

Национальная программа по термоядерному синтезу

П. Багрянский

На заседании президиума Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам 24 декабря 2020 года был утвержден паспорт комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года».

В состав комплексной программы входят следующие федеральные проекты.

1. Разработка технологий двухкомпонентной атомной энергетики с замкнутым ядерным топливным циклом
2. Создание современной экспериментально-стендовой базы для разработки технологий двухкомпонентной атомной энергетики с замкнутым ядерным топливным циклом
- 3. Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий**
4. Разработка новых материалов и технологий для перспективных энергетических систем
5. Проектирование и строительство референтных энергоблоков атомных электростанций, в том числе атомных станций малой мощности

В рамках ФПЗ «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» в зоне ответственности ИЯФ находятся четыре мероприятия:

1. разработка и испытание мощных систем инжекции атомарных пучков для нагрева плазмы и поддержания тока, в том числе стационарных;
2. создание источников атомарных и ионных пучков нового поколения;
3. экспериментальная верификация эффективных методов удержания плазмы в существующих и перспективных линейных системах;
4. реконструкция и техническое перевооружение комплекса разработки новых технологий удержания термоядерной плазмы высокой плотности в линейных системах.

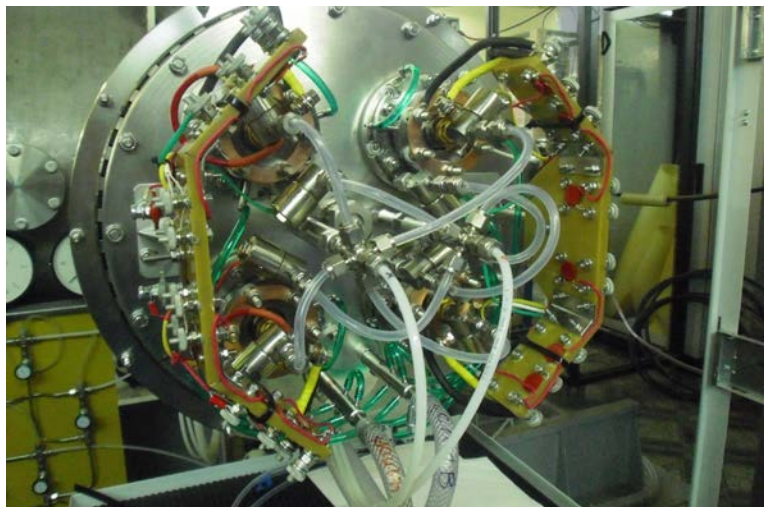
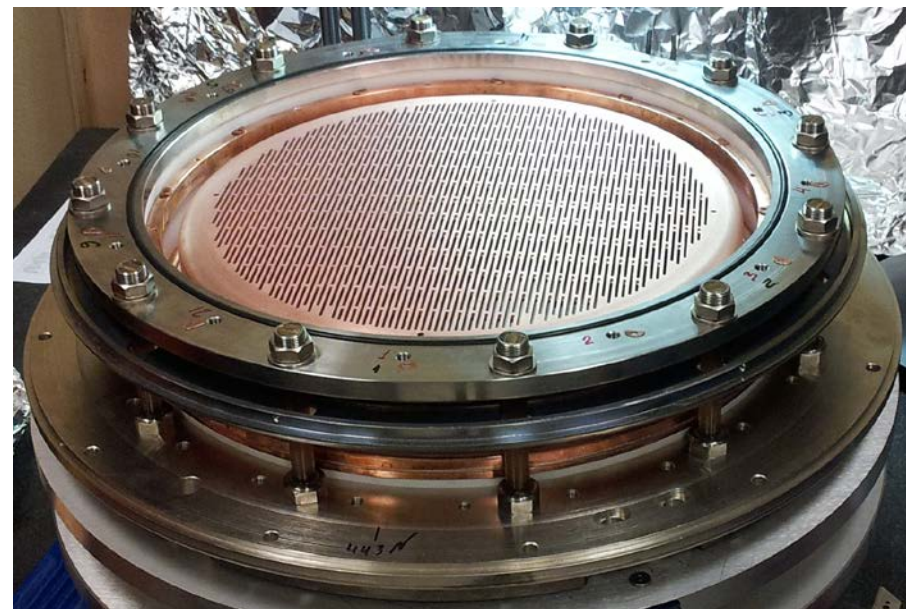
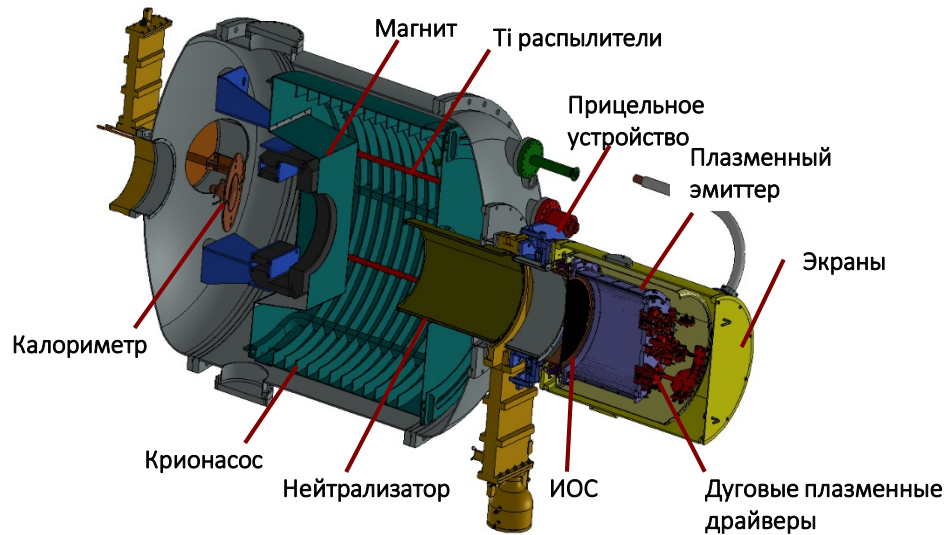
Первые три мероприятия относятся к категории прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР), четвертое мероприятие - реконструкция и техническое перевооружение.

