепадом потенциала в дебаевском слое на поверхности плазмоприёмника, могут проникать за пробку и охлаждать плазму [16]. Особенности этого механизма предстоит изучить в запланированных экспериментальных кампаниях.

1.2. Магнитное поле

Магнитная система установки КОТ предназначена для создания эффективного транспортного канала плазмы в область удержания быстрых частиц, а также для формирования магнитной конфигурации классического пробкотрона в этой области. Магнитная система состоит из следующих элементов: основного и дополнительного соленоидов генератора плазмы, двух транспортных соленоидов, термобарьерного

соленоида и двух соленоидов, образующих входную и выходную магнитные пробки (см. рис. 1.3). Основные параметры соленоидов магнитной системы установки КОТ для режима с индукцией магнитного поля на оси в центральной плоскости пробкотрона $B_0=3$ кГс приведены в таблице 2.

Таблица 2. <i>Основные параметры соленоидов установки КОТ</i>				
Соленоид	кол-во витков	I, кА	R, мОм	L, мГн
Входной	80	2.8	27	3.9
Выходной	80	2.8	27	3.9
Термобарьер	140	2.8	45	9.1
1-ый транспортный	32	2.8	14	1.1
2-ый транспортный	32	2.8	14	1.1
Основной соленоид пушки	62	3.0	220	0.5
Дополнительный соленоид пушки	20	1.75	39	0.14

Геометрия соленоидов и вид силовой линии, определяемой радиусом лимитера, показаны на рисунке 1.3.

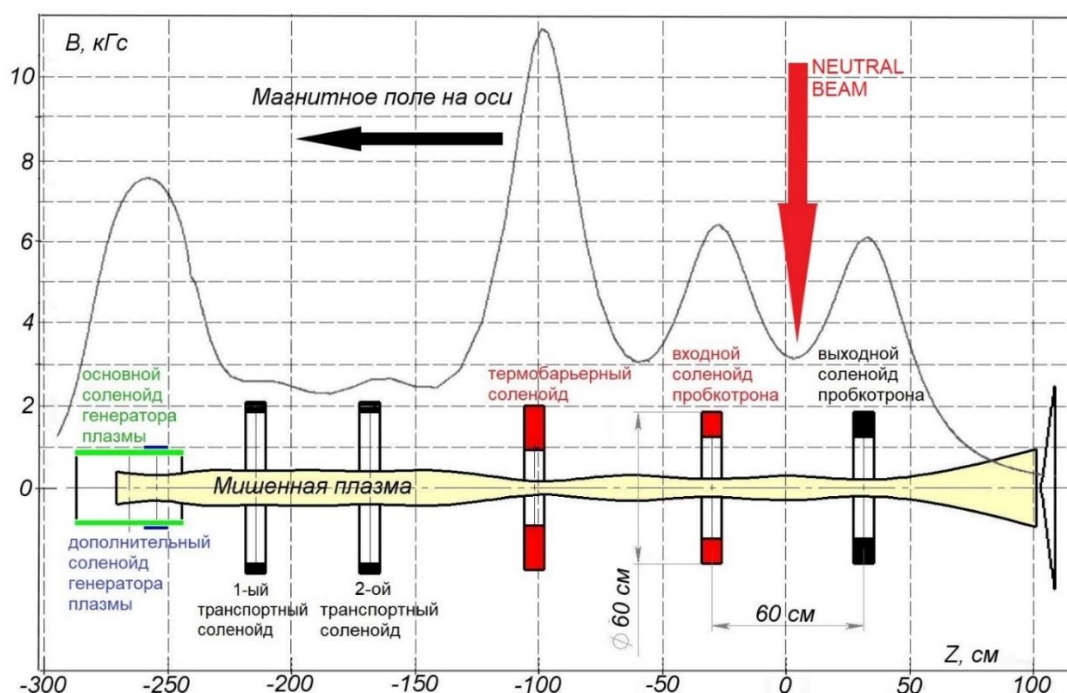


Рисунок 1.3. Геометрия соленоидов магнитного поля установки КОТ и силовая линия, определяемая радиусом лимитера. Цвета соответствуют следующим группам: зелёный – основной соленоид генератора плазмы, синий – дополнительный соленоид генератора плазмы, чёрный – транспортные соленоиды и выходной соленоид пробкотрона, красный – соленоид термобарьера и входной соленоид пробкотрона.

Все соленоиды объединены в четыре независимые группы с собственными системами питания:

1. Группа 1 объединяет два транспортных соленоидов и выходной соленоид пробкотрона.
2. Группа 2 объединяет термобарьерный соленоид и входной соленоид пробкотрона.
3. Соленоид генератора плазмы (СГП) – это основной соленоид, обеспечивающий магнитное поле внутри генератора плазмы.
4. Дополнительный соленоид генератора плазмы (ДСГП) – соленоид в анодной области генератора плазмы, позволяющий локально управлять наклоном силовых линий магнитного поля в области анода генератора плазмы для повышения эффективности плазменного разряда.

Система питания соленоидов позволяет при необходимости изменять индукцию магнитного поля на оси установки в 1.5–2 раза без изменения режима работы силовых цепей. Все системы питания реализованы на основе конденсаторных накопительных линий с параметрами, указанными в таблице 3.

Таблица 3. <i>Параметры системы питания магнитного поля установки КОТ</i>	
Ёмкость батареи ЦС	14.4 мФ
Ёмкость батареи ТС	14.4 мФ
Максимальное напряжение зарядки	3.5 кВ
Ток зарядки батарей	1 А
Максимальная амплитуда тока в соленоидах	3 кА
Длительность импульса тока	40 мс
Максимальная запасенная энергия	180 кДж
Тип и напряжение питания	Трехфазное ~ 380В
Потребляемая мощность (пиковая)	7 кВт
Потребляемая мощность (средняя)	< 1 кВт
Характерное время разрядки при срабатывании заземления	0.4 сек

Стандартный режим работы системы питания включает следующую последовательность операций: зарядка конденсаторных батарей до заданного напряжения, коммутация конденсаторных батарей на соленоиды магнитного поля, снятие остаточного

напряжения на конденсаторном накопителе, ожидание следующего импульса. Для примера на рисунке 1.4 показана принципиальная схема накопительной линии питания соленоидов первой и второй групп установки КОТ.

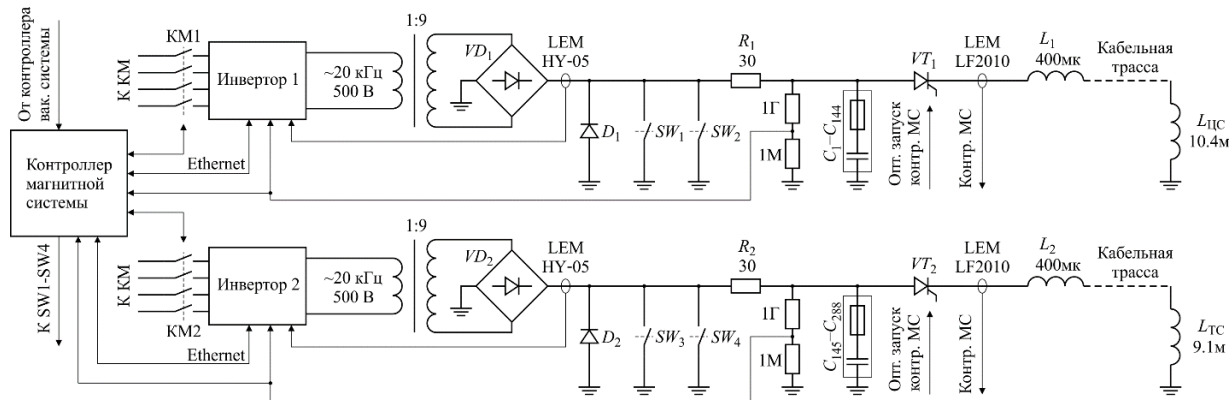


Рисунок 1.4. Упрощенная схема системы питания первой и второй групп соленоидов установки КОТ.

Зарядка конденсаторных батарей осуществляется двумя инверторами, подключёнными к высоковольтному повышающему трансформатору и выпрямителю. В стандартном режиме управления значение зарядного напряжения, тока, а также команды на включение и выключение подаются дистанционно в управляющий контроллер инверторов по сети Ethernet. При достижении заданного напряжения зарядки конденсаторных батарей инверторы переходят в режим поддержания уровня заряда. Коммутация батарей на нагрузку происходит при помощи тиристорных ключей, активируемых оптическим импульсом от системы управления установкой. Типичные осциллограммы токов в соленоидах магнитной системы показаны на рисунке 1.5.

Конденсаторные батареи, тиристорные ключи и устройства заземления размещены в отдельном огороженном помещении, доступ в который запрещён без полного заземления конденсаторных батарей и отключения автоматов силового питания зарядных устройств. Управляющая электроника, переключатели для ручного управления, а также зарядные устройства расположены в отдельном отсеке управления, не содержащем открытых токоведущих частей и допускающем работу в ручном режиме. Визуальный контроль заземления конденсаторных батарей осуществляется при наблюдении за состоянием нормально замкнутых заземлителей (SW2, SW4) через частично прозрачное сетчатое ограждение. Дополнительным средством контроля разрядки конденсаторных батарей являются стрелочные вольтметры, установленные за сетчатым ограждением, а также световая сигнализация, включающаяся автоматически при наличии напряжения на батареях.

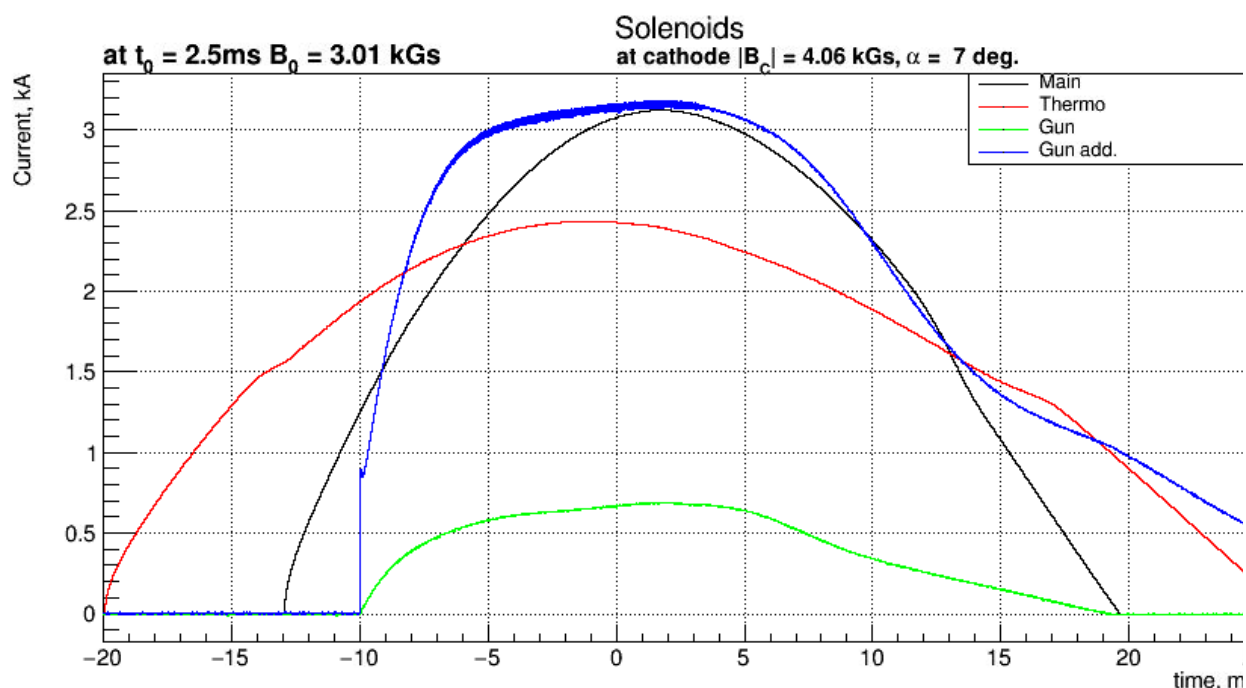


Рисунок 1.5. Осциллограммы тока в соленоидах магнитной системы. Цвета соответствуют следующим группам: зелёный – основной соленоид генератора плазмы, синий – дополнительный соленоид генератора плазмы, чёрный – соленоиды основного магнитного поля, красный – соленоид термобарьера и входная пробка центрального пробкотрона.

Система питания оборудована набором блокировок, включающих концевые переключатели снятия диэлектрических штанг, датчики открытия дверей, а также кнопок аварийного отключения. При срабатывании любой из блокировок в систему управления поступает сигнал, вызывающий замыкание заземлителей и отключение силовых автоматов питания инверторов. Дистанционное измерение напряжения на конденсаторных батареях производится при помощи делителей, подключенных к АЦП системы управления, и стрелочных указателей за сетчатым ограждением конденсаторного отсека.

1.3. Вакуумная система

Система создания и поддержания вакуумных условий на установке КОТ выполнена по безмасляной схеме. Принципиальная схема вакуумной системы показана на рисунке 1.6. Форвакуумный контур состоит из насосов, выполненных по схеме Рутса, и насоса спирального типа, которые совместно обеспечивают стартовый вакуум на уровне 1 Па. Три турбомолекулярных насоса (ТМН) с высокой степенью сжатия по водороду позволяют достичь давления 4×10^{-4} Па. Для подготовки поверхности первой стенки перед рабочим импульсом используется система титанового геттерирования [17], которая обеспечивает коэффициент рециклинга водорода на уровне ~ 1 и создаёт рабочий вакуум 2×10^{-5} Па.

Кроме того, предусмотрена система криогенной гелиевой откачки, которую планируется использовать в экспериментах по изучению сценариев накопления и стабилизации частиц во время работы мощных атомарных инжекторов.

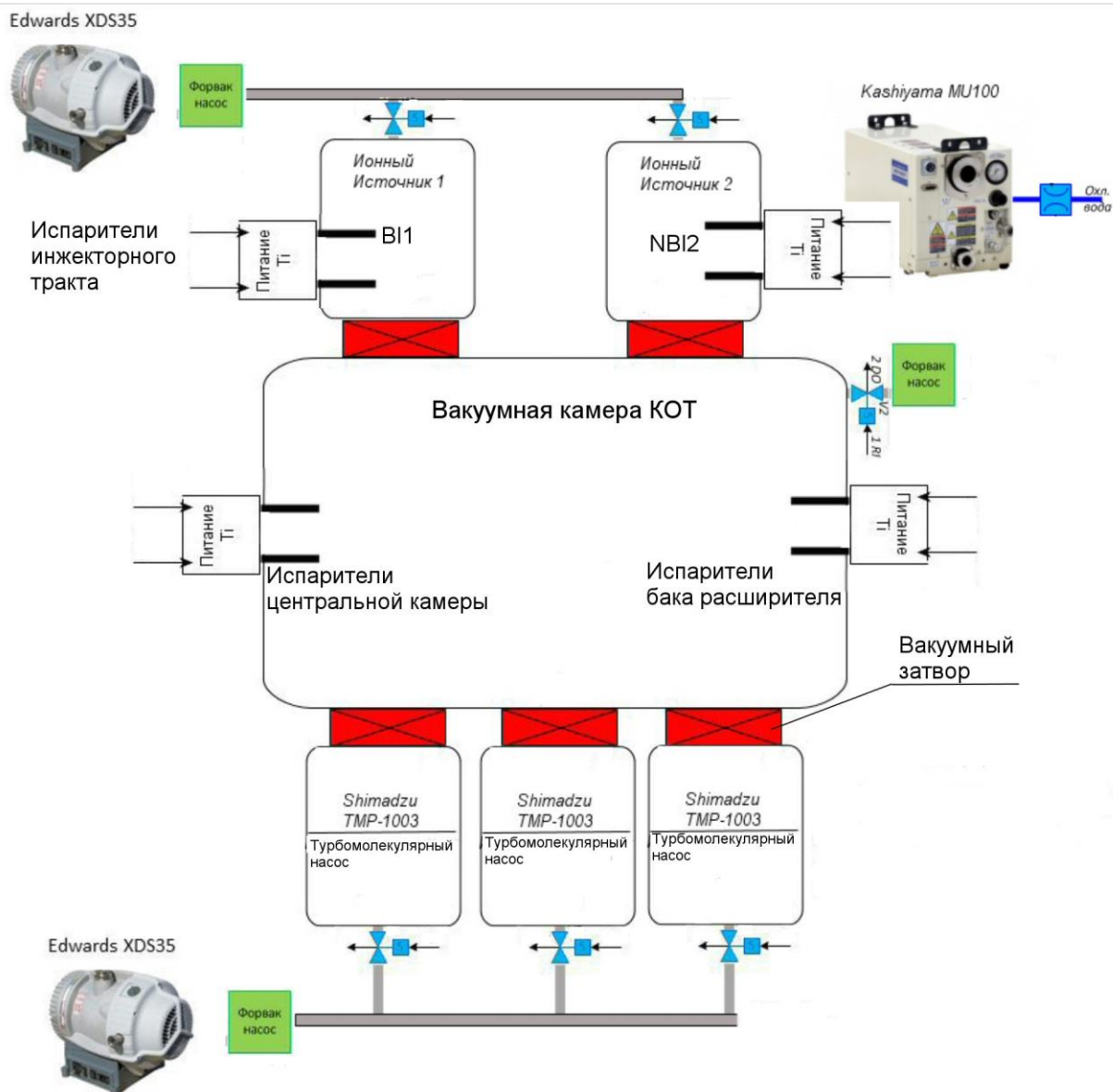


Рисунок 1.6. Схема вакуумной системы установки КОТ.

Размещение основных элементов вакуумной системы на установке показано на рисунке 1.7. Вакуумная система КОТ включает следующие компоненты:

1. Центральную вакуумную камеру с датчиком давления (поз. 1 на рисунке 1.7) – контроллер TPG-256A с интерфейсами RS-485 и аналоговым выходом.
2. Две камеры ионных источников нагревательных инжекторов (поз. 8 на рисунке 1.7), каждая из которых оснащена собственным вакуумметром (контроллер TPG-256A, RS-485 и аналоговый выход).

3. Три турбомолекулярных насоса Shimadzu TMP-1003 (поз. 11 на рисунке 1.7) с блоками питания EI-R04M.
4. Два форвакуумных насоса Edwards XDS35 (поз. 10 на рисунке 1.7) и один форвакуумный насос Kashiyama MU100 (с системой внутреннего контроля охлаждающей воды).
5. Систему титанового геттерирования, состоящую из 12 однофазных титановых стержней: по 4 стержня в каждой камере инжекторного тракта, 2 кольцевых стержня в центральной ячейке и 2 стержня в торцевой камере плазмоприёмника (поз. 12 на рисунке 1.7).
6. Гелиевый крионасос (поз. 13 на рисунке 1.7) производительностью 200 м³/с.
7. Пять шиберных затворов с пневматическим приводом (три на турбомолекулярных насосах и два на ионных источниках), оснащённых концевыми выключателями для сигнализации положений «открыто»/«закрыто».
8. Шесть вакуумных вентилей с концевыми выключателями (положения «открыт»/«закрыт»).