Разработка и испытание мощных систем инжекции атомарных пучков для нагрева плазмы и поддержания тока, в том числе стационарных

1. Создание экспериментального образца атомарного инжектора на положительных ионах с низкой энергией (15 кэВ), но с рекордным током пучка (не менее 150 А) и длительностью ≥ 30 мс для установки ГДЛ (ГДМЛ).
2. Разработка концептуального проекта прототипа атомарного инжектора непрерывного действия на отрицательных ионах с энергией не ниже 500 кэВ, изготовление и испытание ключевых элементов прототипа.
3. Создание источника положительных ионов с энергией 100 кэВ и током пучка 75 А (мощность в ионном пучке 7.5 МВт).



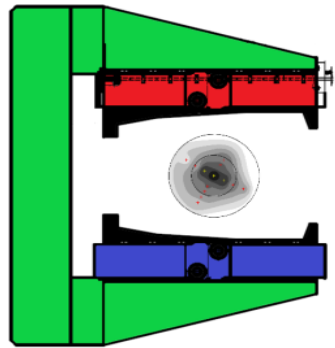
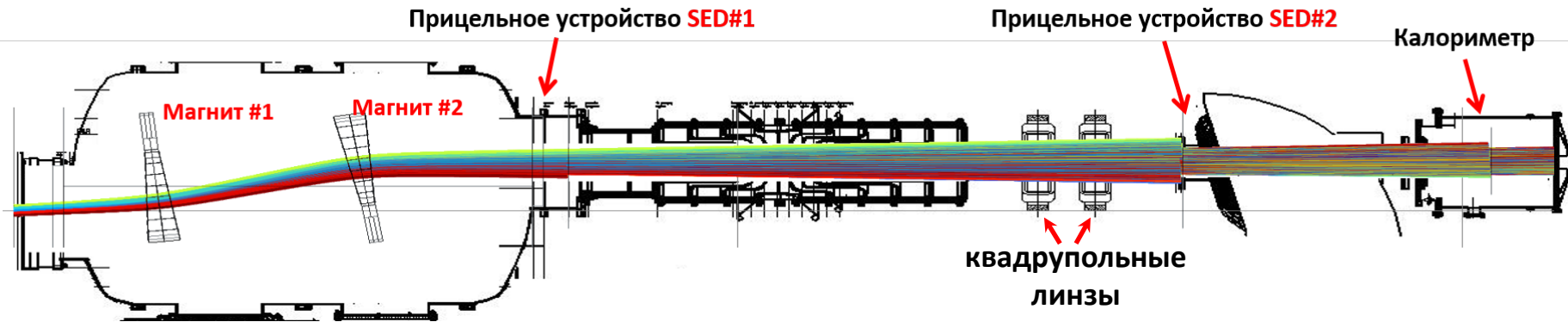
Прототип инжектора пучка > 15 кэВ, 1.7 МВт, > 30 мс



- Сетки с щелевыми отверстиями
- Большая площадь сеток - \varnothing 340 мм
- Сферические сетки для баллистической фокусировки пучка
- Различные расходимости по x и y
- Изготовлено два поколения сеток для отработки технологий
- Для создания плазмы используется 4 дуговых генератора и 48-полюсная магнитная стенка \varnothing 400



Пучковый тракт прототипа инжектора на основе H^-



Профиль пучка в магните #1

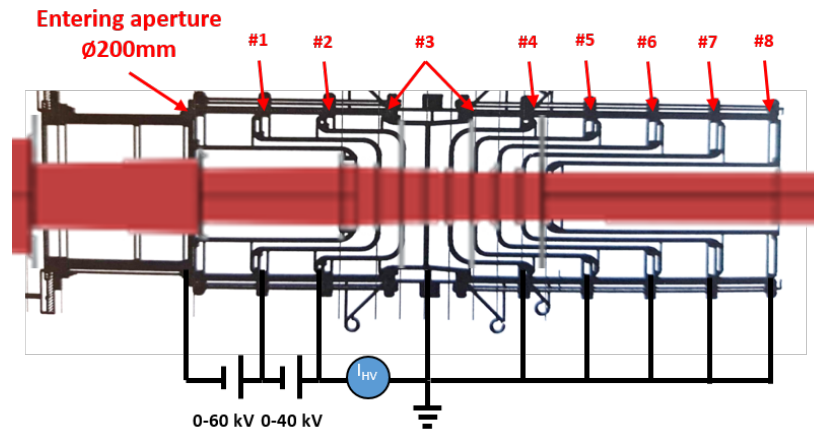


Схема подключения ВВ выпрямителей к ускорительной трубке в первых экспериментах

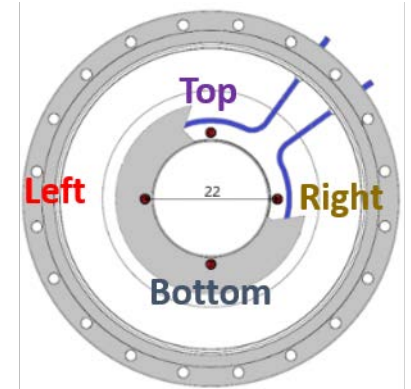
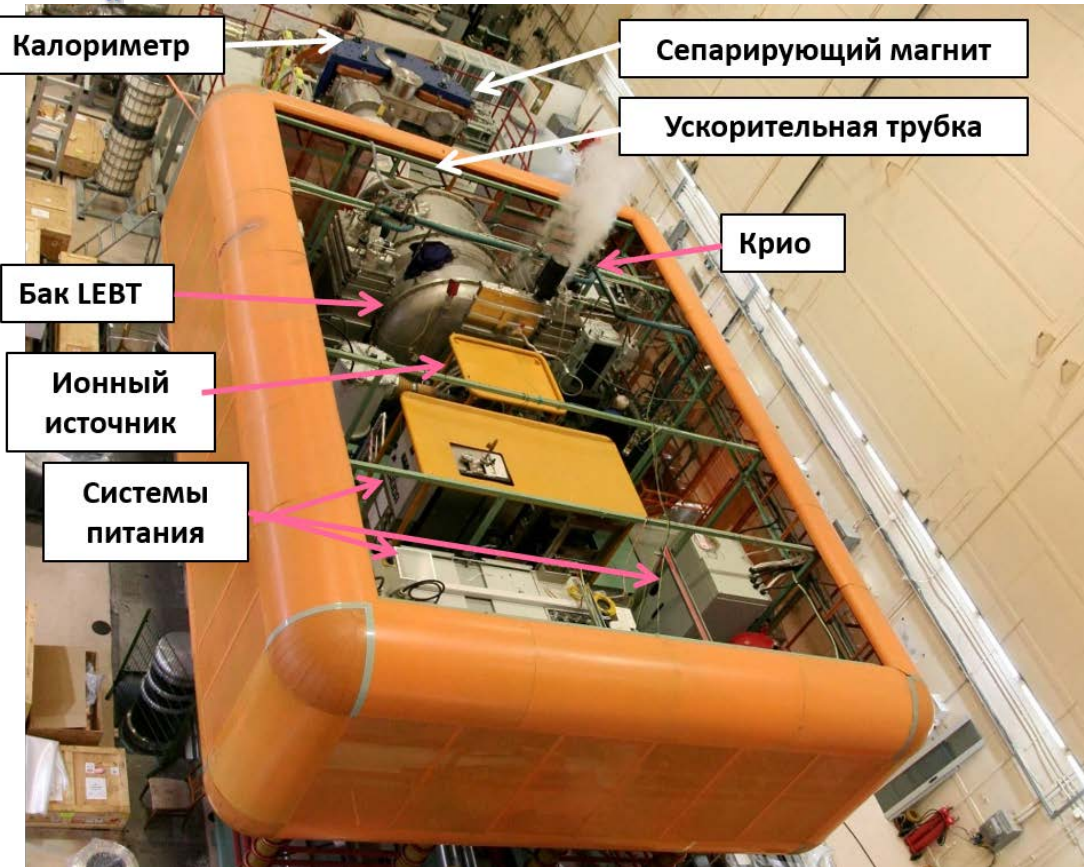


Схема прицельного устройства с вторично-эмиссионными датчиками

Прототип инжектора на отрицательных ионах



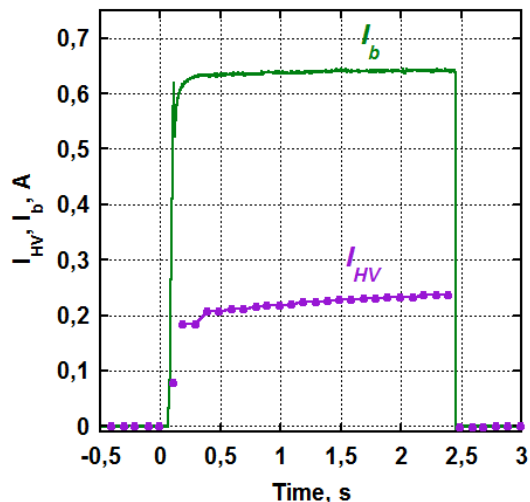
ВВ платформа вид сверху



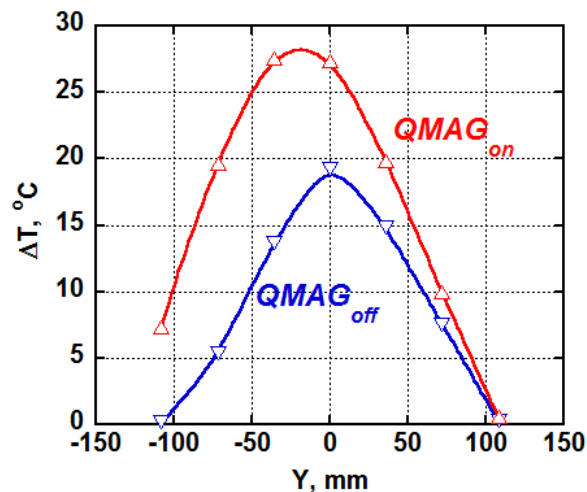
ВВ платформа вид сбоку



Исследование процесса ускорения ионов H^-



Осциллограммы тока пучка на выходе из источника I_b и тока ускоренного в ускорительной трубке I_{HV}