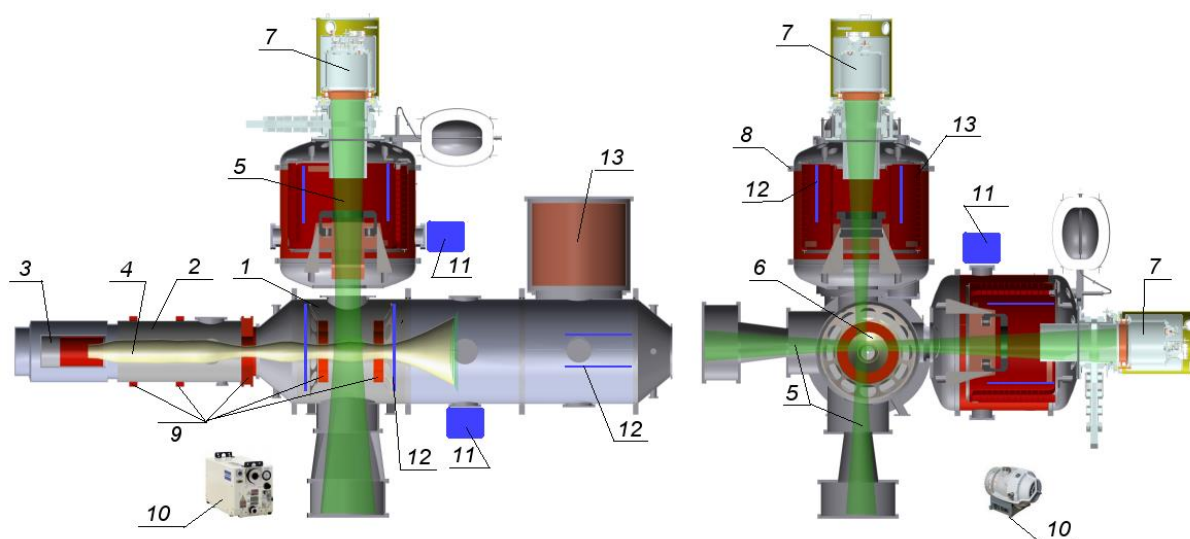


Рисунок 1.7. Размещение основных элементов вакуумной системы.

1 – Центральная ячейка вакуумной камеры, 2 – пушечный бак, 3 – плазменный генератор, 4 – мишенная плазма, 5 – пучки нейтральных атомов, 6 – плазмоид, 7 – ионный источник, 8 – инжекторный бак, 9 – соленоиды магнитной системы, 10 – форвакуумный насос, 11 – турбомолекулярный насос, 12 – титановые испарители, 13 – криосорбционный насос.

Система титанового геттерирования с периодичностью 40 с напыляет свежий слой титана на внутреннюю поверхность первой стенки вакуумной камеры и стенки

инжекторных баков. Периодичность циклов и длительность работы дуговых испарителей могут оперативно изменяться из программы управления установкой, что позволяет гибко адаптировать режим откачки к различным экспериментальным сценариям.

1.4. Генератор плазмы

Для создания мишенной плазмы, необходимой для захвата атомарных пучков, используется дуговой генератор плазмы с кольцевым разрядным каналом. Конструкция генератора (рисунок 1.8) была отработана ранее на установках типа АМБАЛ [18–20].

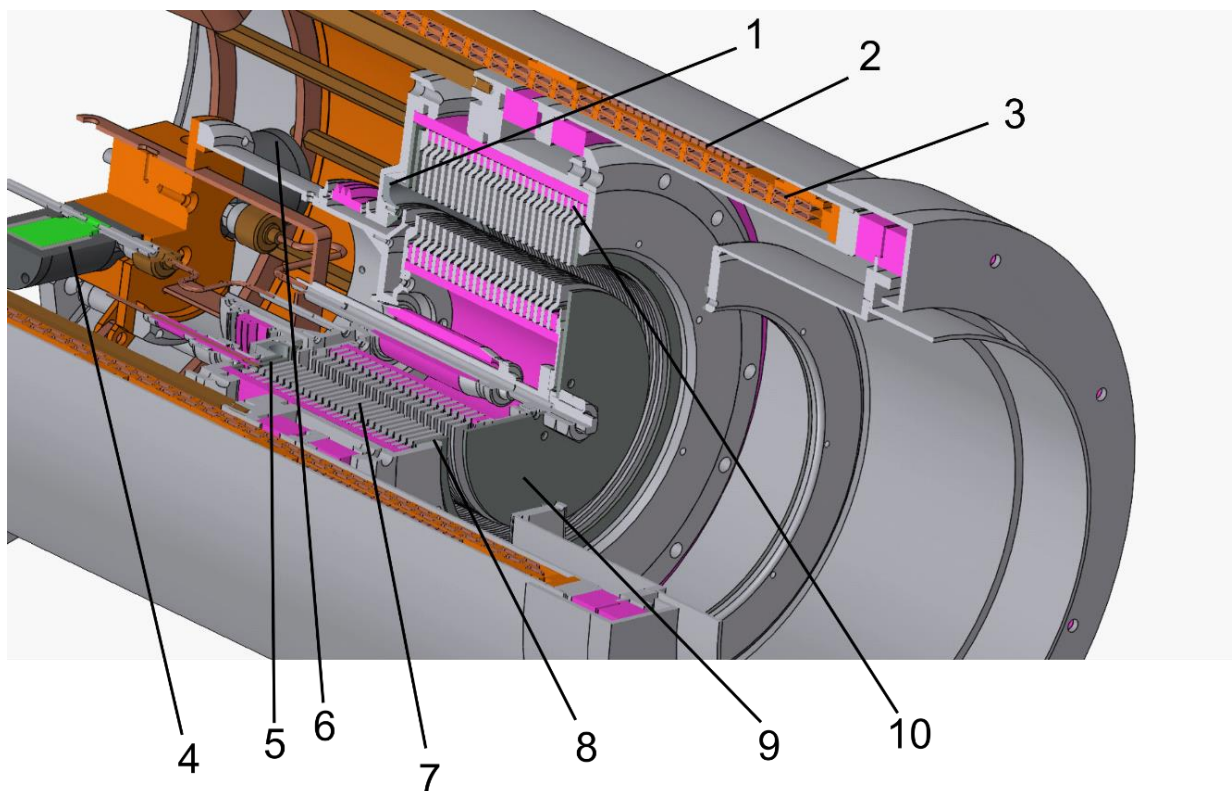


Рисунок 1.8. Дуговой генератор мишенной плазмы с кольцевой формой разрядного канала. 1 – алюминиевый катод, 2 – дополнительный соленоид, 3 – основной соленоид, 4 – катодный клапан, 5 – молибденовый электрод инициации разряда, 6 – анодный клапана, 7 – массив плавающих электродов из нержавеющей стали, 8 – молибденовый анод, 9 – молибденовый плавающий электрод, 10 – изоляционные керамические кольца.

Генератор работает на водороде, который поступает в разрядный объем через два электромагнитных клапана: катодный (поз. 4 на рисунке 1.8) – в катодную область, и анодный (поз. 6 на рисунке 1.8) – в анодную область. Напуск газа осуществляется за несколько миллисекунд до инициации разряда. Инициация происходит посредством подачи высоковольтного импульса на вспомогательный электрод (поз. 5 на рисунке 1.8) и сопровождается поверхностным пробоем поджигового изолятора, расположенного в прикатодной области генератора плазмы (поз. 5 рис.1.8). После инициации основной разряд

поддерживается между катодом с алюминиевой вставкой (поз. 1 на рисунке 1.8), имеющим желобчатую поверхность для увеличения эффективной площади, и молибденовым анодом (поз. 8 на рисунке 1.8). Для стабильного горения разряда и предотвращения металлизации плазмы между основными электродами расположены 23 пары электродов под плавающим потенциалом, изготовленных из нержавеющей стали (поз. 7 на рисунке 1.8). Электроды профилированы специальным образом, исключаяющим прямую видимость изоляционных колец со стороны разрядного канала, что позволяет продлить срок службы генератора и защитить керамические изоляторы (поз. 10 на рисунке 1.8) от металлизации поверхности. Сформированный разрядный канал имеет внутренний радиус 5.5 см и внешний 6.5 см. При этом внутренний радиус анода на 1 мм больше внешнего радиуса катода, что предотвращает прямую видимость электродов дугового генератора вдоль силовой линии магнитного поля.

Необходимая конфигурация магнитного поля в области генератора создаётся основным и дополнительным соленоидами (поз. 2 и 3 на рисунке 1.8). Основной соленоид создаёт почти параллельное оси установки магнитное поле, в то время как дополнительный повышает магнитное поле в области анода. Таким образом увеличивается расстояние между магнитными силовыми линиями катода и анода и улучшается магнитная изоляция электродов. Кроме того, предусмотрена возможность подачи управляющего потенциала на центральный молибденовый электрод для дополнительного контроля параметров разряда.

Электропитание дугового разряда осуществляется 5-звенной LC-линией, заряжаемой до напряжения 3 кВ. Типичные параметры разряда: длительность 4 мс, полное количество газа до $10 \text{ бар} \cdot \text{см}^3$, максимальный ток до 20 кА, напряжение на разряде до 1 кВ. Напряжение на разряде зависит от количества напускаемого газа и магнитной конфигурации. Из-за больших тепловых нагрузок работа в режимах с максимальным током и напряжением может приводить к разрушениям электродов. Это влияние особенно заметно на электродах вблизи анода. В конструкции генератора предусмотрена возможность прерывания дугового разряда путём коммутации игнитрона параллельно плазме.

Генератор плазмы обеспечивает формирование мишенной плазмы с концентрацией электронов не менее 10^{13} см^{-3} и электронной температурой порядка 30–40 эВ. Достигнутые характеристики удовлетворяют требованиям по эффективному захвату атомарных пучков и позволяют реализовать экспериментальную программу, направленную на изучение механизмов стабилизации плазмоида с высоким относительным давлением.

1.5. Система атомарной инжекции

Одной из критически важных систем для успешной реализации программы по удержанию плазмы с высоким относительным давлением на установке КОТ является

инжекция в плазму мощных атомарных пучков. Благодаря достигнутому в ИЯФ СО РАН прогрессу в строительстве инжекторов атомов [12; 21] в экспериментах на установке КОТ имеется возможность обеспечить инжекцию в ловушку около 3 МВт мощности в течение рабочего импульса с эквивалентной плотностью тока на поверхности плазменного столба до 3 А/см^2 . Система атомарной инжекции установки КОТ [22–24] создана на основе двух идентичных инжекционных модулей с геометрической фокусировкой пучков, разработанных для нагревного комплекса открытой ловушки с обращённым полем C-2W (TAE Technologies) [25]. Инжекторы расположены в центральном сечении магнитной ловушки, один – горизонтально, второй – вертикально. Основные характеристики инжекционного модуля представлены в таблице 4.

Таблица 4. <i>Основные характеристики инжекторов установки КОТ</i>	
Энергия частиц	15 кэВ
Эквивалентный ток атомов	100 А
Мощность в атомах	1.5 МВт
Угловая расходимость	17×38 мрад
Длительность импульса инжекции	5 мс
Рабочий газ	водород/дейтерий
Доля частиц в пучке с полной энергией	85%
Фокусное расстояние ИОС	2.7 м
Содержание тяжёлых примесей (по току)	$\leq 0.5 \%$

Общий вид инжекторов установки КОТ представлен на рисунке 1.9. Ионный источник инжектора состоит из четырёх дуговых генераторов плазмы с общим анодом (поз. 9 на рисунке 1.9) [26], которым является плазменная камера. Ток разряда в каждом генераторе до 700 А. Расширительный объем плазменной камеры имеет периферийное мультипольное магнитное поле, быстро спадающее к оси плазменной камеры. Поле создается набором постоянных магнитов из NdFeB размером $9 \times 12 \times 80$ мм с остаточной намагниченностью 1.3 Тл. Периферийное магнитное поле увеличивает поток плазмы на эмиттер ионов и повышает его однородность. 32 ряда магнитов расположены по азимуту с чередующейся полярностью. В каждом ряду по 4 магнита. Ионно-оптическая система (ИОС) инжектора (поз. 4 на рисунке 1.9) состоит из трёх электродов рабочим диаметром 340 мм со щелевыми апертурами размером 2×50 мм. Форма электродов – сферическая, с радиусом кривизны ~ 2.7 м, что обеспечивает геометрическую фокусировку пучка. Угловая

расходимость пучка, формируемого такой ИОС, различна в двух ортогональных направлениях: вдоль щелей его расходимость определяется температурой ионов, а поперёк – температурой ионов и абберациями в ИОС. После ускорения в электрическом поле ИОС ионы попадают в нейтрализатор (поз. 7 на рисунке 1.9), где в результате резонансной перезарядки конвертируются в атомы с коэффициентом конверсии $\sim 85\%$. Не перезарядившаяся компонента пучка отклоняется в магнитном сепараторе на основе постоянных магнитов и попадает на специальный приёмник ионов, изготовленный из меди.

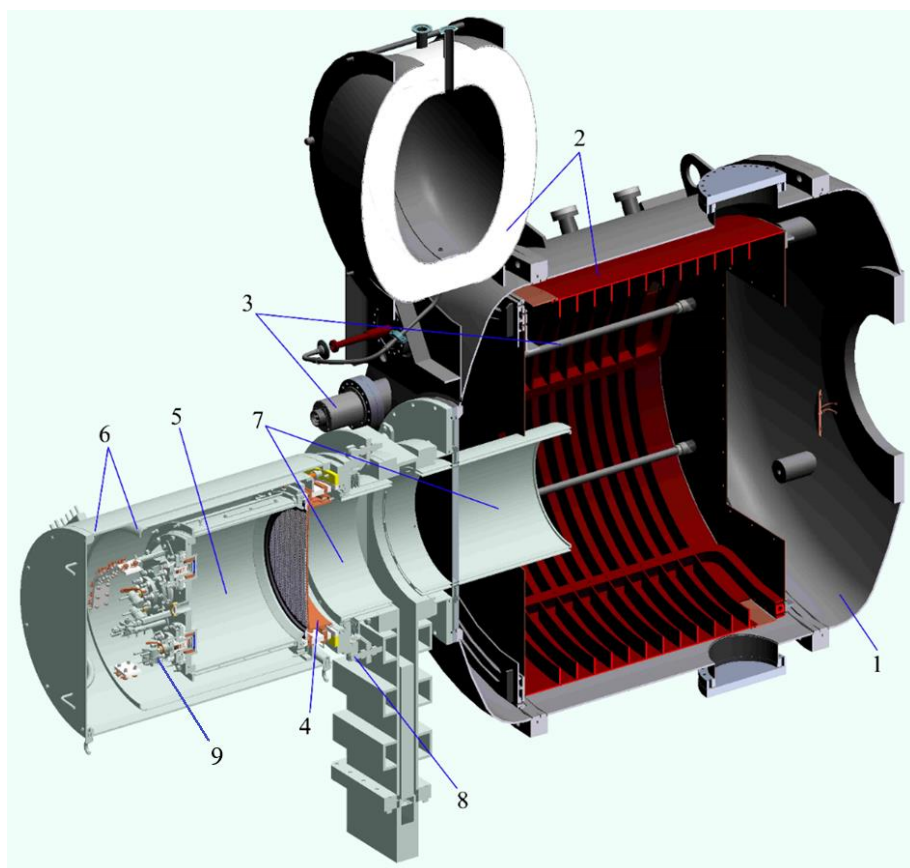


Рисунок 1.9. 3D-модель инжектора в разрезе. 1 – вакуумная камера, 2 – азотит, 3 – титановые испарители; 4 – изоляторный узел с системой высоковольтных электродов; 5 – плазменная камера; 6 – магнитные экраны наружный и внутренний; 7 – нейтрализатор; 8 – юстировочный узел; 9 – дуговые генераторы.

Осциллограммы тока и напряжения пучка (рисунок 1.10) регистрируются с помощью АЦП, разработанных в ИЯФ СО РАН [3]. Эти АЦП расположены в системах управления инжекторами.

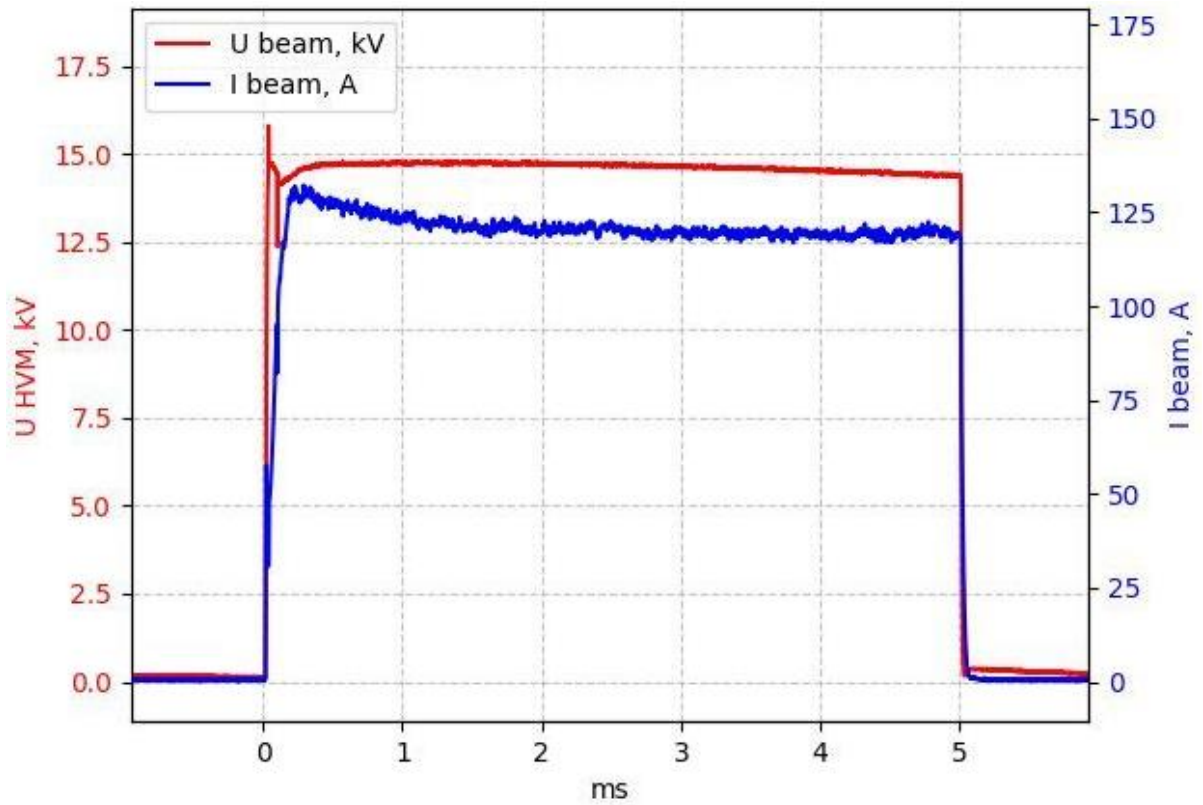


Рисунок 1.10. Осциллограмма тока и ускоряющего напряжения пучка.

Распределение плотности тока инжектора на любом расстоянии от ИОС хорошо описывается функцией, следующей из модели распространения пучка, предложенной в работе [27]:

$$J(x, y, z) = \frac{I_{NB}}{\pi R^2} \frac{1}{\pi z^2 \alpha \beta} \int_{-R}^R \int_{-\sqrt{R-y\alpha^2}}^{\sqrt{R-y\alpha^2}} \exp \left(-\frac{\left(\frac{y\alpha - y}{z} - \frac{y\alpha}{F} \right)^2}{\alpha^2} - \frac{\left(\frac{x\beta - x}{z} - \frac{x\beta}{F} \right)^2}{\beta^2} \right) dx_\beta dy_\alpha,$$

где R – радиус электродов ИОС, F – фокусное расстояние ИОС, α и β – угловые расходимости пучка в двух ортогональных направлениях. Рассчитанное распределение плотности тока в плоскости инжекции пучка в плазму (на расстоянии 250 см от ИОС) показано на рисунке 1.11.

Система атомарной инжекции на сегодняшний день частично введена в эксплуатацию. Стабильно работает один инжектор на проектных параметрах: 120 А, 15 кэВ, 5 мс. Второй инжектор продемонстрировал способность работать в режимах, близких к номинальным: ток пучка 100 А, энергия 15 кэВ, суммарная длительность 3 мс. Для повышения стабильности рабочего импульса запланирован комплекс технических мероприятий, направленных на модернизацию существующей ИОС. В совокупности оба инжектора сейчас обеспечивают надёжную базу для нагрева и накопления быстрых частиц, необходимую для реализации программы исследований диамагнитного удержания плазмы на установке КОТ.