Профиль пучка на расстоянии 10 м с квадрупольными линзами **ON & OFF**



Сжатие пучка на калориметре

- **~ 35 % пучка было ускорено до энергии $83+160 = 243$ kV**
- Перехват на электроды ускорительной трубки ~ 3 mA (1.3%)
- Использование квадрупольных магнитов уменьшает размер пучка на выходе из НЕВТ

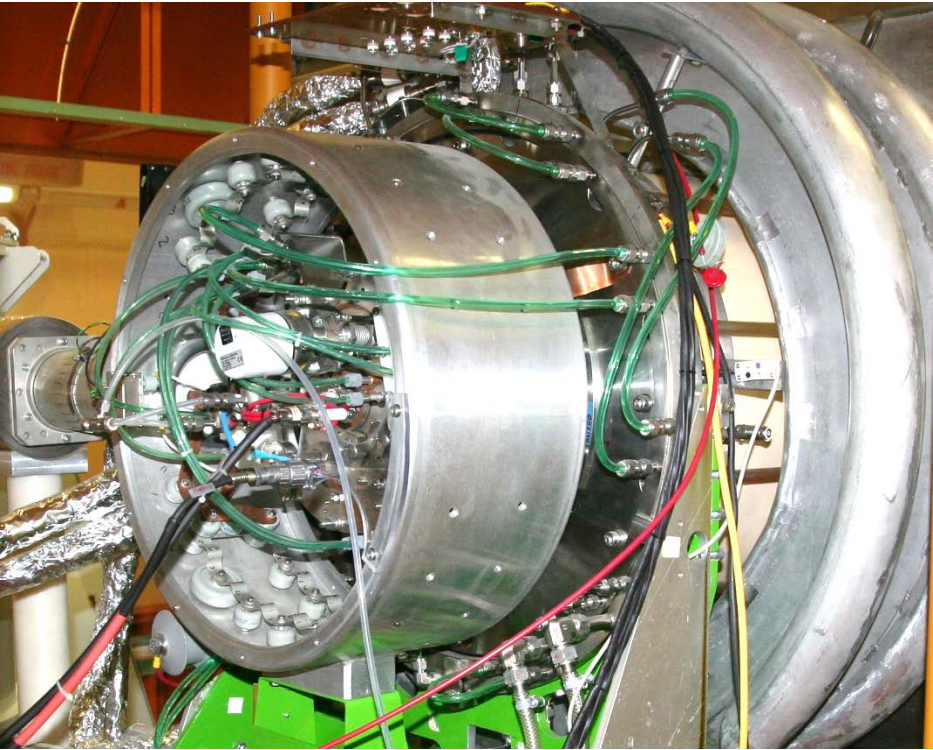


Источник H^+ с энергией 100 кэВ и током 75 А

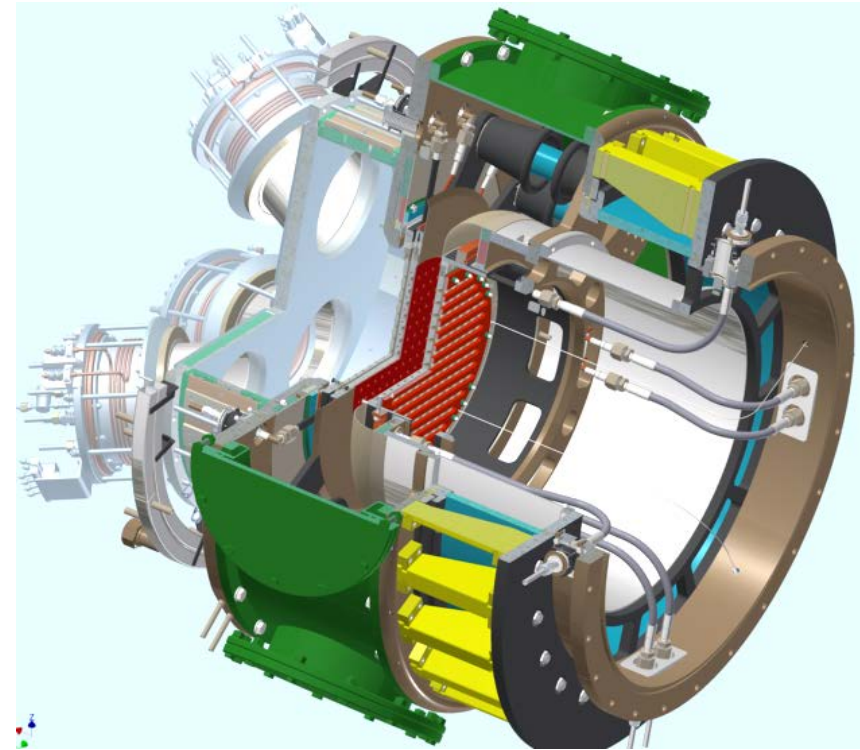
Предполагается создание источника положительных ионов с энергией 100кэВ и током пучка 75А (мощность в ионном пучке 7.5 МВт). Одновременно с ним будет создан газовый нейтрализатор пучка ионов дейтерия, что позволит получать атомарный пучок с мощностью на выходе не менее 3.5 МВт. Сравнимый ток пучка ионов был получен ранее на инжекторах установок TFTR и DIII-D. Для большинства инжекционных систем длительность работы ≤ 10 сек. Пучок создаваемого инжектора будет хорошо сфокусирован, что обеспечивает его прохождение через вводные порты уменьшенных размеров. Конструкция источника ионов рассчитана на непрерывный режим работы.