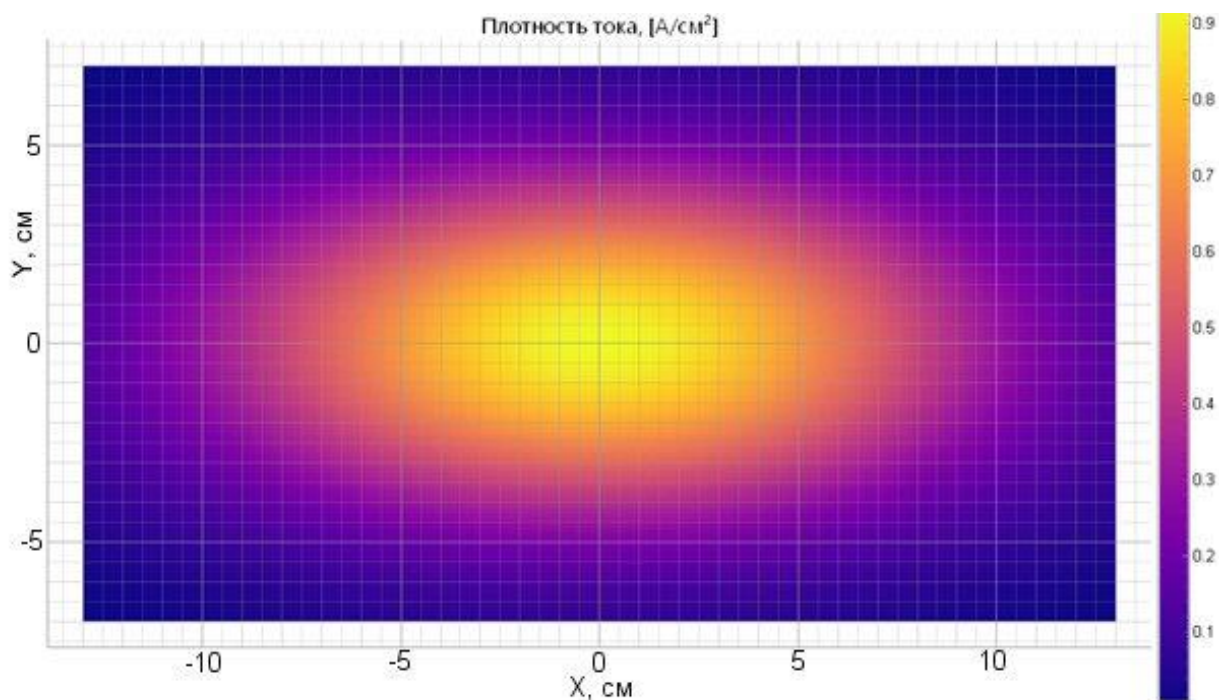


Рисунок 1.11. *Распределение плотности тока одного инжектора в плоскости инжекции пучка в плазму.*

1.6. Система управления и контроля

Система управления и контроля установки КОТ имеет распределённую архитектуру (рисунок 1.12). В ее состав входит пять крейтов, каждый из которых контролирует работу одной из подсистем установки: вакуумной, магнитной, атомарной инжекции (по одному крейту на каждый инжектор) и источником плазмы. Управляет работой приборов, размещённых в крейте, контроллер магистрали (крейт-контроллер). Контроллеры крейтов взаимодействуют между собой и с консолью оператора на базе ПК по каналам связи Ethernet. Главным (ведущим) является контроллер вакуумной системы. Он формирует общие для всей системы сигналы временной синхронизации, а также отслеживает текущее состояние остальных контроллеров и подчинённого им оборудования, используя как канал связи Ethernet, так и специальные оптические линии связи.

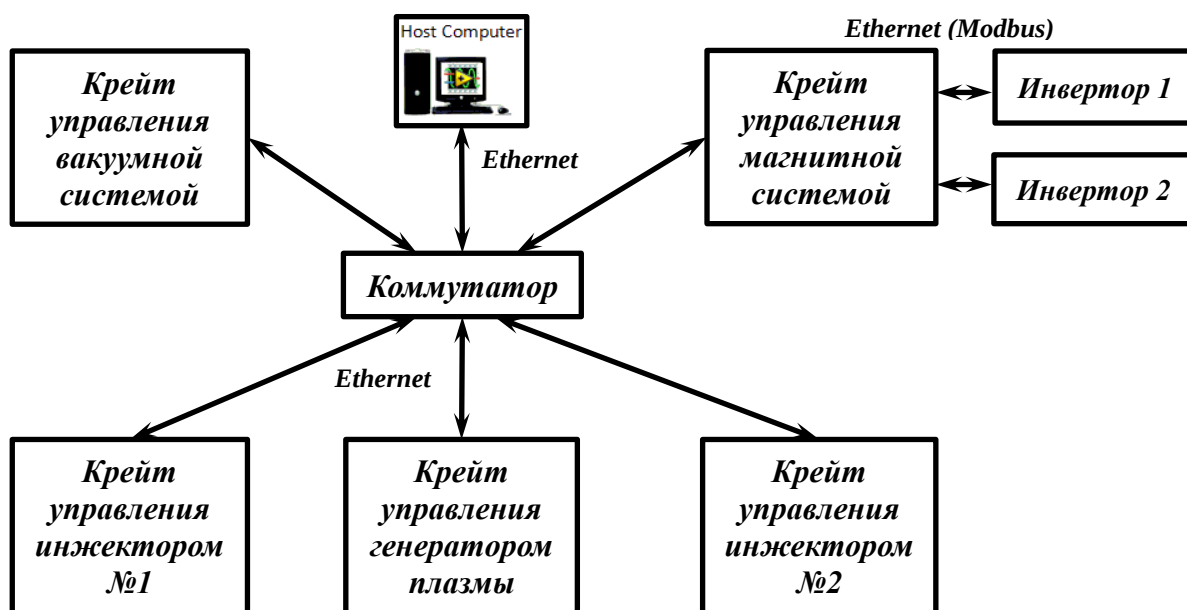


Рисунок 1.12. Архитектура системы управления и контроля установки КОТ.

Конструктив крейтов – Евромеханика, формфактор 3U*84НР. Магистрально-модульная архитектура крейтов предусматривает размещение в нём одного крейт-контроллера и 12-ти модулей управления и контроля различного назначения: модули дискретного ввода-вывода (I/O), модули аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования (АЦП и ЦАП), модуль генерации временных интервалов (ГВИ), а также модуль интерфейса RS-485, используемый для сопряжения с периферийными устройствами. Все модули крейта многоканальные, а их порты ввода-вывода оснащены встроенными элементами гальванической развязки.

Базовые модули системы управления

Контроллер магистрали крейта (рисунок 1.13)

Крейт-контроллер обеспечивает взаимодействие с модулями внутри крейта и обмен данными с контроллерами других крейтов и управляющим ПК. Его ядром является программируемая логическая матрица, содержащая 32-разрядный двухъядерный процессор, работающий под управлением операционной системы Linux. Модуль контроллера оснащен оперативной памятью объемом 1 Гбайт, гигабитным сетевым интерфейсом для связи с другими контроллерами и управляющим ПК, двумя внутренними оптоволоконными каналами связи Ethernet-100FX и двенадцатью контроллерами каналов связи SPI, реализованными в логической матрице и обеспечивающими обмен данными со всеми модулями крейта.

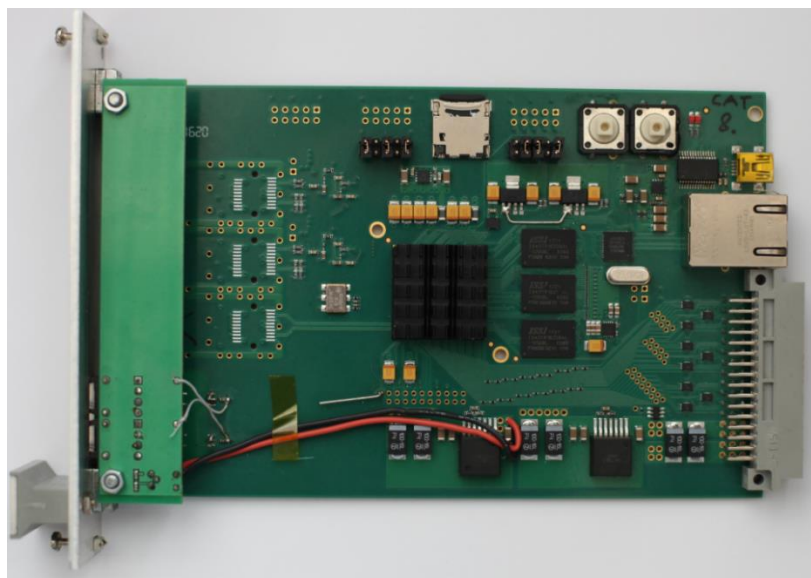


Рисунок 1.13. Фотографии контроллера магистрали крейта.

Модуль УР/СДС (рисунок 1.14)

Модуль УР/СДС (управляющий регистр/сборщик двоичных состояний) обеспечивает бинарное управление (включение/выключение) устройствами, например, шибером ионного источника, реле землителя, и контролирует состояние этих устройств (включено/выключено). Конструктивно модуль УР/СДС состоит из платы основания с интерфейсным узлом к магистрали крейта, построенным на основе программируемой логической матрицы (ПЛИС), и узлом из 15 приёмников/формирователей входных/выходных сигналов, разбитым на два независимых блока. Первый блок содержит восемь элементов ввода/вывода, а второй – семь. Каждый блок может выполнять функции либо многоканального приёмника внешних логических сигналов (режим сборщика двоич-

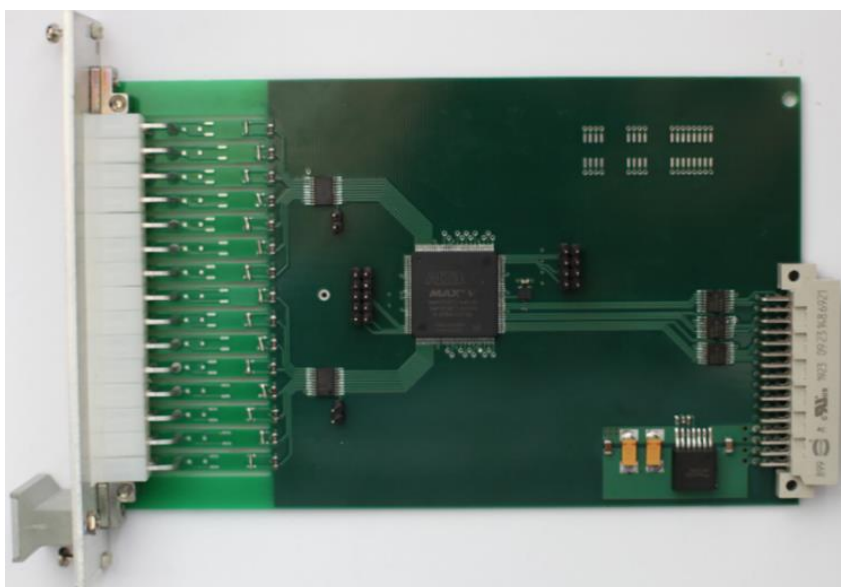


Рисунок 1.14. Фотографии модуля УР/СДС.

ных состояний СДС), либо функции формирователя сигналов управления (режим управляющего регистра УР). В режиме СДС внешние сигналы поступают на входы блока через встроенные оптронные развязки (TLP2367 с соответствующими элементами защиты). В режиме УР выходные сигналы блока формируются твердотельными реле TLP222. Модули УР и модули СДС отличаются набором базовых регистров и прошивкой программируемой матрицы.

Модуль АЦП (рисунок 1.15)

Модуль АЦП – восьмиканальный. Измерительные каналы гальванически изолированы друг от друга и от цифрового узла модуля. Они могут работать в режиме вольтметра (разовые измерения) и в осциллографическом режиме (фиксация осциллограмм входных сигналов с максимальной частотой дискретизации 600 кГц). Диапазон изменения входных сигналов от -10В до +10В, результаты представлены в виде 16-ти разрядных слов.

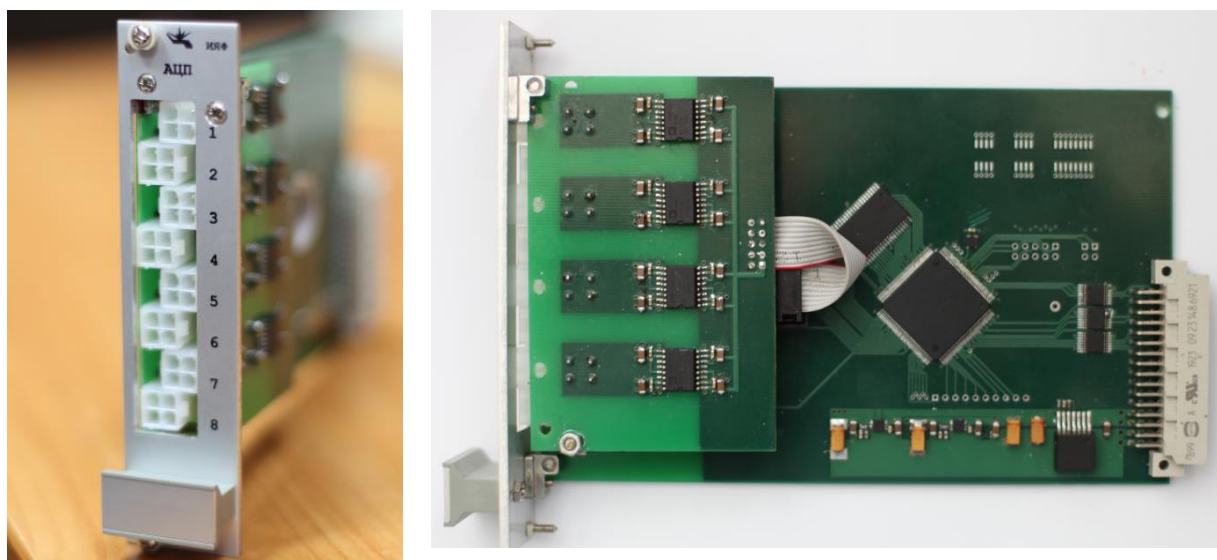


Рисунок 1.15. Фотографии модуля АЦП.

Модуль ЦАП (рисунок 1.16)

Модуль ЦАП — восьмиканальный. Все 12-разрядные тракты формирования выходных сигналов с диапазоном изменения от 0 до +10 В на резистивной нагрузке более 1 кОм гальванически изолированы друг от друга и от цифрового узла. Цифровой узел обеспечивает взаимодействие этих трактов по магистрали крейта с крейт-контроллером.

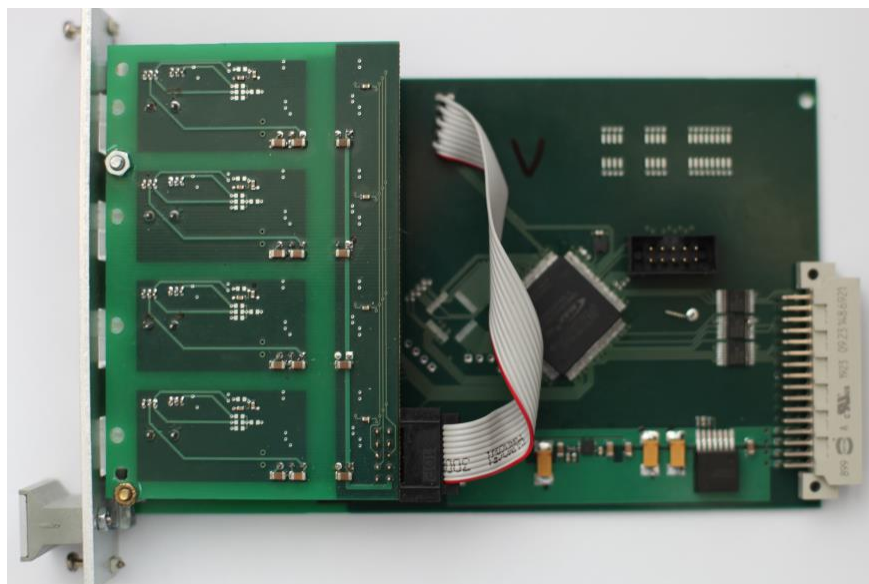


Рисунок 1.16. Фотографии модуля ЦАП.

Модуль ГВИ (рисунок 1.17)

Модуль ГВИ формирует сигналы запусков по 15-ти независимым каналам. Дискретность формирования временных интервалов 100 нс. Сигналы запусков формируются при наличии общего сигнала разрешения WORK.

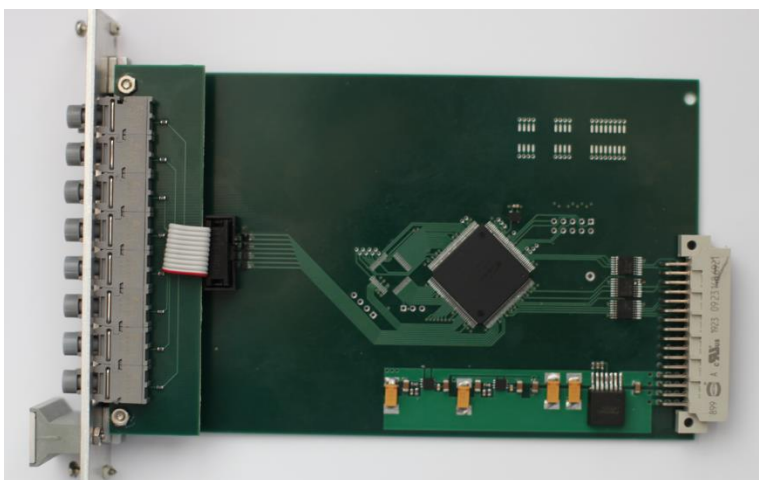


Рисунок 1.17. Фотографии модуля ГВИ.

Модуль контроллера шины RS-485 (рисунок 1.18)

Модуль RS-485 имеет два канала и ориентирован на работу с вакуумным технологическим оборудованием: насосами, вакуумметрами и датчиками давления.

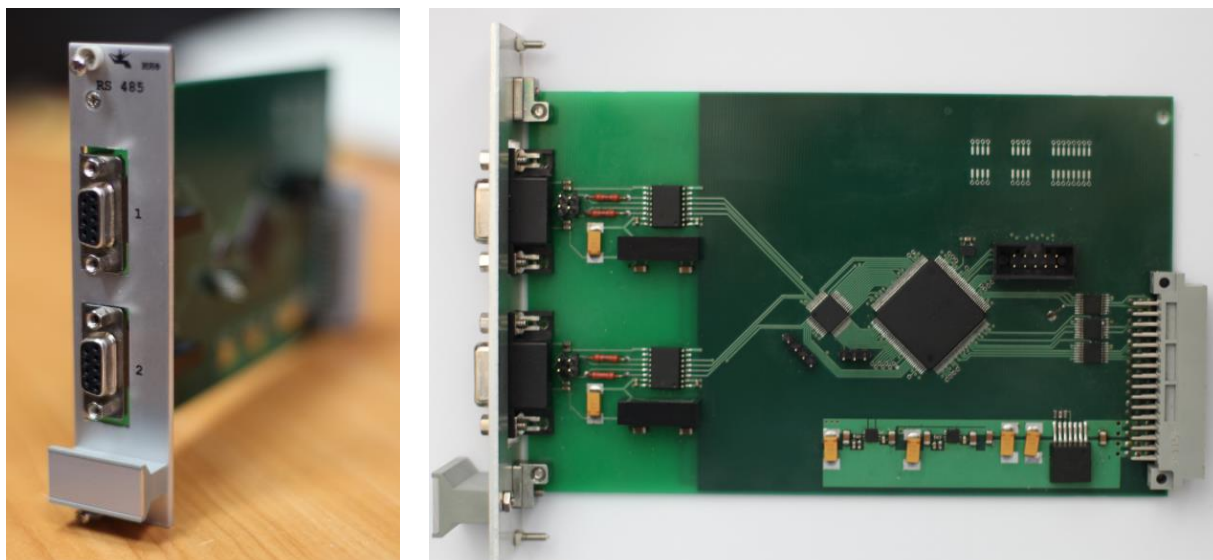


Рисунок 1.18. Фотографии модуля контроллера шин RS-485.

Выносной многоканальный модуль ввода/вывода с интерфейсом RS-485 (рисунок 1.19)

Основой этого модуля является микроконтроллер SiLabs C8051F060. На его базе реализованы два канала 16-разрядных АЦП, два канала 12-разрядных ЦАП, восемь цифровых входов и восемь выходов. Рабочий диапазон АЦП и ЦАП составляет от 0 до 2.5 В. Цифровые выходы управляют твердотельными реле, способными коммутировать 60 В, 500 мА. Цифровые входы гальванически изолированы с помощью оптронов.

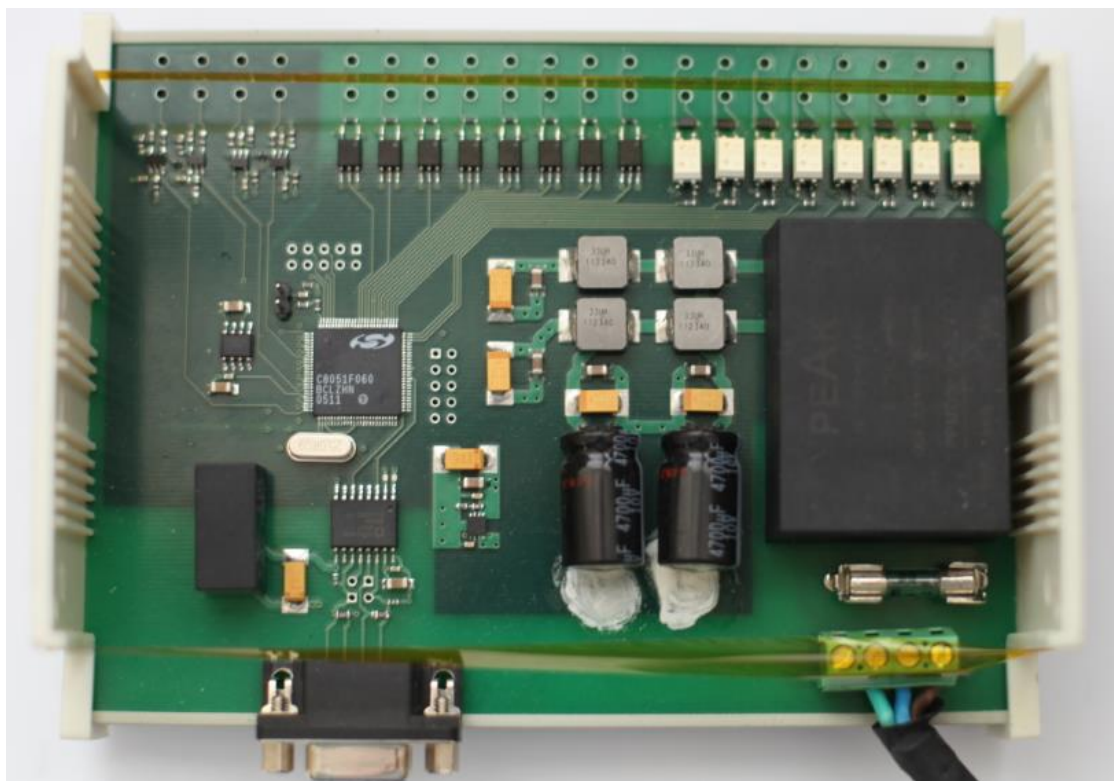


Рисунок 1.19. Фотография выносного многоканального модуля ввода/вывода с интерфейсом RS-485.

1.7. Программное обеспечение системы управления

Схема взаимодействия программных и аппаратных компонент

На рисунке 1.20 представлена структурная схема комплекса установки КОТ, демонстрирующая сопряжение всех ее уровней — от периферийных плат до уровня сервера баз данных.

Основой нижнего уровня является крейт-контроллер на базе системы-на-кристалле (SoC) Cyclone V. Конфигурационный файл программируемой логической матрицы (ПЛИС) Cyclone V содержит контроллер последовательной шины крейта, поддерживающий высокоскоростной обмен данными по каналу прямого доступа (DMA) с памятью объемом 512 Мб в ОЗУ процессора. Вторая половина ОЗУ (объемом в 512 Мб) используется операционной системой (ОС) Linux и прикладным программным обеспечением.

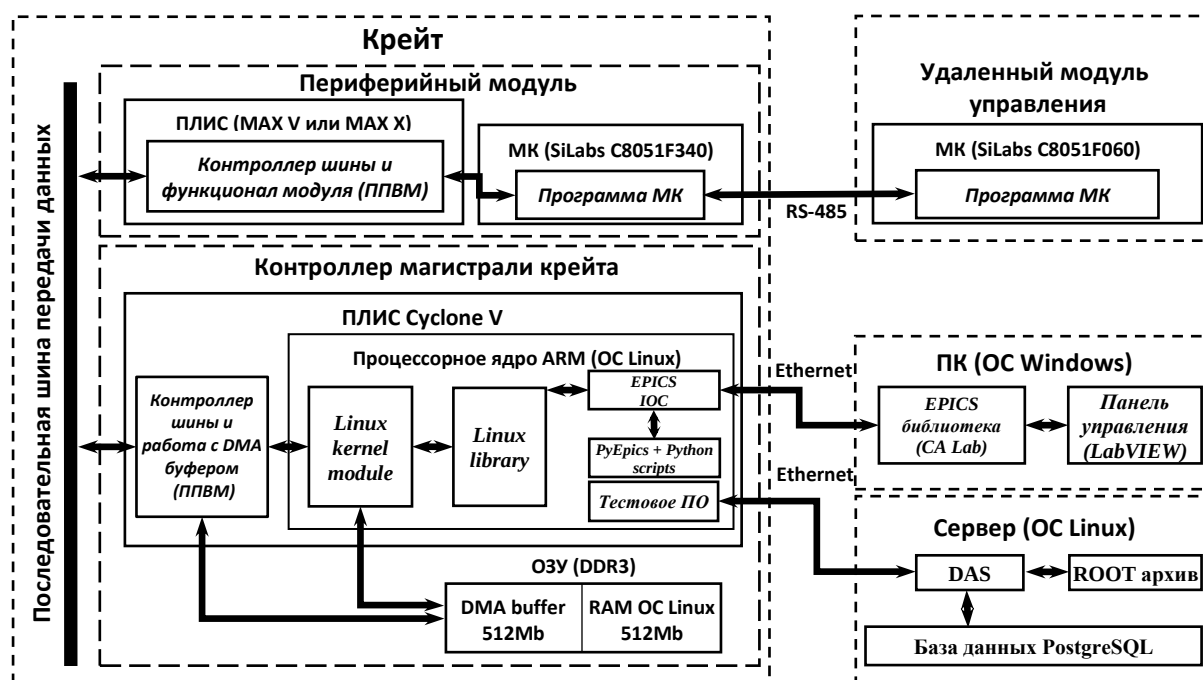


Рисунок 1.20. Структурная схема программно-аппаратного комплекса системы управления установки КОТ.

В пространстве ядра ОС функционирует специализированный драйвер “Linux kernel module”, отвечающий за связь с элементами ПЛИС, обработку аппаратных прерываний и координацию DMA-потоков. Основой прикладного программного обеспечения является библиотека функций “Linux library”. В пространстве ядра ОС одновременно работают три независимых модуля: сервер EPICS IOC “Input Output Controller”, управляющий сетевыми переменными, интерпретатор сценариев “PyEpics” и “Python scripts”, исполняющий скрипты, считываемые с SD-карты крейт-контроллера, и локальная утилита тестового ПО, поддерживающая взаимодействие с регистрами периферийных модулей крейта.

Обмен информацией с периферийными модулями крейта производится по последовательной шине. Каждый такой модуль содержит ПЛИС (MAX V или MAX X), на базе которой реализованы контроллер указанной шины и устройства, обеспечивающие реализацию необходимого набора функций. Конфигурационный файл этих ПЛИС создавался в среде Quartus с использованием языка описания Verilog. ПЛИС периферийных модулей имеют фиксированную конфигурацию, заданную при их проектировании. ПЛИС модуля контроллера магистрали крейта конфигурируется при старте системы и допускает обновление его конфигурации по сети Ethernet с помощью протокола SSH. Связь с выносными модулями управления осуществляется при помощи модуля контроллера шин через интерфейс RS-485.

Многоуровневая архитектура ПО установки КОТ

Программный комплекс установки КОТ имеет иерархическую архитектуру, обеспечивающую сквозной двусторонний поток информации от датчиков на микроконтроллерах до хранилища данных.

Первый уровень — конфигурационные файлы микроконтроллеров периферии, включающие коды контроллера канала связи RS-485 и автономного многоканального блока ввода-вывода. При этом все процедуры опроса каналов сбора технологических данных и формирования управляющих сигналов реализуются на уровне периферийных модулей ввода-вывода.

Второй уровень — программное ядро Linux, функционирующее на процессорном модуле крейта. Оно поддерживает взаимодействие крейт-контроллера с остальными модулями крейта, контролирует работу каналов сбора данных, обрабатывает прерывания от периферии.

Третий уровень — прикладное пространство пользователя Linux в памяти процессора. Его основой являются:

- Библиотека функций для Linux, которая предоставляет внешнему ПО прямой интерфейс к ресурсам крейт-контроллера и модулей крейта, а также обеспечивает взаимодействие с периферийными устройствами, подключёнными к шине RS-485.
- Диагностическая консольная утилита, работающая как автономный инструмент, обеспечивающий прямой доступ к адресному пространству базовых элементов ПЛИС периферийных модулей. Она способна работать одновременно с основным сервером и позволяет быстро найти причину сбоя в работе аппаратуры крейта без использования сетевых служб EPICS.

- Сервер EPICS IOC, преобразующий данные аппаратных драйверов в глобальные сетевые переменные (Process Variables, PV), делая их доступными для всей управляющей инфраструктуры.

Четвертый (верхний) уровень предназначен для управления установкой и хранения результатов экспериментов. Он состоит из двух компонентов:

- Рабочее место (РМ) оператора на базе персонального компьютера под управлением ОС Windows, представляющее собой верхний уровень системы управления установкой КОТ. Взаимодействие сетевых переменных EPICS с графическим интерфейсом осуществляется посредством библиотеки CA Lab. На этой платформе построена главная панель оператора, обеспечивающая мониторинг технологических параметров, ввод управляющих констант, контроль состояния блокировок и защит, управление оборудованием установки.
- Сервер базы данных (выделенный компьютер), предназначенный для хранения результатов экспериментов. Архитектура этого узла унаследована от установки ГДЛ (Газодинамическая ловушка). Параметры конфигурации и настройки измерительных трактов диагностического и управляющего комплексов хранятся в реляционной СУБД PostgreSQL. Потоки же данных, формируемые АЦП, считываются по окончании рабочего импульса установки из их DMA-буферов по TCP/IP, упаковываются и сохраняются в оптимизированном ROOT-архиве.

Динамическая конфигурация и верификация топологии крейта

В код драйвера, написанного на языке программирования C++, включена функция *moduleConfigure*. Стартовый скрипт инициализации передает ей данные о типе оборудования, имени порта и его физическом номере (диапазон 0–11). При запуске скрипт опрашивает модуль крейта используя низкоуровневую библиотеку функцией *getpozid*, считывая его уникальный заводской ID. Драйвер сверяет реальный идентификатор с ожидаемым из скрипта. При несовпадении генерируется ошибка *asynError* и данный порт деактивируется во избежание конфликтов. В случае успеха создается виртуальный объект управления модулем крейта. Это позволяет при изменении набора модулей в том или ином крейте простой правкой текстового файла процедуры запуска переконфигурировать работу прикладного ПО и исключить тем самым процедуру переработки бинарного кода драйвера.

Все периферийные модули в крейт-контроллере многоканальные. Поэтому, кроме портов на магистрали крейта, производится сопоставление сетевых переменных (PV) с физическими портами в модулях крейта с помощью файлов-шаблонов формата (template). Их использование позволяет оператору обращаться к этим портам по их символьному

имени PV, что упрощает добавление новых сенсоров простым добавлением строк в файлы шаблонов.

В БД EPICS запись (рекорд) связывается с аппаратурой короткой строкой, содержащей имя порта и порядковый индекс канала. Ядро EPICS самостоятельно находит соответствующий C++ объект и транслирует ему этот индекс.

Автономные распределенные алгоритмы («Python-сценарии»)

Алгоритмы управления оборудованием каждого крейта реализуются их крейт-контроллерами. Это радикально снижает трафик в Ethernet-сети и устраняет влияние на скорость исполнения указанных алгоритмов сетевых издержек. За интеграцию процедур управления и контроля в IOC отвечает программный модуль *ScenarioConfigure*. Реализация того или иного процесса (например, зарядки конденсаторных батарей или опрос состояния элементов блокировки и защит) производится следующим образом.

Процесс управления или контроля описывается на языке Python с применением библиотеки PyEpics, что позволяет скриптам оперировать локальными PV. Файлы скриптов физически размещены на SD-карте контроллера и обрабатываются интерпретатором. С его помощью оператор может менять логику работы тех или иных устройств на работающем оборудовании без перекомпиляции основного C++ драйвера IOC. Запуск сценария инкапсулирован в специальную PV-триггерную переменную (например, *cs2_run_scenario* или *cs5_run_scenario*). Изменение значения этого триггера из верхнего уровня (панель LabVIEW на Windows-ПК) инициирует немедленный старт Python-скрипта на процессорном модуле. Управляющий алгоритм выполняется в рамках каждого крейта изолированно и с высокой скоростью, передавая на верхний уровень только финальные флаги состояния. При этом сохраняется возможность принудительной остановки выполнения алгоритма по инициативе верхнего уровня.

Сервисное диагностическое ПО (Тестовая утилита)

Для ускорения пусконаладочных работ и оперативного поиска дефектов на уровне крейта создано специальное тестовое приложение. Оно исполняется в пользовательском пространстве Linux на ARM-ядре контроллера крейта. Главное преимущество инструмента – его параллельная работа с активным EPICS IOC, что позволяет проводить глубокую аппаратную диагностику в реальном времени без остановки сервера ввода-вывода и технологического процесса.

Утилита выполнена в виде простого интерактивного терминала и реализует следующие принципы:

- Быстрая навигация: используя клавиши-стрелки, оператор с определяемой только его возможностями скоростью перемещается между модулями крейта и их портами ввода/вывода.
- Контекстная адаптация: программа определяет тип установленного модуля и динамически перестраивает список доступных операций. Для модулей АЦП активируются команды тестового съема показаний, для модулей дискретного ввода/вывода — переключения реле или чтения состояния концевых выключателей.
- Прямое обращение к регистрам: утилита обеспечивает непосредственный доступ к узлам, реализованным на элементах ПЛИС (MAX V / MAX X) в их адресном пространстве. Это позволяет оператору быстро локализовать любую неисправность (например, проверить факт прихода физического сигнала в регистр), исключив из цепи проверки корректности работы оборудования абстракций EPICS.

Верхний уровень системы управления

В процессе управления установкой КОТ задействованы три программных приложения с графическим интерфейсом, функционирующих под управлением ОС Windows: основной программы (обеспечивающей контроль магнитной и вакуумной подсистем, генератора плазмы и диагностического оборудования) и двух независимых утилит, обеспечивающих управление системой атомарной инжекции. Основная программа разработана в среде LabVIEW. Её графический интерфейс представлен на рисунке 1.21.

Окно этого интерфейса имеет 5 вкладок. На первой вкладке (рисунок 1.21а) размещены элементы управления запуском вакуумного крейта, крейта магнитного поля и крейта плазменной пушки. Вкладки «NBI1» и «NBI2» (рисунок 1.21б) предназначены для мониторинга состояния элементов каждого из атомарных инжекторов, а также для формирования их импульса запуска. Вкладка KSHD (рисунок 1.21с) предназначена для управления подвижками тройных ленгмюровских зондов, а вкладка TI (рисунок 1.21д) - титановыми испарителями. Правая часть интерфейса отведена под элементы управления процессом зарядки накопителей энергии магнитного поля и плазменной пушки. На фрагменте рисунка 1.21а красным цветом выделены элементы управления напряжением на конденсаторных сборках, питающих дуговой разряд и соленоид источника плазмы, и элементы контроля тока зарядки этих сборок.



Рисунок 1.21. Внешний вид основной программы управления установкой КОТ.

В настоящее время рассматривается переход с ПО National Instruments на более доступные инструменты. Вследствие этого для системы атомарной инжекции были созданы новые управляющие приложения на языке Python с использованием стека PyEpic и PyQt5 [28] (рисунок 1.22). Графический интерфейс нового ПО функционально разделен на зоны, каждая из которых отвечает за конкретный узел инжектора. Выделены области для задания временных интервалов работы каждой подсистемы, а также блоки регулировки параметров ионно-оптической схемы и дуговых генераторов плазмы.

УСТАНОВКИ

УСТАНОВКИ ГВИ

		начало	длительность	конец
☐	MI	-12000 мкс	28000 мкс	16000 мкс
☐	ARC PS	-2500 мкс	7500 мкс	5000 мкс
☐	ARC ACC	-2500 мкс	500 мкс	-2000 мкс
☐	ARC IGN	-2000 мкс	10 мкс	-1990 мкс
☐	GVA	-17000 мкс	22000 мкс	5000 мкс
☐	GVC	-9000 мкс	7000 мкс	-2000 мкс
☐	GVN	-25000 мкс	30000 мкс	5000 мкс
☐	HVM	0 мкс	5000 мкс	5000 мкс
☐	VD1	-3500 мкс	500 мкс	-3000 мкс
☐	VD2	0 мкс	500 мкс	0 мкс
☐	VD3	0 мкс	500 мкс	0 мкс

ИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

		ЦАП	АЦП
☐ ЗАРЯДКА	HVM	0,00	HVM
☐ ЗАРЯДКА	SGrid	0,00	SGrid

УСТАНОВКИ ДУГОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПЛАЗМЫ

☐ синх.	ДГП1	ДГП2	ДГП3	ДГП4
ARC MI	0,00	0,00	0,00	0,00
ARC HI	0,00	0,00	0,00	0,00
ARC COR	0,00	0,00	0,00	0,00
ARC LOW	0,00	0,00	0,00	0,00
ARC ACC	0,00	0,00	0,00	0,00

ЗАПУСК ИНЖЕКТОРА

ТАЙМЕР

1 мин 30 сек

Вкл. цикл ☐

ПРИМЕНИТЬ

!FIRE!

00:28

Рисунок 1.22. Внешний вид прототипа программы управления системой атомарной инжекции.

2. Диагностический комплекс установки

2.1. Измерение параметров атомарных пучков

Распределение плотности эквивалентного тока пучка измеряется с помощью массива вторично-эмиссионных датчиков (МВЭД), установленного в приёмнике пучка на расстоянии 4.1 м от ИОС [29]. МВЭД представляет собой крестообразный массив из 21 датчика, каждый выполнен в виде конуса и помещён в цилиндр с отверстием на оси. Атомы пучка попадают на поверхность датчика и выбивают из его поверхности вторичные электроны, которые взаимодействуют с поданным на датчик отрицательным потенциалом и попадают на заземлённую поверхность цилиндра. Ток этих частиц регистрируется. Смещение каждого датчика -150 В, диаметр входного отверстия цилиндров 4 мм. Максимальная эквивалентная плотность тока в плоскости приёмника 230 мА/см². Пример сигналов МВЭД, регистрируемых в течение импульса инжектора, показан на рисунке 2.1.

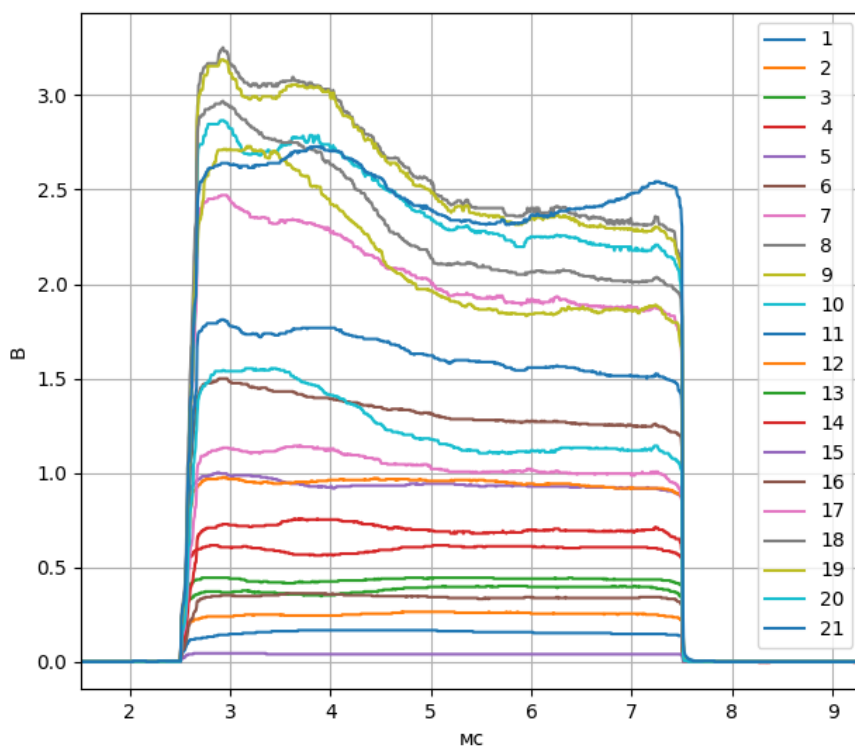


Рисунок 2.1. Сигналы датчиков МВЭД.