ВЧ-источники ионов H^- : 1,5 А и 9 А, 120 кэВ



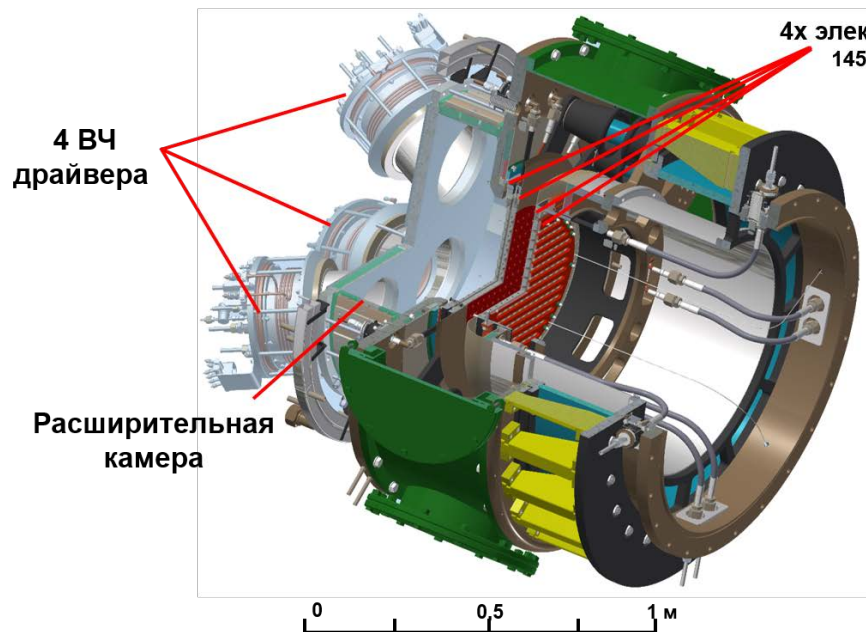
1.5 А источник с одним ВЧ драйвером – установлен на стенде и эксплуатируется



9 А источник с 4 ВЧ драйверами – в стадии сборки



ВЧ-источник ионов H^- : 9 А, 120 кэВ



Проектные параметры 9А ионного источника.

Параметр	Значение
Энергия ионов	120 кэВ
Ток отрицательных ионов	9 А
Длительность импульса	100 с
Вытягивающее напряжение	до 10 кВ
Вытягивающий зазор	5 мм
Ускоряющее напряжение	110 кВ
Ускоряющий зазор	42 мм
Диаметр эмиссионного отверстия	18 мм
Плотность тока в плоскости эмиттера	25 мА/см ²
Натекание водорода	12 л·Тор/с
Давление водорода в плазменной камере	5 мТор

Статус на 20 января 2021

- Все **основные элементы** источника изготовлены.
- Собран корпус источника с высоковольтным изолятором.
- Установлена 4-электродная ионно-оптическая система.
- Собрана расширительная камера с внутренней магнитной стенкой.
- Ведется подготовка вакуумных испытаний, сборка 4-х ВЧ драйверов и их установка на расширительную камеру.

Реконструкция и техническое перевооружение комплекса разработки новых технологий удержания термоядерной плазмы высокой плотности в линейных системах

Должен быть создан научно-технологический комплекс, включающий:

1. линейную ловушку с элементами сверхпроводимости с параметрами прототипа термоядерного источника с эквивалентным потоком нейтронов 10^{18} нейтронов в секунду (газодинамическая многопробочная ловушка - ГДМЛ);
2. стендовую базу для разработки мощных источников нейтральных и ионных пучков.

Магнитная система и вакуумная камера ГДМЛ в полномасштабном варианте



Программа исследований включает демонстрацию кардинального улучшения удержания плазмы в стационарных условиях :

1. за счет использования многопробочных секций;
2. за счет перехода в режим диамагнитного удержания ($\beta = 8\pi \cdot P_{\text{plasma}} / B_V^2 \rightarrow 1$).

Экспериментальная верификация эффективных методов удержания плазмы в существующих и перспективных линейных системах

Целью работы является экспериментальное обоснование проекта ГДМЛ с использованием макетов, работающих в импульсных режимах:

- 1. ГОЛ-NB – демонстрация эффективности многопробочного удержания*
- 2. САТ + ГДЛ – удержание горячей плазмы с большим значением β ,*
...