Данные с вторично-эмиссионных датчиков используются для расчёта распределения плотности тока в плоскости инжекции и определения положения пучка относительно приёмника (рисунок 2.2). Для каждого МВЭД изготовлен отдельный блок питания и регистрации сигналов, который запускается внешним импульсом на время инжекции.

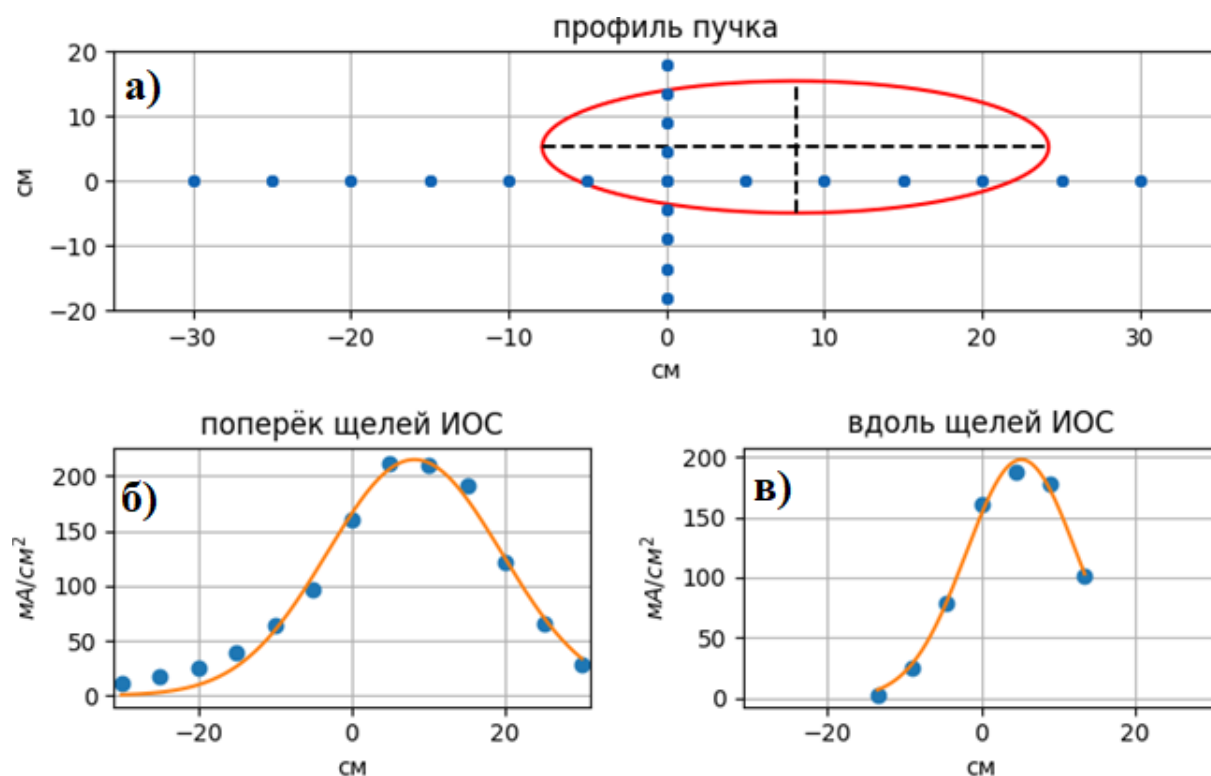


Рисунок 2.2 Профиль и распределение плотности тока пучка в плоскости приёмника. а) – положение пучка (по уровню спада в e раз) в плоскости приёмника. Синие точки обозначают датчики. б) – сигналы с датчиков в направлении поперёк щелей. в) – сигналы с датчиков в направлении вдоль щелей.

Спектр пучка атомов (рисунок 2.3) измеряется с помощью оптического спектрометра. По интенсивности доплеровски смещённых линий водорода определяется относительный массовый состав атомарного и ионного пучков [30–32]. Компонентный состав пучка вычислялся для тока извлеченных и ускоренных в ИОС молекулярных ионов H^+ , H_2^+ , H_3^+ до прохождения нейтрализатора: H^+ – 88.4%, H_2^+ – 9.9%, H_3^+ – 1.2%, примеси – 0.5%.

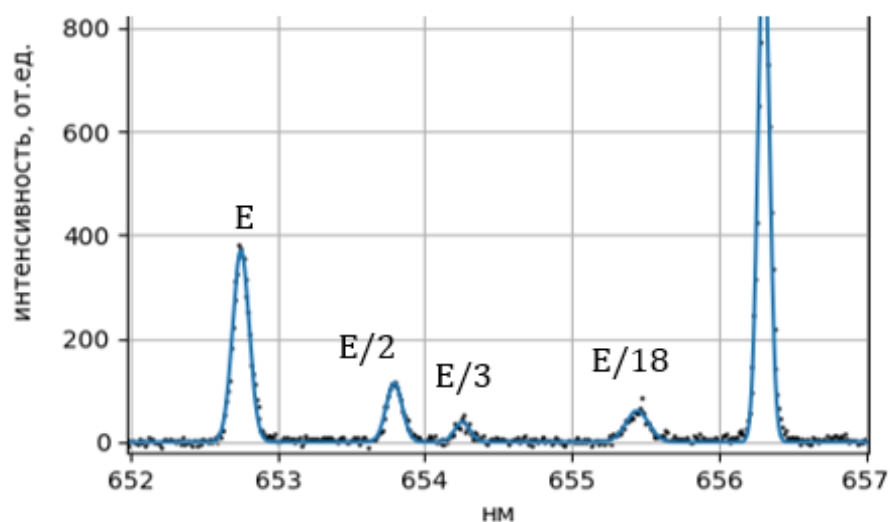


Рисунок 2.3. Оптический спектр атомарного пучка.

2.2. Магнитные измерения

Магнитные измерения на установке КОТ [33–36] представлены двумя сборками диамагнитных петель и магнитных зондов, рассчитанных на измерения в широком диапазоне частот (рисунок 2.4).

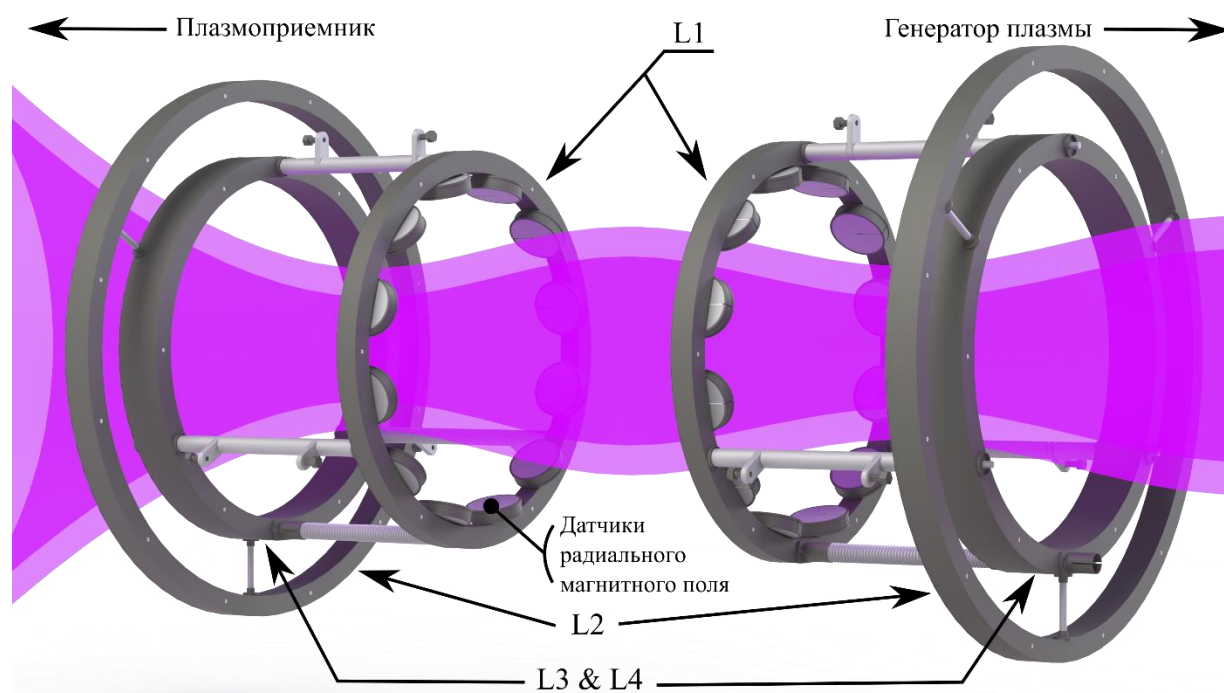


Рисунок 2.4. Расположение магнитных диагностик относительно столба плазмы.

Диамагнитные петли

Диамагнитные петли, охватывающие плазменный столб в нескольких осевых сечениях, применяются для измерения магнитного потока, вытесняемого плазмой (диамагнетизм). Расположение диамагнитных петель на разных точках вдоль оси установки

позволяет различать и измерять отдельно диамагнетизм мишенной плазмы, создаваемой генератором, и диамагнетизм компактного горячего плазмоида в центральной секции. Величина диамагнетизма характеризует энергосодержание плазмы, а временная зависимость дает представление о среднем времени жизни популяции быстрых ионов.

Таблица 5. Основные параметры диамагнитных петель обеих сборок. Сборки расположены симметрично относительно $z=0$.

	L1	L2	L3	L4
Осевая координата z , см	± 18	± 43.5	± 43.5	± 42
Радиус R , см	18.5	26	18.5	18.5
Кол-во витков	50	25	50	50
Индуктивность, мГн	2	0.9	2	2

Каждая диамагнитная петля в сборке состоит из каркаса, выточенного из полиоксиметилена (полиацеталь, ПОМ), на который намотаны катушки с определенным количеством витков. Конструкция защищена от воздействия плазмы экраном из нержавеющей стали толщиной 0.4 мм с разрезом, предотвращающим появление круговых токов. Параметры петель в обеих сборках приведены в таблице 5, а расположение относительно магнитной системы удержания – на рисунке 2.5.

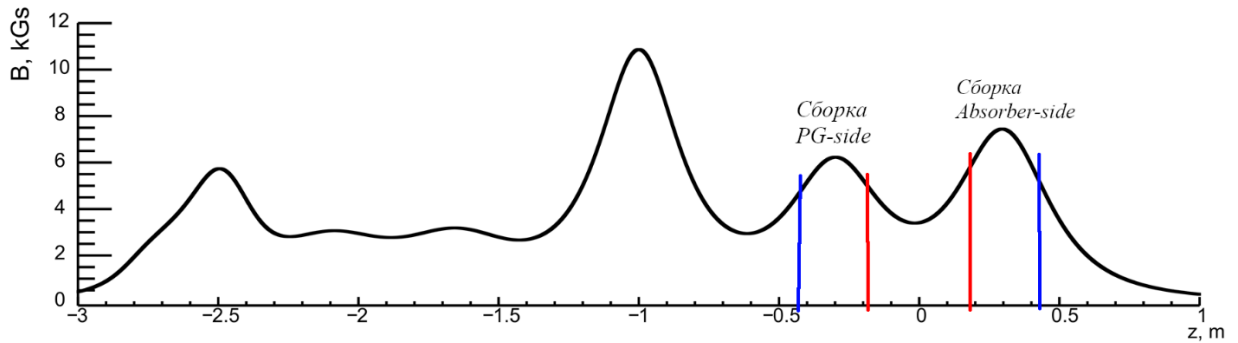


Рисунок 2.5. Магнитное поле на оси установки. Красными линиями помечено положение петель L1 обеих сборок, синими — петли L2, L3 и L4.

На каждой диамагнитной петле индуцируется ЭДС $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$. Магнитный поток Φ , воспринимаемый катушкой с числом витков N и площадью S , равен

$$\Phi = N \int_S (B_0(r) + \delta B(r) - B_{pl}) dS,$$

где $B_0(r)$ и $\delta B(r)$ – поля магнитной системы установки и наведенных в камере токов, которые нельзя считать однородными по радиусу, а B_{pl} – диамагнитное поле плазмы, которое можно разделить на поле горячего плазмоида в центральной секции $B_{hot}(r, z)$,

поток которого сильно зависит от z , и поле мишенной плазмы $B_{target}(r, z)$, изменением полного потока которого вдоль z можно пренебречь на характерном расстоянии между петлями.

Для исключения вклада поля магнитной системы в сигнал применяется компенсирующе-фильтрующая схема (рисунок 2.6), осуществляющая попарное вычитание сигналов U_{L1} и U_{L4} , U_{L2} и U_{L3} , с коэффициентами, близкими к единице. Результирующие сигналы U_z и U_r передаются через коаксиальный кабель длиной ~ 5 м и измеряются при помощи 12-битных АЦП со входным сопротивлением ~ 40 кОм и частотой дискретизации 625 кГц.

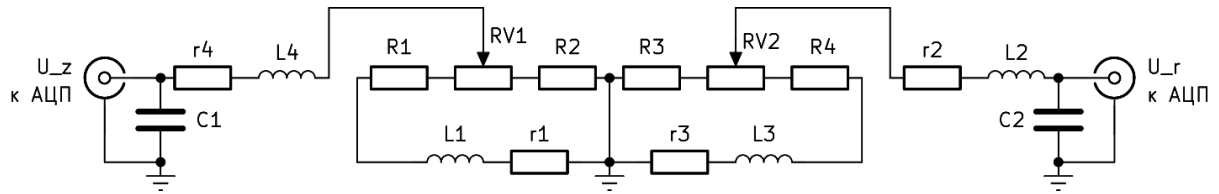


Рисунок 2.6. Компенсационная схема пар диамагнитных петель одной сборки.

Для процессов с характерными временами изменения $\lesssim 0.1$ мс можно пренебречь паразитными ёмкостями самих диамагнитных петель и кабелей, оставив только параметры схемы. В таком случае измеряемые сигналы U_z и U_r связаны с напряжениями, индуцируемыми на диамагнитных петлях, как:

$$\begin{cases} |U_z| = \frac{\omega C_1}{\sqrt{1 + \left(r_4 + \frac{(R_1 + r_1)R_2}{R_1 + R_2 + r_1}\right)^2 \omega^2 C_1^2}} U_4 - \frac{R_1}{\sqrt{\omega^2 C_1^2 (R_1 r_4 + (R_1 + r_4)(R_2 + r_1))^2 + (R_1 + R_2 + r_1)^2}} U_1 \\ |U_r| = \frac{\omega C_2}{\sqrt{1 + \left(r_2 + \frac{(R_4 + r_3)R_3}{R_3 + R_4 + r_3}\right)^2 \omega^2 C_2^2}} U_2 - \frac{R_4}{\sqrt{\omega^2 C_2^2 (R_4 r_2 + (R_4 + r_2)(R_3 + r_3))^2 + (R_3 + R_4 + r_3)^2}} U_3 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} |U_z| \approx U_4 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_1 \\ |U_r| \approx U_2 - \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_3 \end{cases},$$

поскольку для полезных сигналов, регистрируемых в эксперименте, зависимостью коэффициентов от частоты измеряемого сигнала можно пренебречь.

Ещё одним фактором, оказывающим влияние на измерения, является близость замкнутого кожуха магнитных пробок центральной секции, в котором могут течь азимутальные токи. Минимальное время проникновения поля в этот стальной кожух можно оценить как

$$\tau \sim L/R \approx (\pi \mu_0 a^2) / \left(\rho \frac{2\pi a}{h} \right) \approx 0.5 \text{ мс},$$

где $a \approx 190$ мм – радиус ближайшей к оси, $h \approx 3$ мм – толщина стенки, $\rho \approx 0.75 \cdot 10^{-6}$ Ом·м – удельное сопротивление стали корпуса. Вследствие этого петли L2, L3 и L4 перехватывают только $\sim 10\%$ от потока компактного плазмоида. Вытесненные потоки мишенной плазмы и компактного плазмоида в таком случае будут зависеть от изменения показаний петель U_r и U_z следующим образом:

$$\begin{cases} \Phi_{target} = K_{target} \cdot \int_{t_0}^{t_1} \Delta U_r dt \\ \Phi_{hot} = K_{hot} \cdot \int_{t_0}^{t_1} \Delta U_z dt \end{cases},$$

где $K_{target} = \frac{1}{N_{L2}S_{L2}}$, в силу того, что мишенная плазма проходит сквозь плоскость петель и $N_{L2}S_{L2} = N_{L3}S_{L3}$, и K_{hot} восстанавливается по параметрам модели компактного плазмоида в центральной секции (в простейшем случае – прямого соленоида радиусом R и длиной L с равномерным пространственным распределением азимутального тока).

Поскольку компенсационная схема не может полностью исключить влияние внешнего магнитного поля установки, применяется вычитание фонового сигнала, записанного в отсутствие плазмы и при условии, что естественный дрейф параметров соленоидов вследствие нагрева мал, а система питания обеспечивает хорошую воспроизводимость тока через соленоиды.

Исходя из геометрической модели компактного плазмоида как эквивалентного соленоида, можно оценить вытесненный магнитный поток в центральной плоскости по измерениям петель вблизи точек остановки. На рисунке 2.7 приведён пример сигналов диамагнетизма мишенной плазмы и восстановленного диамагнетизма компактного плазмоида в центральной секции.

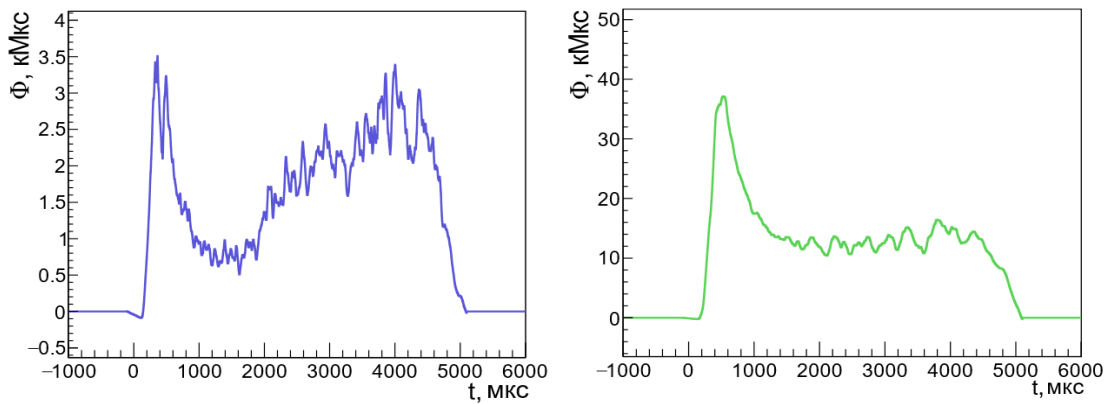


Рисунок 2.7. Графики диамагнетизма мишенной плазмы (слева) и восстановленного диамагнетизма компактного плазмоида (справа) во время экспериментов с небольшим вытесненным потоком.

Магнитные зонды

Для измерения колебаний радиальной компоненты магнитного поля используются две азимутальные сборки, каждая из 12 магнитных зондов, расположенных эквидистантно на окружностях радиусом 18.5 см вблизи предполагаемых точек останковки быстрых ионов. Вид зонда в разрезе представлен на рисунке 2.8. Расстояние между сборками составляет 260 см.

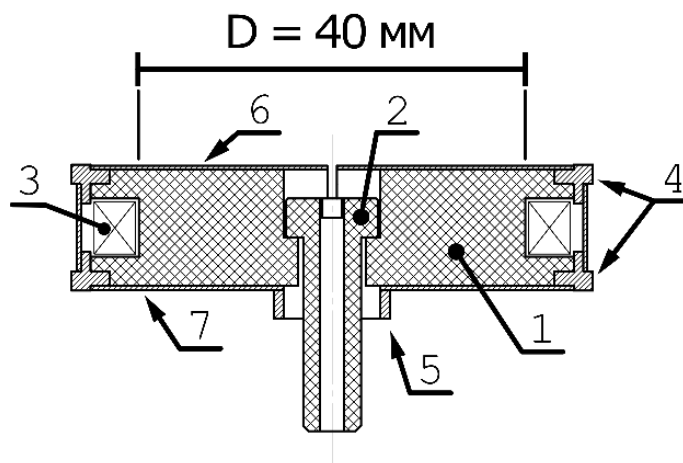


Рисунок 2.8. Сечение магнитного зонда. Диаметр намотки $D = 40$ мм. 1 – сердечник из полиоксиметилена, 2 – болт из полиоксиметилена, крепящий зонд, 3 – катушка (4 витка МГТФ-1×0,2), 4,5,6,7 – разрезные металлические детали корпуса толщиной 0.4 мм.

Зонды представляют собой 4 витка провода МГТФ-1 × 0.2, намотанные на сердечник из ПОМ, защищённые от воздействия плазмы разрезным корпусом из нержавеющей стали (толщина пластин 0.4 мм). Крепление зонда осуществляется при помощи непроводящего болта со сквозным отверстием для прокладки витой пары. Собственная индуктивность зонда составляет ~ 2.1 мкГн, сопротивление ~ 0.1 Ом.

Функция отклика зонда определяется двумя факторами: экранировкой внешнего магнитного поля металлическим корпусом зонда и сочетанием собственных и паразитных ёмкостей, индуктивностей и сопротивлений зонда и последующей измеряющей схемы. Для определения полной функции отклика зонда были проведены калибровочные измерения с использованием колец Гельмгольца. По измеренным напряжению на выходе измерительной схемы зонда и току через кольца Гельмгольца восстанавливалась зависимость $K(f) = \frac{U}{NS\dot{B}_r}$. Пример измеренной функции отклика для одного из зондов приведён на рисунке 2.9. Наблюдаемый пик на ~ 5 МГц возникает из-за резонанса между паразитной индуктивностью и паразитной ёмкостью проводов.

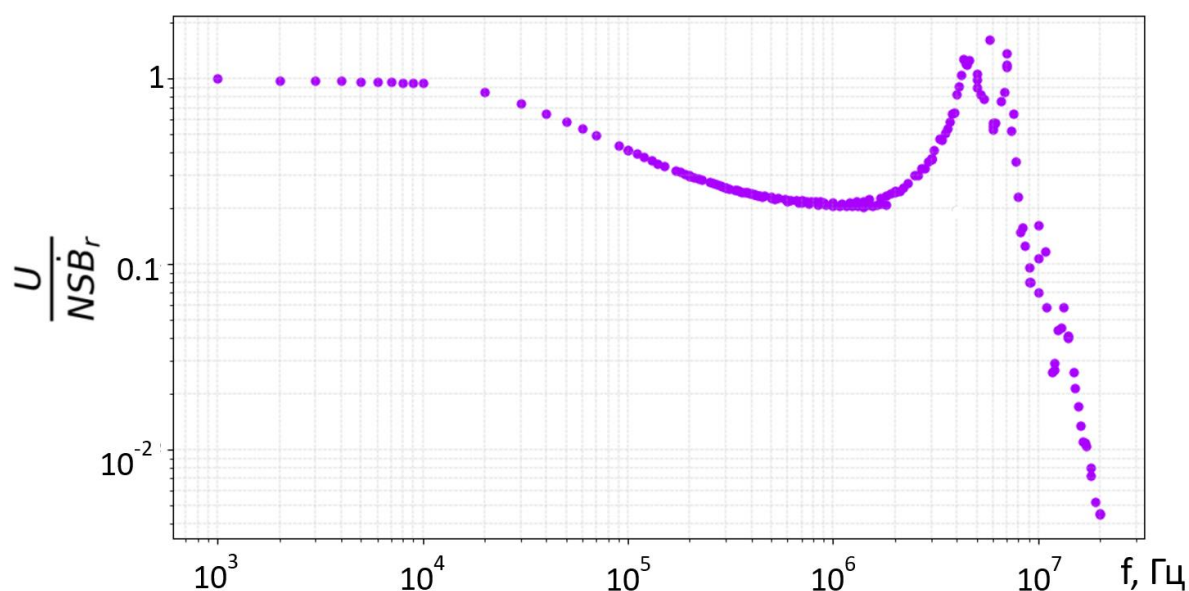


Рисунок 2.9. Измеренная функция отклика $K(f)$ одного из магнитных зондов.

Отдельно были проведены измерения влияния экранировки поля защитным экраном (серия измерений для одного и того же зонда с экраном и без экрана). В качестве дополнительной проверки было проведено моделирование экранировки поля в пакете CST Studio Suite, график со сравнением приведён на рисунке 2.10.

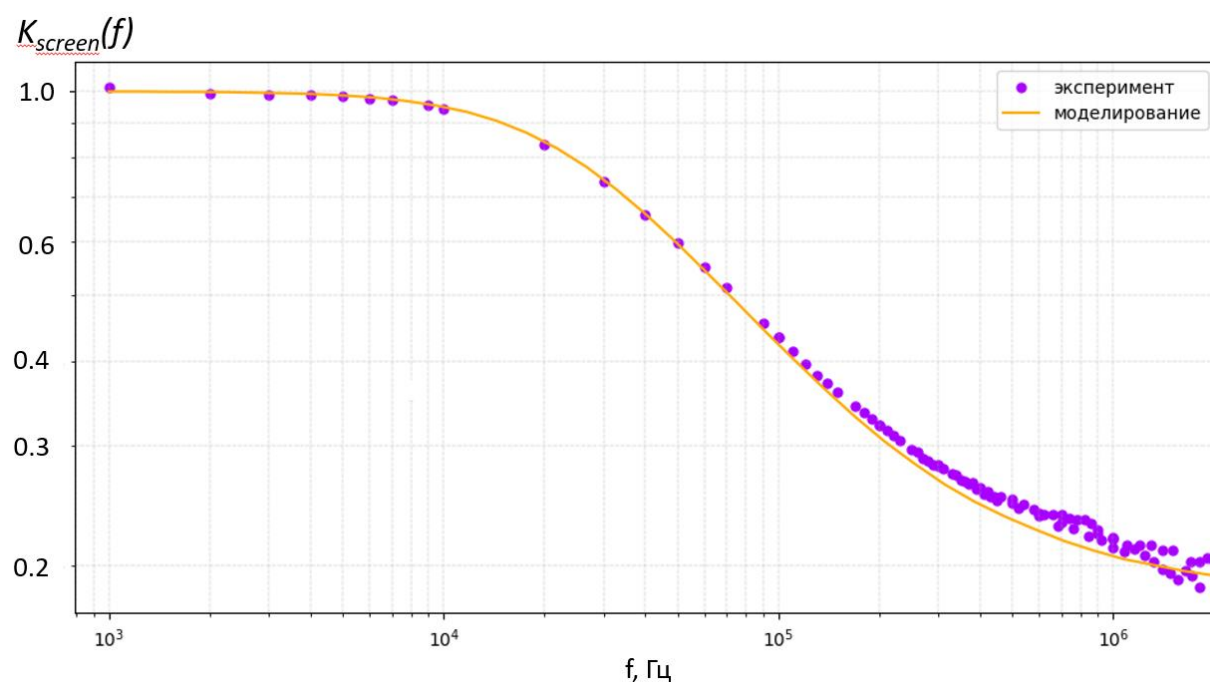


Рисунок 2.10. Коэффициент экранировки поля $K_{screen}(f)$, измеренный для одного из зондов, в сравнении с вычисленными значениями для известной геометрии экрана в пакете CST Studio Suite.

Функция отклика зонда позволяет проводить измерения колебаний B_r с частотами вплоть до $\sim 4\text{--}5$ МГц, что позволяет распознавать колебания с частотами, близкими к ионно-циклотронному резонансу в центральном пробкотроне. Каждая сборка может распознавать азимутальные модовые числа $m \in [0, 5]$. Пример типичного сигнала на одном из магнитных зондов в эксперименте, в котором наблюдались колебания вблизи частоты ионно-циклотронного вращения, приведён на рисунке 2.11.

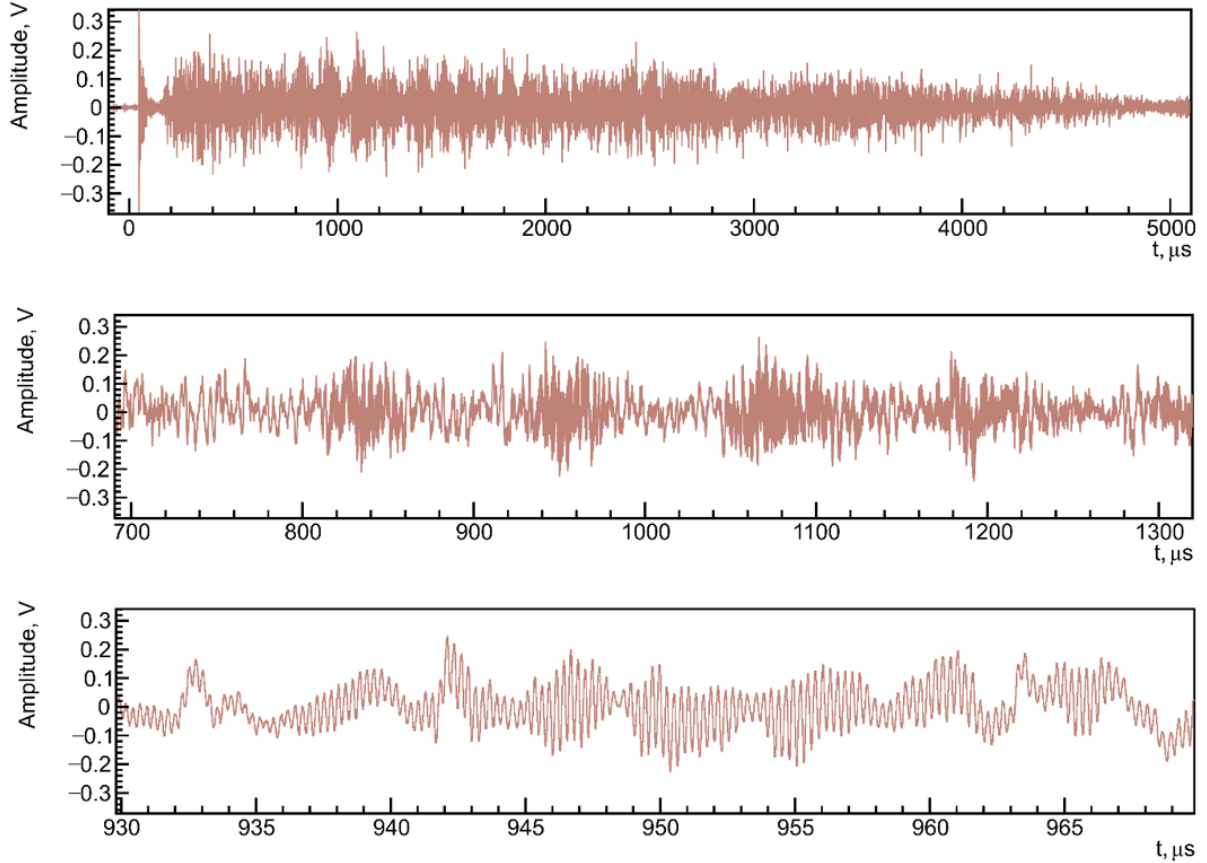


Рисунок 2.11. Пример сигнала, измеренного одним из магнитных зондов, в трех разных масштабах по времени.

Кроме наблюдения колебаний радиальной компоненты магнитного поля плазмы, магнитные зонды используются в качестве дополнительной диагностики диамагнетизма компактного плазмоида. В силу компактности размера плазмоида вдоль оси z радиальная компонента его магнитного поля измерима, и, полагая, что размер зонда мал, может быть получена из функции сигнала напряжения на магнитных зондах как:

$$B_r(r_{\text{зонд}}, z_{\text{зонд}}) = \frac{1}{12 \cdot N_{\text{витков}} S_{\text{зонда}} K(f=0)} \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \sum_{k=1}^{12} U_k(t) dt.$$

Суммирование по всем зондам исключает влияние колебаний с азимутальными модовыми числами $m \geq 1$ на сигнал. В дальнейшем полученные абсолютные значения

радиального поля плазмоида можно использовать для верификации моделей его формы и распределения азимутального тока. Поскольку функция отклика зонда позволяет регистрировать быстротекущие процессы, по спаду величины B_r можно судить о характерном времени жизни быстрых частиц.

Для регистрации сигналов с двух сборок магнитных зондов используются 12-битные АЦП с частотой дискретизации 50 МГц [37].

2.3. Ленгмюровские зонды

Тройные зонды

Параметры мишенной плазмы, создаваемой пушкой, измеряются одновременно в двух точках вдоль оси установки с помощью радиально перемещающихся тройных зондов [38]. Первый зонд измеряет ток насыщения ионов, температуру электронов и плавающий потенциал зонда перед основным пробкотроном, а второй располагается в средней плоскости центрального пробкотрона.



Рисунок 2.12. Тройной ленгмюровский зонд.

Тройной зонд состоит из трех молибденовых проволочек диаметром $D = 0.4$ мм каждая (рисунок 2.12). В качестве изолятора используется кварцевая трубка, из которой зонды выступают на $l = 3$ мм. Кварц выбран из-за высоких тепловых нагрузок на зонды. В более ранних экспериментах использовался цилиндрический изолятор из оксида алюминия, но керамика неоднократно выходила из строя, разрушаясь из-за локального перегрева. С кварцевым изолятором таких проблем не наблюдается. Зонды можно перемещать в радиальном направлении в диапазоне от 20 см до оси устройства.

При температуре ионов $T_i \sim 20$ эВ и магнитном поле $B = 0.2$ Т отношение ларморовского радиуса ионов к диаметру зонда $r_i/D \approx 6$, поэтому ток ионного насыщения зонда не зависит от магнитного поля. В отличие от ионов, электроны сильно замагничены, $r_e \ll D$, и собираются только из магнитной силовой трубки, которая проецируется на зонд,

вследствие чего электронный ток уменьшается. Однако параметры плазмы все еще могут быть удовлетворительно оценены по измерениям зонда [39].

Для измерения электронной температуры и плотности прикладывается напряжение, превышающее $3T_e/e$ между двумя электродами, при этом третий электрод поддерживается под плавающим потенциалом U_f . Электронная температура определяется по напряжению между положительно смещённым и плавающим электродами. Плотность плазмы определяется по току насыщения ионов I_{sat} между отрицательно и положительно смещёнными электродами, а потенциал плазмы U_p рассчитывается с погрешностью порядка $0,5 T_e/e$, обусловленной влиянием магнитного поля и конкретной геометрии:

$$T_e = \frac{e(U_+ - U_f)}{\ln 2}, I_{sat} = \alpha n e A \sqrt{\frac{T_e}{m_i}}, U_p = U_f + 3,3 \frac{T_e}{e},$$

где U_+ – потенциал положительно смещенного зонда, $A = \pi D l$ – эффективная площадь поверхности тонкого цилиндрического зонда, а безразмерный фактор $\alpha \sim 1$ и зависит от геометрии, конечной температуры ионов и влияния магнитного поля. Для определения абсолютных параметров плазмы по измерениям зонда обычно необходимо калибровать зонды с помощью других диагностических методов. Параметр α , используемый для определения плотности плазмы из тока насыщения ионов, был определен путём сравнения данных зонда с линейной плотностью, измеренной с помощью СВЧ-интерферометра.

В качестве примера на рисунке 2.13 приведены радиальные зависимости электронной температуры и плотности в мишенной плазме в одном из режимов работы установки.

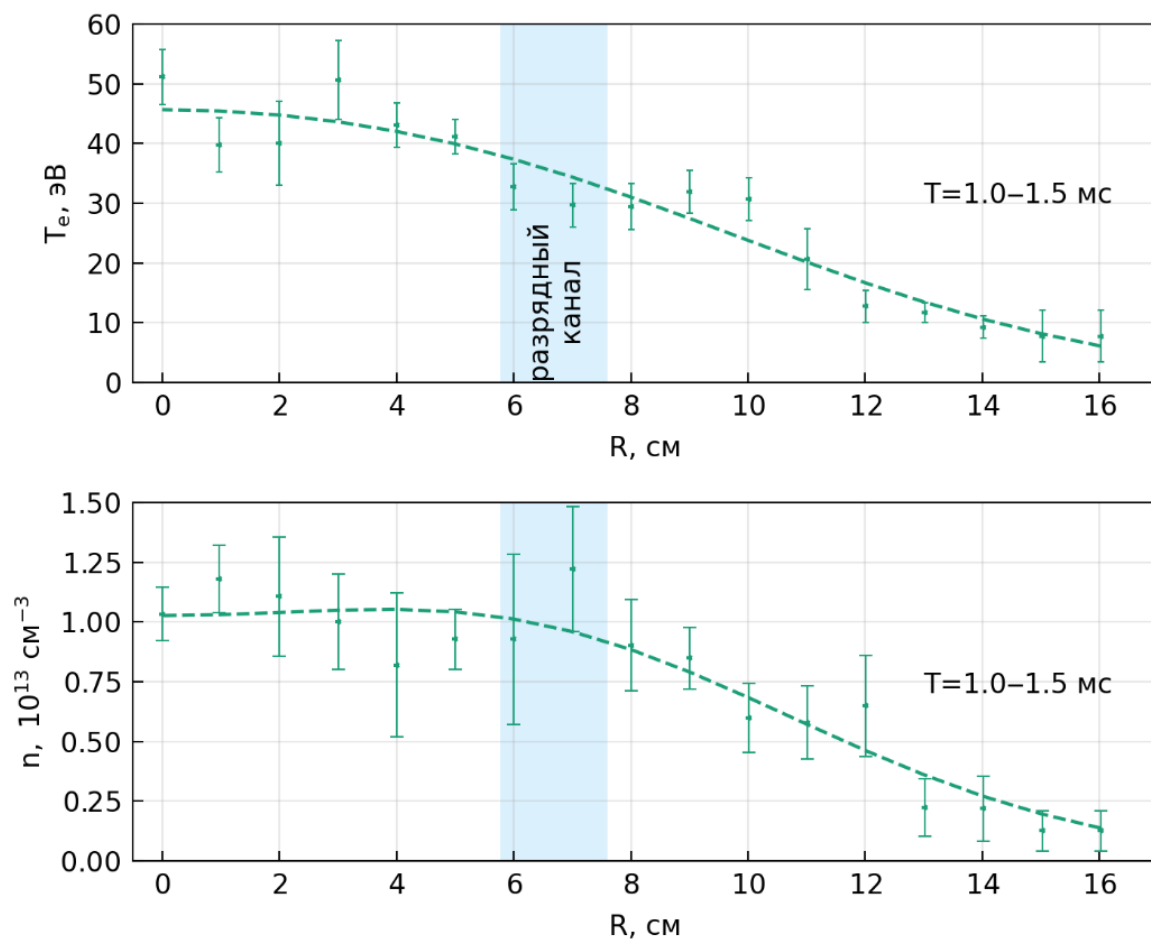


Рисунок 2.13. Радиальные профили электронной температуры и плотности плазмы.

Азимутальная сборка одиночных ленгмюровских зондов

Для одновременного измерения азимутальной и радиальной структуры колебаний потенциала плазмы на установке КОТ используется сборка из 24 одиночных ленгмюровских зондов, установленная в выходной пробке (рисунок 2.14). Все зонды расположены с одинаковым азимутальным шагом 15° .