Результаты работ в 2021-2024 годах

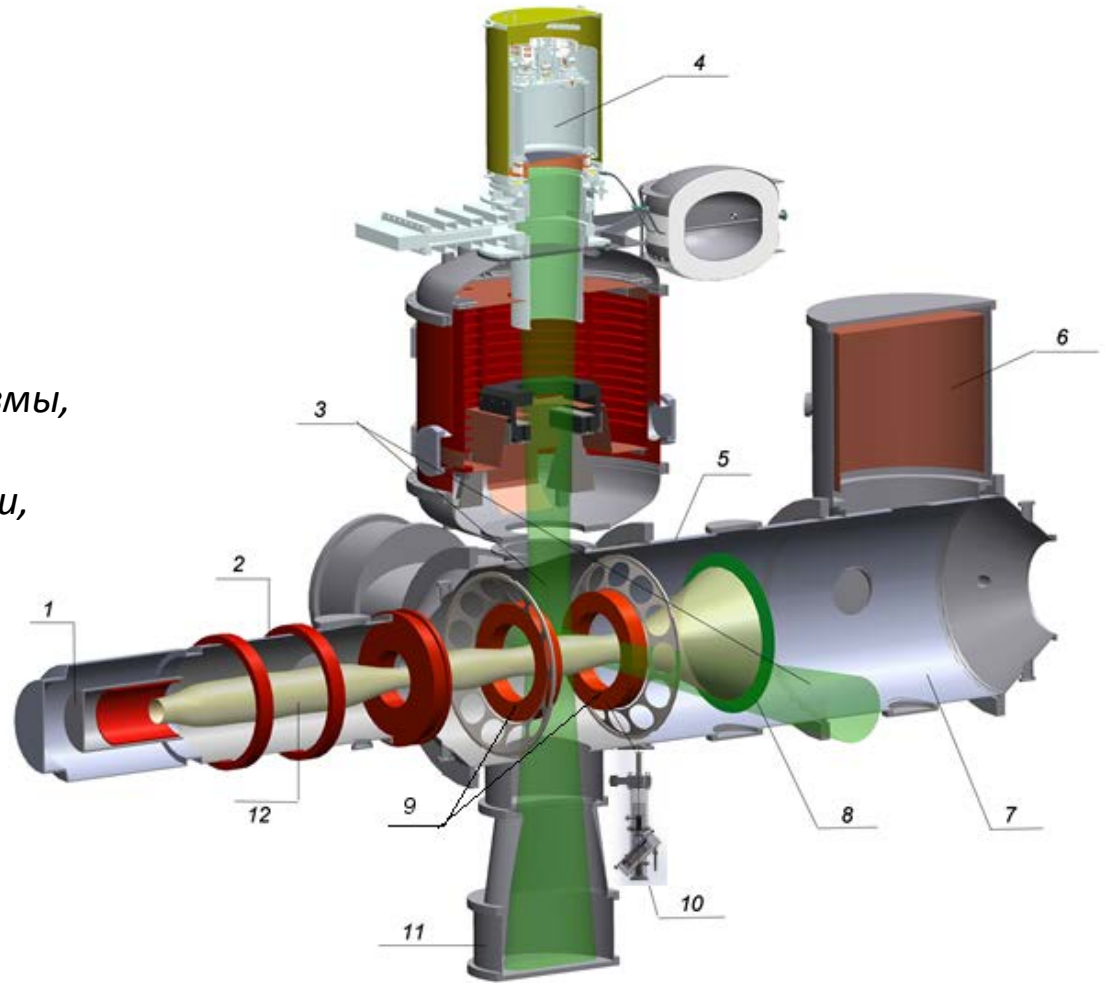
2021

На установке «Компактный осесимметричный тороид» (КОТ) с мощностью атомарной инжекции не менее 1,5 МВт продемонстрировано устойчивое удержание плазмоида горячих ионов со средней энергией не менее 7 кэВ.

В случае успеха экспериментальной программы установки КОТ можно ожидать достижение режима с обращением магнитного поля и получения в этой установке плазмоида с замкнутыми силовыми линиями магнитного поля (FRC – field reversed configuration). В настоящее время исследование по FRC для термоядерных приложений активно ведется в нескольких мировых центрах, однако используемый в рамках проекта подход – обращение поля с помощью мощной инжекции быстрых нейтралов – является новаторским и очень перспективным с точки зрения использования в термоядерном реакторе.

Установка КОТ

- 1- Плазменная пушка,
- 2 - бак плазменной пушки,
- 3 – атомарные пучки,
- 4 – атомарный инжектор,
- 5 – бак приёмника плазмы,
- 6 – криосорбционный насос,
- 7 – бак криосорбционного насоса,
- 8 – секционированный приёмник плазмы,
- 9 – соленоид пробкотрона,
- 10 – анализатор атомов перезарядки,
- 11 – приёмник пучка,
- 12 – мишенная плазма.



Плотность мишенной плазмы	$4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$
Температура мишенной плазмы	50 эВ
Расстояние между пробками	50 см
Радиус плазмы	10 см
Магнитное поле в центре	2 кГс
Пробочное отношение	2
Ток инжекции	250-300 эк.А
Энергия инжекции	15 кэВ
Длительность импульса инжекции	5 мс
Длительность импульса магнитного поля	50 мс

Результаты работ в 2021-2024 годах

2022

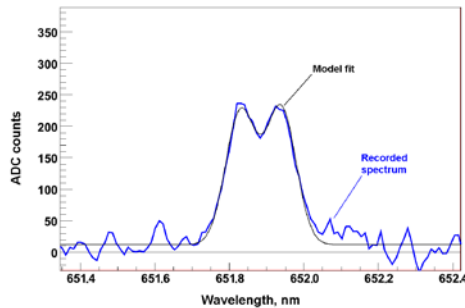
Для получения информации о локальных значениях β внутри плазменного столба будет развита методика локальных измерений величины магнитной индукции, основанная на динамическом эффекте Штарка с использованием лазерно-индуцированной флуоресценции. Планируется достичь рекордного для данной методики разрешения на уровне не хуже 0.01 Тл, что позволит детально исследовать режимы удержания горячей плазмы с высоким β в ГДЛ.

Актуальность:

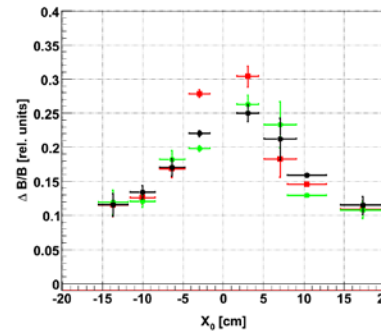
- Возможность измерения магнитного поля в плазме высокого давления ($\beta \approx 1$),
- Существенное увеличение точности измерений магнитного поля в плазме методом MSE (лучше 1%).

Имеющийся задел:

- Опыт разработки спектральных MSE диагностик и применения их в исследованиях. Измерено $\beta = 0.5$ в плазме ГДЛ,
- На ГДЛ проведены измерения рекордно малого магнитного поля в плазме $0.2 \text{ T} \pm 2.5\%$ с разрешением по времени 200 мкс,
- На пучке дейтерия 50 кэВ, получен разброс по продольной энергии менее 0.1%.



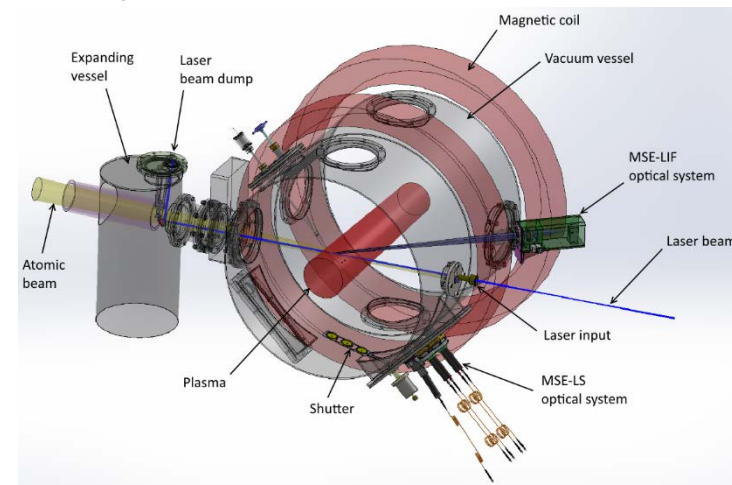
Пример: спектр MSE в измерении магнитного поля в плазме ГДЛ $B = 0.2 \text{ T} \pm 2.5\%$.



Пример: поперечные профили относительного диамагнетизма плазмы в ГДЛ по данным MSE диагностики. Максимум $\beta = 0.5$ на оси.

Планируемые результаты

- 2021: Разработка и производство элементов диагностики,
- 2022: Первые измерения MSE-LIF на ГДЛ, достижение разрешения по магнитному полю 0.1 T,
- 2023: Измерение динамики поперечного профиля магнитного поля (модуль и направление) по восьми точкам с разрешением по времени 1 мс. Достижение разрешения по магнитному полю 0.05 T,
- 2024: Достижение разрешения по магнитному полю 0.01 T. Выработка решений по дальнейшему развитию MSE-LIF для проведения измерений в экспериментах с плазмой высокого давления: ГДМЛ и другие проекты.



Январь 2021: Концептуальный проект диагностики MSE-LIF на ГДЛ с использованием существующего 50 кэВ диагностического пучка дейтерия DINA-5M.

Результаты работ в 2021-2024 годах

2023

С использованием импульсного макета газодинамической многопробочной ловушки длиной 10 метров получено подавление продольных потерь плазмы в многопробочном режиме не менее чем в 5 раз.

В рамках проекта предполагается впервые исследовать эффективность многопробочного удержания в квазистационарном режиме в условиях, близких к условиям в термоядерном реакторе на основе газодинамической ловушки. Получение ожидаемых параметров и подтверждение эффективности многопробочных секций откроет возможность существенного увеличения параметров термоядерного реактора на основе открытой ловушки.

Получение на установке КОТ режимов удержания плазмы с давлением, близким к давлению внешнего магнитного поля (параметр бета относительно вакуумного магнитного поля не ниже 0,9).

2024

В экспериментах на в открытой магнитной ловушке ГДЛ получено устойчивое удержание плазмы с давлением, близким к давлению внешнего магнитного поля (параметр бета не ниже 0,8).