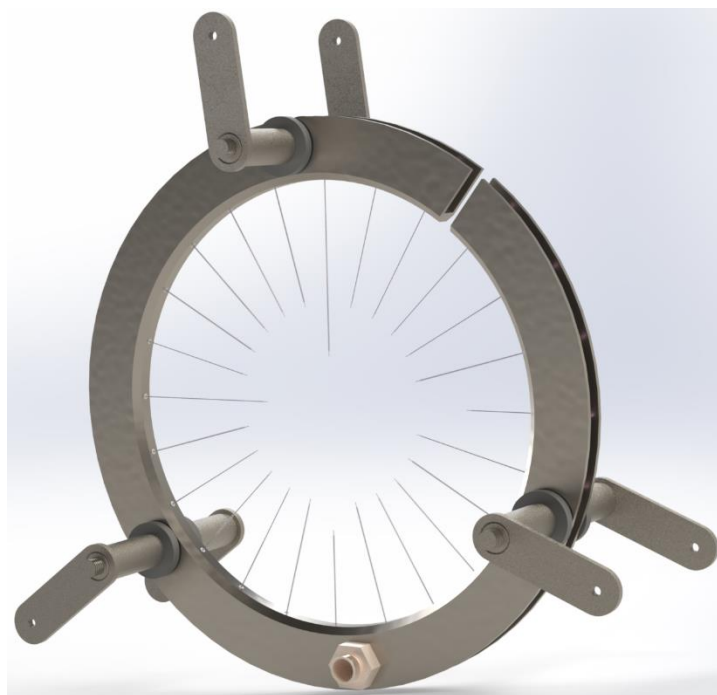


Рисунок 2.14. Азимутальная сборка одиночных ленгмюровских зондов.

В сборке 20 зондов из 24 расположены на одном и том же радиусе, что позволяет различать азимутальные модовые числа $0 \leq m \leq 11$. Оставшиеся 4 зонда расположены на разных радиусах, что дает возможность изучить радиальную структуру по 5 точкам.



Рисунок 2.15. Вид одиночного зонда Ленгмюра.

Каждый одиночный зонд представляет собой молибденовую проволоку диаметром 0.4 мм, помещенную в кварцевый капилляр со внешним диаметром 1 мм (рисунок 2.15). Для того, чтобы одиночные зонды работали в режиме измерения плавающего потенциала, требуется, чтобы ток на них был много меньше тока насыщения. Поскольку характерные потенциалы плазмы, наблюдавшиеся ранее в экспериментах, достигали 1 кВ, последовательно к каждому зонду подключается сопротивление 50 кОм таким образом, что ток с одного зонда не превышает 20 мА (ток насыщения для плазмы с $T_e \sim 5 - 30 \text{ эВ}$ и $n_e \sim 10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ составляет $\sim 0.2 - 5 \text{ А}$). Входное сопротивление АЦП составляет 50 Ом, поэтому коэффициент деления сигнала равен 10^{-3} . Для регистрации сигналов с одиночных зондов используются 12-битные АЦП с частотой дискретизации 50 МГц, что позволяет регистрировать колебания потенциала, обусловленные как неустойчивостью Кельвина-

Гельмгольца на частотах до 400 кГц, так и альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивостью на частотах порядка 2.5–4 МГц. На рисунке 2.16 показаны сигналы с зондов, расположенных на разных радиальных координатах. На рисунке 2.17 показана азимутальная структура потенциала в один из моментов времени, полученная из показаний зондов на одинаковом радиусе.

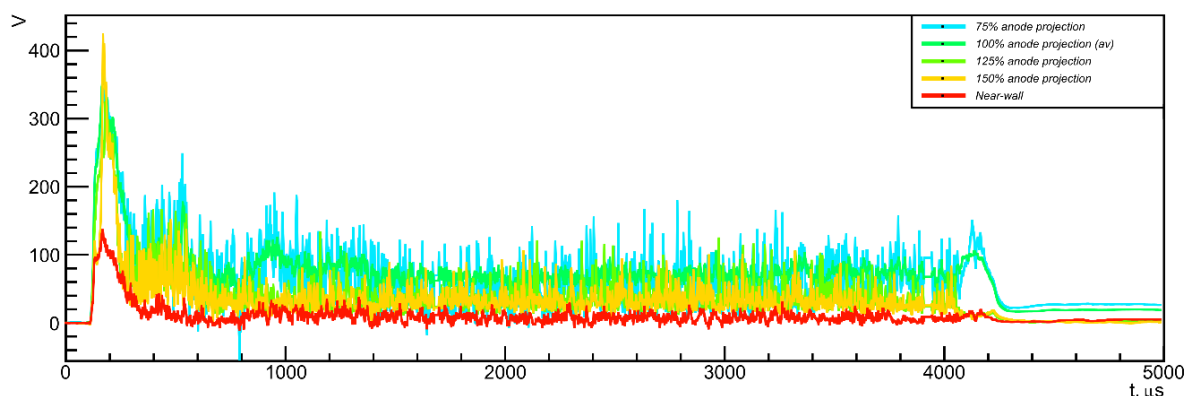


Рисунок 2.16. Радиальная структура потенциала в различные моменты времени, измеряемая ленгмюровскими зондами на разных расстояниях от оси.

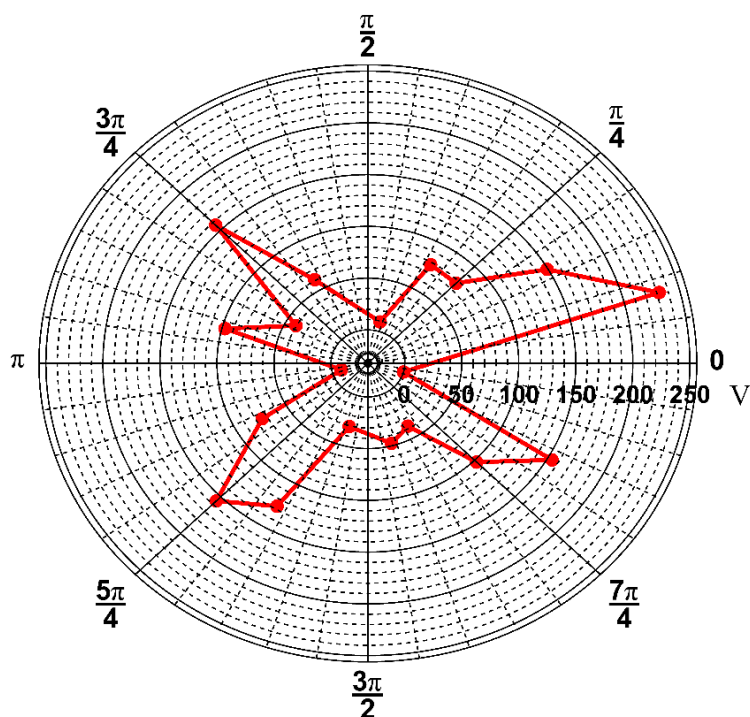


Рисунок 2.17. Азимутальная структура потенциала в фиксированный момент времени, построенная по показаниям ленгмюровских зондов на одинаковом расстоянии от оси.

2.4. СВЧ-интерферометр

Линейная плотность плазмы в центральном пробкотроне КОТ измеряется с помощью СВЧ-интерферометра [40] производства ООО «ДОК» (г. Санкт-Петербург). Схема

применения интерферометра полностью идентична описанной в [3]. Интерферометр работает по классической схеме с пространственным разделением измерительного и опорного каналов и состоит из приёмного и передающего модулей. Генератор СВЧ-сигнала в интерферометре – это синтезатор частот, установленный в приёмном модуле. Он генерирует волну с частотой 12.7 ГГц, которая разделяется на измерительный и опорный сигналы. Измерительная волна с помощью СВЧ-кабеля длиной 4 м передаётся в передающий модуль, там она усиливается, и с помощью умножителя частоты её частота увеличивается в 6 раз до 76.2 ГГц. Далее волна транспортируется по волноводу до вакуумной камеры КОТ, где установлена коническая рупорная антенна. Излучение антенны проходит через окно вакуумной камеры, пересекает плазму, ещё одно окно и принимается второй конической рупорной антенной. Принятая волна по второму волноводу передаётся в приёмный модуль. В приёмном модуле сигналы поступают в квадратурный демодулятор, где смешиваются опорный и измерительный сигналы, при этом с помощью фильтра низких частот выделяется смесь шестой гармоники опорной волны и первой гармоники измерительной волны, которые имеют одну частоту 76.2 ГГц. Более того, смешивание производится в двух смесителях, на входы которых подаются опорный и измерительный сигналы, но в одном из смесителей измерительная волна предварительно сдвигается по фазе на 90° . Поэтому на выходе одного смесителя сигнал пропорционален косинусу разности фаз опорной и измерительной волн, а на выходе второго смесителя синусу разности фаз. Далее полученные сигналы с помощью встроенного АЦП оцифровываются и записываются в память микрокомпьютера и по команде оператора по сети Ethernet передаются на внешний компьютер.

Регистрация сигналов, пропорциональных синусу и косинусу разности фаз, позволяет однозначно восстановить разность фаз в пределах одной полосы. Делением одного сигнала на другой можно получить тангенс разности фаз. Если известен тангенс угла и знаки синуса и косинуса, можно однозначно восстановить угол в области 0-360 градусов.

При плотности плазмы, значительно меньшей уровня отсечки, для частоты 76,2 ГГц ($7,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) линейная плотность плазмы определяется выражением:

$$\int_0^l n_e(z) dz \approx \frac{2\pi m c \omega}{e^2} \Delta\varphi.$$

Однако в экспериментах на установке КОТ в связи с большими флуктуациями максимальная регистрируемая плотность оказывается в области более низких значений. Поэтому линейная плотность измерялась только в режимах с максимальной плотностью плазмы, определённой по показаниям зондов, – до 10^{13} см^{-3} . В таком режиме можно калибровать показания ленгмюровских зондов. На рисунке 2.18 представлен график

зависимости линейной плотности, измеренной СВЧ-интерферометром и вычисленной по показаниям ленгмюровского зонда. Коэффициент α , описанный выше в разделе о тройных ленгмюровских зондах, составил 0,6, что близко к значению $e^{-1/2} = 0,607$ и соответствует модели незамагниченной плазмы.

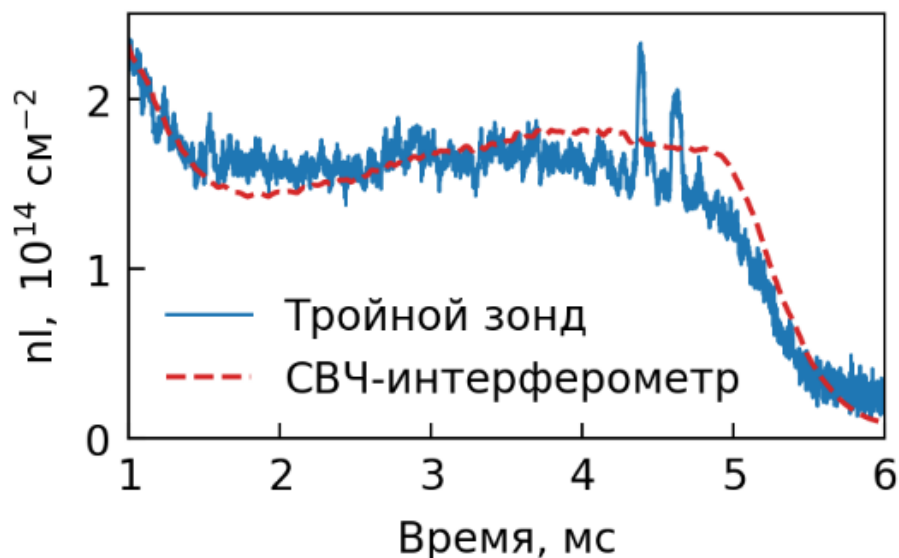


Рисунок 2.18. Линейная плотность, измеренная СВЧ-интерферометром и рассчитанная по радиальному профилю плотности плазмы, измеренному тройным ленгмюровским зондом.

2.5. Анализатор нейтралов перезарядки

Наиболее информативные данные о накоплении и удержании популяции быстрых ионов в процессе формирования плазмоида могут быть получены при изучении спектра нейтралов, возникающих в плазме из-за перезарядки на атомах инжектора и остаточном газе. Для изучения энергетического спектра популяции быстрых ионов в установке КОТ применяется 45° электростатический анализатор нейтралов перезарядки с газовой водородной мишенью и микроканальной пластиной (МКП) в качестве детектора ионов (рисунок 2.19). Анализатор собран по схеме электростатической сепарации заряженных частиц в поле плоского конденсатора [41].

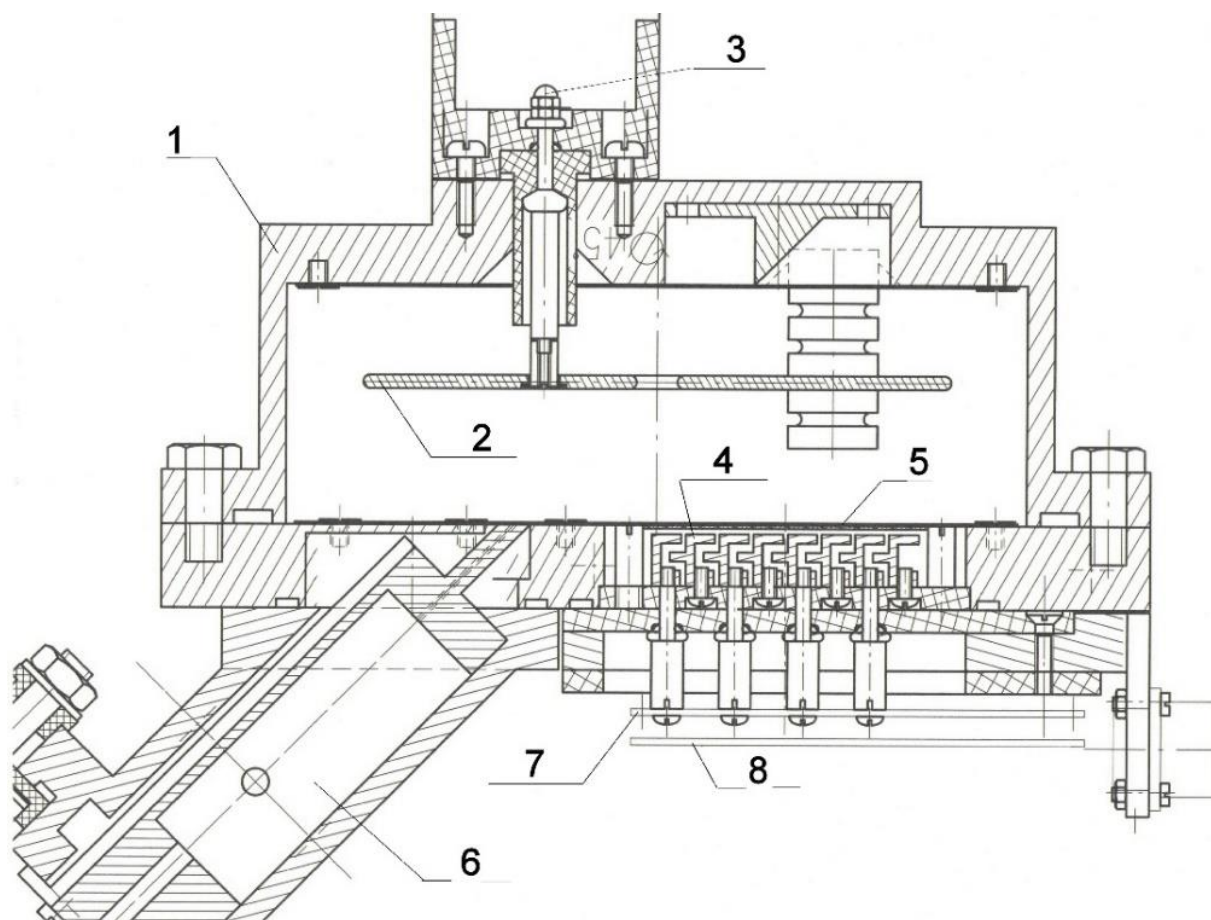


Рисунок 2.19. Схема 45° электростатического анализатора атомов перезарядки.

1 – магнитный экран, 2 – обкладка сепарирующего конденсатора, 3 – ввод питания конденсатора, 4 – приёмные коллекторы МКП, 5 – микроканальная пластина, 6 – обдирочная камера, 7 – усилитель постоянного тока, 8 – регистратор.

Конструктивно прибор состоит из перезарядной камеры, одновременно выполняющей функции коллиматора поперёк плазменного столба и конденсатора-сепаратора, необходимого для разделения заряженных частиц по энергии. Анализатор состоит из узла юстировки, позволяющего производить ориентацию прибора по двум координатам в пределах $\pm 2.5^\circ$. Обдирка регистрируемого в эксперименте потока атомов происходит в обдирочной камере на газовой мишени. Образовавшийся поток ионов поступает в объём сепарирующего конденсатора (поз. 2 на рисунке 2.19), где происходит разделение частиц вследствие отклонения в электрическом поле. Выходная диафрагма обдирочной камеры дополнительно выполняет роль линии газовой задержки, изолируя рабочий объём камеры и сепарирующий объём, в котором расположена микроканальная пластина (поз. 5 на рисунке 2.19). Рабочий энергетический диапазон прибора 4–25 кэВ. Энергетическое разрешение прибора лучше 12% и определяется шириной приёмной ламели МКП и отклоняющим напряжением.

На рисунке 2.20 показан спектр, полученный с помощью анализатора нейтралов перезарядки за два рабочих импульса установки при напряжениях на обкладках сепаратора 5 и 10 кВ. На полученном совместном спектре отчётливо видны пики на энергиях, соответствующих основной и дробным энергиям частиц пучка: 15, 7.5 и 5 кэВ.

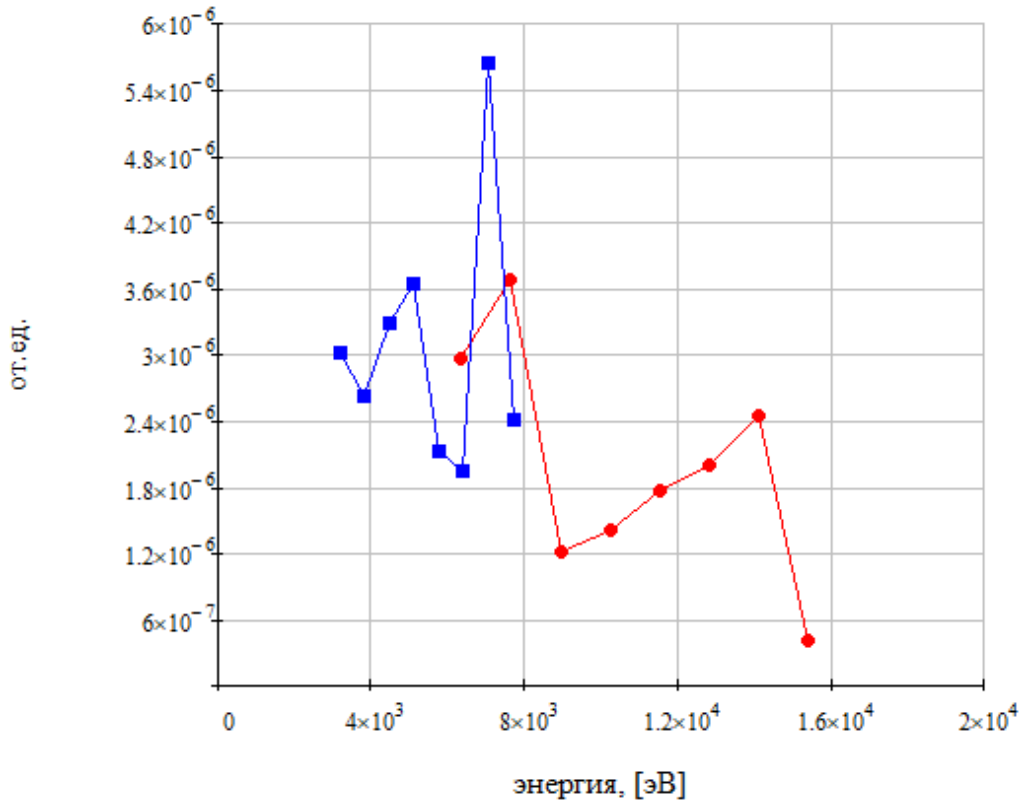


Рисунок 2.20. Энергетический спектр нейтралов перезарядки. Синяя линия – при напряжении на обкладках сепаратора 5кВ; красная линия – при напряжении на обкладках сепаратора 10кВ.

Для интерпретации полученных данных использовалось кинетическое уравнение для быстрых ионов в однородной плазме (после усреднения по питч-углу) [42]:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial v} v^2 \frac{F_{tr}(v)}{m_i} f_i - \frac{f_i}{\tau_{ex}(v)}, \text{ где}$$

F_{tr} – сила трения об электроны, τ_{ex} – время перезарядки на нейтралах. Нестационарное решение кинетического уравнения (при $\tau_{ex}(v) \approx const$):

$$f_i(v, t) = \frac{m_i}{v^2 F_{tr}(v)} e^{-t/\tau_{ex}} g \left(\int_v^{v_{inj}} \frac{m_i dv'}{F_{tr}(v')} - t \right),$$

$g(x)$ – произвольная функция, измеряемая анализатором в момент выключения инжекции. Параметры плазмы T_e , n_e и n_a подбираются таким образом, чтобы добиться максимального совпадения теоретически рассчитанной и экспериментально измеренной кривой (рисунок

2.21). Таким образом получены следующие параметры плазмы: $n_e = 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $n_a = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $T_e = 30 \text{ эВ}$.

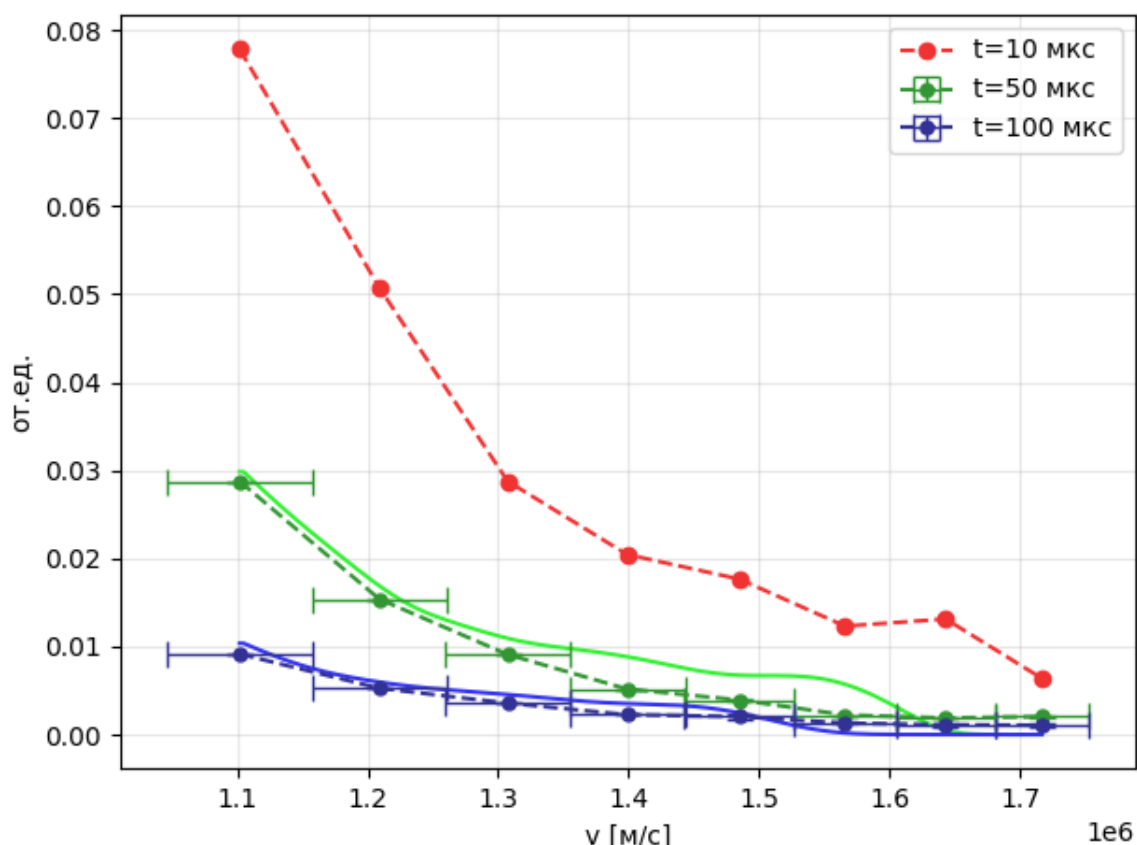


Рисунок 2.21. Сравнение расчётного и измеренного анализатором нейтралов перезарядки энергетических спектров частиц в различные моменты времени. Сплошными линиями показаны результаты моделирования, пунктирными — экспериментальные данные. Красная пунктирная линия обозначает измеренный спектр, использованный в качестве начального условия.

На рисунке 2.21 показаны функции распределения накопленных быстрых частиц по энергии, измеренные анализатором в различные моменты времени после выключения инжекции. Видно, что рассчитанные спектры (сплошные линии) хорошо согласуются с экспериментальными данными (пунктирные линии) во все моменты времени, что подтверждает адекватность используемой кинетической модели. Наблюдаемая эволюция спектров определяется совместным действием двух основных физических процессов: потерь быстрых ионов по каналу перезарядки на нейтральных атомах, приводящих к общему спаду интенсивности во всём энергетическом диапазоне, и торможению на электронах, проявляющемуся в смещении спектра в область более низких энергий и изменении его формы. Сечение перезарядки возрастает с уменьшением скорости иона, поэтому перезарядные потери наиболее велики для медленной части спектра. В то же время

торможение быстрых ионов на электронах плазмы имеет максимум при скоростях, сравнимых с тепловой скоростью электронов $v \sim v_{Te}$, и спадает в области малых скоростей. В результате медленные ионы эффективно удаляются из спектра за счёт перезарядки, тогда как их торможение на электронах оказывается незначительным. Это приводит к характерному виду низкоэнергетической части спектра, наблюдаемого на рисунке 2.21. Решение кинетического уравнения с параметрами плазмы установки КОТ ($n_e = 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $n_a = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $T_e = 30 \text{ эВ}$) даёт оценку времени жизни частиц по перезарядным потерям на уровне 150–200 мкс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время на установке КОТ ИЯФ СОРАН ведутся эксперименты по генерации популяции быстрых частиц с термоядерными параметрами во время мощной атомарной инжекции. Описанный диагностический комплекс позволяет получать набор данных для исследования физических процессов, наблюдаемых в установке КОТ, что даёт возможность отработать методы накопления и стабилизации плазмы с высоким относительным давлением. Полученные результаты лягут в основу дальнейшего развития плазменных установок реакторного класса, в частности, разрабатываемой в настоящее время в ИЯФ СО РАН открытой ловушки ГДМЛ [1].

Дальнейшие планы по расширению диагностического комплекса установки КОТ включают создание сборки подвижных магнитных зондов, которая позволит измерить профиль компонент магнитного поля компактного плазмоида в центральной плоскости, а также разработку системы для измерения напряженности локального магнитного поля при помощи метода, основанного на динамическом эффекте Штарка с лазерно-индуцированной флюоресценцией (MSE-LIF) [43], который даст возможность измерять величины магнитного поля с погрешностью порядка 100 Гс и пространственным разрешением до 1 см, что критически важно для экспериментов с высоким относительным давлением плазмы.

Список литературы

1. Сковородин, Д.И. Газодинамическая многопробочная ловушка ГДМЛ / Д.И. Сковородин, И.С. Черноштанов, В.Х. Амиров и др. // Физика плазмы. – 2023. – Т. 49. – № 9. – С. 831-884. DOI: 10.31857/S0367292123600322.
2. Иванов, А.А. Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы / А.А. Иванов, В.В. Приходько // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. – 2017. – Т. 187. – Gas dynamic trap. – № 05. – С. 547-574. DOI: 10.3367/UFNr.2016.09.037967.
3. Солдаткина, Е.И. Диагностический комплекс и система управления экспериментом на установке ГДЛ / Е.И. Солдаткина, П.А. Багрянский, Е.Д. Господчиков, и др. // Физика плазмы. – 2025. – Т. 51. – № 9. – С. 909-959. DOI: 10.31857/S0367292125090016.
4. Sudnikov, A.V. SMOLA device for helical mirror concept exploration / A.V. Sudnikov, A.D. Beklemishev, V.V. Postupaev et al. // Fusion Engineering and Design. – 2017. – Vol. 122. – P. 86-93. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.09.005.
5. Postupaev, V.V. Overview of GOL-NB experiments in 2025 / V.V. Postupaev, V.V. Batkin, A.V. Burdakov et al. // Journal of Plasma Physics. – 2026. – Vol. 92. – № 3. – P. E90. DOI: 10.1017/S0022377826101895.
6. Kolesnichenko, K.S. Target plasma for neutral beam injection into a compact mirror cell / K.S. Kolesnichenko, N.A. Afanasev, T.D. Akhmetov et al. // Journal of Plasma Physics. – 2026. – Vol. 92. – № 1. – P. E19. DOI: 10.1017/S0022377826101251.
7. Мурахтин, С.В. СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТА НА УСТАНОВКЕ КОТ / С.В. Мурахтин, Н.А. Афанасьев, Т.Д. Ахметов и др. // Тезисы докладов LII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. – Звенигород, 2025. – С. 126.
8. Kolesnichenko, K.S. Status of the CAT Experiment / K.S. Kolesnichenko, V.V. Gamov, K.F. Zhimulev et al. // Proceedings of the 14th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement. – Tsukuba, Japan, 2025.
9. Beklemishev, A.D. Diamagnetic “bubble” equilibria in linear traps / A.D. Beklemishev // Physics of Plasmas. – 2016. – Vol. 23. – № 8. – P. 082506. DOI: 10.1063/1.4960129.

10. Turner, W.C. Field-reversal experiments in a neutral-beam-injected mirror machine / W.C. Turner, J.F. Clauser, F.H. Coensgen et al. // Nuclear Fusion. – 1979. – Vol. 19. – № 8. – P. 1011-1028. DOI: 10.1088/0029-5515/19/8/002.
11. Gota, H. Enhanced plasma performance in C-2W advanced beam-driven field-reversed configuration experiments / H. Gota, A. Smirnov, M.W. Binderbauer et al. // Nuclear Fusion. – 2024. – Vol. 64. – № 11. – P. 112014. DOI: 10.1088/1741-4326/ad4536.
12. Deichuli, P. Low energy, high power hydrogen neutral beam for plasma heating / P. Deichuli, V. Davydenko, A. Ivanov et al. // Review of Scientific Instruments. – 2015. – Vol. 86. – № 11. – P. 113509. DOI: 10.1063/1.4936292.
13. Tsidulko, Yu.A. Particle-in-cell simulation of field reversal in mirror trap with neutral beam injection / Yu.A. Tsidulko, I.S. Chernoshtanov // Proceedings of the 11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement. – Novosibirsk, Russia, 2016. – P. 040005.
14. Beklemishev, A.D. Vortex Confinement of Plasmas in Symmetric Mirror Traps / A.D. Beklemishev, P.A. Bagryansky, M.S. Chaschin, E.I. Soldatkina // Fusion Science and Technology. – 2010. – Vol. 57. – № 4. – P. 351-360. DOI: 10.13182/FST10-A9497.
15. Димов, Г.И. Термоизолированная мишенная плазма в пробкотроне «АМБАЛ-Ю» / Г.И. Димов, А.А. Кабанцев, С.В. Кузьмин и др. // Физика плазмы. – 1993. – Т. 19. – № 3. – С. 350-360.
16. Skovorodin, D.I. Suppression of secondary emission of electrons from end plate in expander of open trap / D.I. Skovorodin // Physics of Plasmas. – 2019. – Vol. 26. – № 1. – P. 012503. DOI: 10.1063/1.5043072.
17. Bagryansky, P.A. Effect of fast Ti-deposition on gas recycling at the first wall and on fast ion losses in the GDT experiment / P.A. Bagryansky, E.D. Bender, A.A. Ivanov et al. // Journal of Nuclear Materials. – 1999. – Vol. 265. – № 1-2. – P. 124-133. DOI: 10.1016/S0022-3115(98)00510-8.
18. Димов, Г.И. Получение и исследование струи мишенной плазмы для открытой ловушки / Г.И. Димов, А.А. Иванов, Г.В. Росляков // Физика плазмы. – 1982. – Т. 9. – № 5. – С. 970-978.

19. Ахметов Т.Д. Создание горячей стартовой плазмы в концевой системе АМБАЛ-М / Ахметов Т.Д., Белкин В.С., Бендер Е.Д. и др. // Физика плазмы. – 1997. – Т. 23. – № 11. – С. 988-1001.
20. Ахметов Т.Д. Получение и исследование горячей плазмы в центральном соленоиде АМБАЛ-М / Ахметов Т.Д., Белкин В.С., Беспмятников И.О. и др. // Физика плазмы. – 2002. – Т. 28. – № 9. – С. 816-821.
21. Davydenko, V. Recent progress in development of neutral beams for fusion studies / V. Davydenko, P. Deichuli, A. Ivanov et al. // AIP Conf. Proc. – 2016. – Vol. 1771. – P. 030025. DOI: 10.1063/1.4964181.
22. Davydenko, V.I. Neutral Beam Injection System for the CAT Experiment / V.I. Davydenko, P.P. Deichuli, A.A. Ivanov, S.V. Murakhtin // Plasma and Fusion Research. – 2019. – Vol. 14. – № 0. – P. 2402024-2402024. DOI: 10.1585/pfr.14.2402024.
23. Gamov, V.V. Start of the Injection Complex of the Experimental CAT Installation / V.V. Gamov, N.A. Afanas'ev, R.V. Voskoboynikov et al. // Proceedings of the 14th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement. – Tsukuba, Japan, 2025.
24. Гамов, В.В. ЗАПУСК ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ КОТ / В.В. Гамов, Н.А. Афанасьев, Р.В. Воскобойников и др. // Тезисы докладов ЛП Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. – Звенигород, 2025. – С. 132.
25. Titus, J.B. Advanced neutral beam injection in a field-reversed configuration plasma / J.B. Titus, Y. Shimabukuro, S. Korepanov et al. // Nuclear Fusion. – 2025. – Vol. 65. – № 10. – P. 106033. DOI: 10.1088/1741-4326/ae05a0.
26. Deichuli, P.P. Long-pulse arc-discharge plasma source with cold cathode for diagnostic neutral beam injector / P.P. Deichuli, A.A. Ivanov, N.V. Stupishin // Review of Scientific Instruments. – 2008. – Vol. 79. – № 2. – P. 02C106. DOI: 10.1063/1.2821511.
27. Akhmetov, T.D. Model of Neutral-Beam Propagation in a Duct With Scrapers / T.D. Akhmetov, V.I. Davydenko, A.A. Ivanov // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2008. – Vol. 36. – № 4. – P. 1545-1551. DOI: 10.1109/TPS.2008.917951.
28. Гамов, В.В. ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕКЦИОННЫМ КОМПЛЕКСОМ УСТАНОВКИ КОТ / В.В. Гамов, Н.А. Афанасьев, Р.В. Воскобойников и др. // Тезисы

29. Гамов, В.В. МЕТОДИКА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЁТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АТОМАРНЫХ ПУЧКОВ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ КОТ / В.В. Гамов, Н.А. Афанасьев, Р.В. Воскобойников и др. // Тезисы докладов XXI Всероссийской конференции ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ. – Сочи, 2025. – С. 279-280.

30. Uhlemann, R. Hydrogen and deuterium ion species mix and injected neutral beam power fractions of the TEXTOR–PINIs for 20–60 kV determined by Doppler shift spectroscopy / R. Uhlemann, R.S. Hemsworth, G. Wang, H. Euringer // Review of Scientific Instruments. – 1993. – Vol. 64. – № 4. – P. 974-982. DOI: 10.1063/1.1144100.

31. Polosatkin, S. Effect of sublevel population mixing on the interpretation of doppler-shift spectroscopy measurements of neutral beam content / S. Polosatkin // Journal of Instrumentation. – 2013. – Vol. 8. – № 05. – P. P05007-P05007. DOI: 10.1088/1748-0221/8/05/P05007.

32. Polosatkin, S.V. Study of sublevel population mixing effects in hydrogen neutral beams / S.V. Polosatkin, A.A. Ivanov, A.A. Listopad, I.V. Shikhovtsev // Review of Scientific Instruments. – 2014. – Vol. 85. – № 2. – P. 02A707. DOI: 10.1063/1.4826339.

33. Жимулев, К.Ф. ДИАМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ КОТ / К.Ф. Жимулев, Н.А. Афанасьев, В.В. Гамов и др. // Тезисы докладов LI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. – Звенигород, 2025. – С. 123.

34. Жимулев, К.Ф. ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ И МГД-НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ НА УСТАНОВКЕ КОТ / К.Ф. Жимулев, В.В. Гамов, К.С. Колесниченко, С.В. Мурахтин // Тезисы докладов LIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. – Звенигород, 2026. – С. 149.

35. Жимулев, К.Ф. СИСТЕМА МАГНИТНЫХ ДИАГНОСТИК УСТАНОВКИ КОТ / К.Ф. Жимулев, В.В. Гамов, К.С. Колесниченко, С.В. Мурахтин // Тезисы докладов XXI Всероссийской конференции ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ. – Сочи, 2025. – С. 87-88.

36. Zhimulev, K.F. Diamagnetic measurements at the CAT device / K.F. Zhimulev, N.A. Afanasev, V.V. Gamov et al. // Proceedings of the 14th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement. – Tsukuba, Japan, 2025.
37. Солдаткина, Е.И. Газодинамическая ловушка: система управления и диагностический комплекс / Е.И. Солдаткина, П.А. Багрянский, Е.Д. Господчиков, и др. – ИЯФ СО РАН, 2025. – Вып. 2025–08.
38. Chen, S.-L. Instantaneous Direct-Display System of Plasma Parameters by Means of Triple Probe / S.-L. Chen, T. Sekiguchi // Journal of Applied Physics. – 1965. – Vol. 36. – № 8. – P. 2363-2375. DOI: 10.1063/1.1714492.
39. Chen, F.F. Electric Probes / F.F. Chen // Plasma Diagnostic Techniques. – 1965. – P. 113-200.
40. Коробейникова, О.А. Измерение линейной плотности плазмы в расширителе ГДЛ с помощью 4 мм СВЧ-интерферометра / О.А. Коробейникова, С.В. Мурахтин // Тезисы докладов XLVI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. – Звенигород, 2019.
41. Гамов, В.В. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ НРА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА УСТАНОВКЕ КОТ / В.В. Гамов, Н.А. Афанасьев, К.Ф. Жимулев и др. // Тезисы докладов XXI Всероссийской конференции ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ. – 29 сентября – 03 октября Сочи, 2025. – С. 199-200.
42. Полосаткин, С.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПУЛЯЦИИ БЫСТРЫХ ИОНОВ В УСТАНОВКЕ ГОЛ-NB / С.В. Полосаткин, В.И. Баткин, А.В. Бурдаков и др. // Тезисы докладов LII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. – Звенигород, 2025. – С. 88.
43. Foley, E.L. Progress on the motional Stark effect with laser-induced fluorescence diagnostic (invited) / E.L. Foley, F.M. Levinton // Review of Scientific Instruments. – 2006. – Vol. 77. – № 10. – P. 10F311. DOI: 10.1063/1.2219432.

В.В. Гамов, Р.В. Воскобойников, К.Ф. Жимулёв, П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин, К.С. Колесниченко,
С.В. Мурахтин, Д.В. Моисеев, В.В. Приходько, Е.И. Солдаткина, Н.В. Ступишин,
А.Д. Хильченко, И.С. Черноштанов

Экспериментальная установка КОТ: система управления и диагностический комплекс.

Препринт ИЯФ СО РАН
2026-05

Ответственный за выпуск М.В. Кузин
Работа поступила 14.10.2026 г.

Сдано в набор 15.10.2026 г.

Подписано в печать 15.10.2026 г.

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

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ №