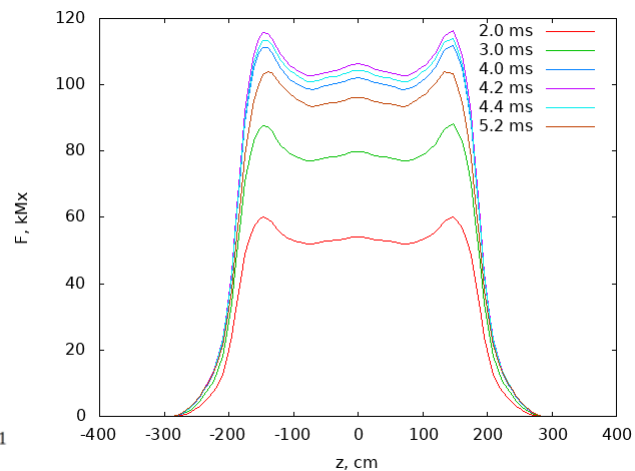
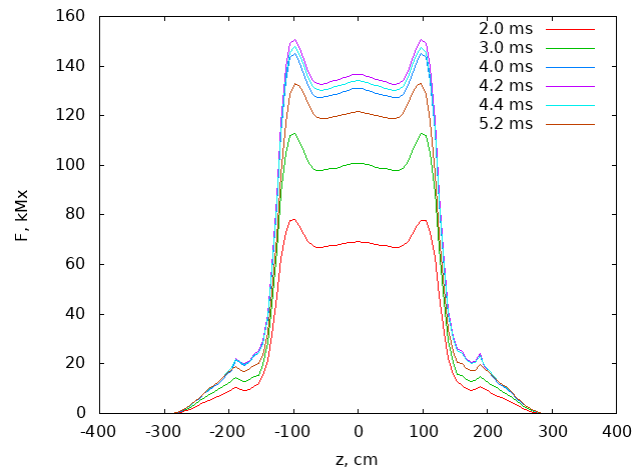
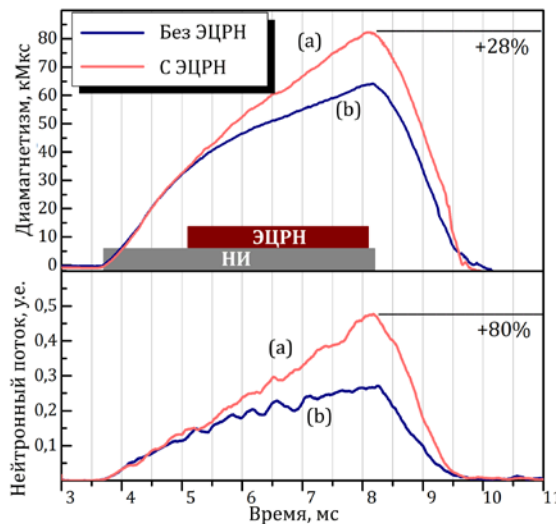
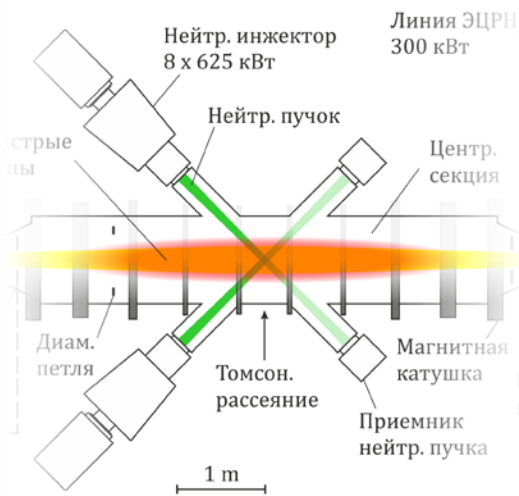
Ожидаемое значение является рекордным для осесимметричных магнитных систем. Получение высокого значения параметра бета предполагает решение проблемы стабилизации плазмы относительно неустойчивостей, вызываемых высоким давлением, и открывает путь повышения эффективности термоядерного реактора на основе линейной системы, прямо зависящей от достижимой величины параметра бета. Полученные результаты будут использованы при реализации проекта установки ГДМЛ.

Исследования плазмы высокого давления на установке ГДЛ

Серия экспериментов по исследованию удержания плазмы с высоким относительным давлением ($\beta > 0.8$) будет проведена с использованием модернизированной магнитной системы установки ГДЛ в ИЯФ СО РАН, позволяющей «сжать» энергетически плотную компоненту плазмы (быстрые ионы) в продольном направлении.

Расчетное увеличение диамагнетизма плазмы при реконфигурации магнитной системы составляет $\sim 30\%$.

В экспериментах будет использован дополнительный ЭЦР-нагрев плазмы мощностью до 1.2 МВт на частоте 54.5 ГГц, что должно обеспечить дополнительное увеличение диамагнетизма на величину до 50%.



Статус и график финансирования мероприятий

№	Мероприятие		Финансирование по годам, млн. руб.				Итого
			2021	2022	2023	2024	
1	Разработка и испытание мощных систем инжекции атомарных пучков для нагрева плазмы и поддержания тока, в том числе стационарных	база	159 755,93	45 264,18	53 251,98	186 381,92	444 654,00
		доп.	234 744,75	111 957,75	103 627,56	105 015,93	555 346,00
2	Экспериментальная верификация эффективных методов удержания плазмы в существующих и перспективных линейных системах (доп.)		147 945,00	70 560,00	65 310,00	67 185,00	351 000,00
3	Реконструкция и техническое перевооружение комплекса разработки новых технологий удержания термоядерной плазмы высокой плотности в линейных системах (доп.)		40 000,00	740 000,00	2 200 000	2 250 000	5 230 000,0
4	Создание источников атомарных и ионных пучков нового поколения (база)		106 167,66	30 080,84	35 389,22	123 862,28	295 500,00

Спасибо за внимание

