

Атомарные инжекторы и ионные источники

Шиховцев И.В.

Лаб.9-0, НКО, ЭП, ПО, ОГЭ,

Научная сессия ИЯФ СО РАН

27 февраля 2026



☐ Нагрев плазмы

Быстрые нейтральные частицы, инжектируемые в плазму ионизируются ионным или электронным ударом или перезарядкой. Захваченные магнитным полем быстрые ионы циркулируют, передавая энергию ионам и электронам плазмы при столкновениях.

- ☐ Пучки с энергией $< \sim 120$ кэВ (на основе положительных ионов)
Глобус-М2, Т-15МД, ..., Глобус-3, ГДМЛ ...
- ☐ Пучки с энергией $> \sim 0.15 \dots 1$ МэВ (на основе отрицательных ионов)
Токамак ТРТ ...
- ☐ Полная мощность (одного/системы) – единицы/десятки МВт

☐ Управление током

Инжектируемый поток нейтральных частиц может использоваться для управления током плазмы.

☐ Вращение и стабилизация плазмы

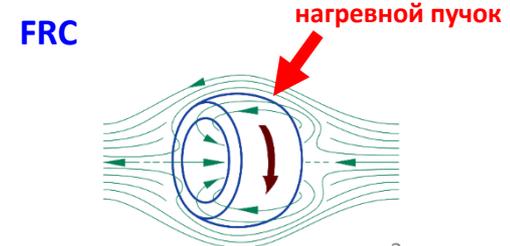
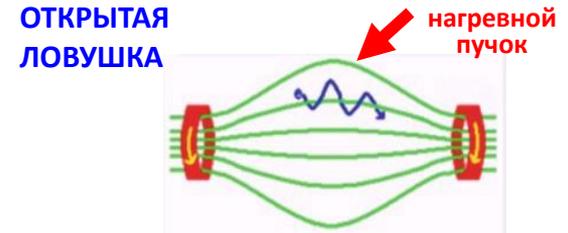
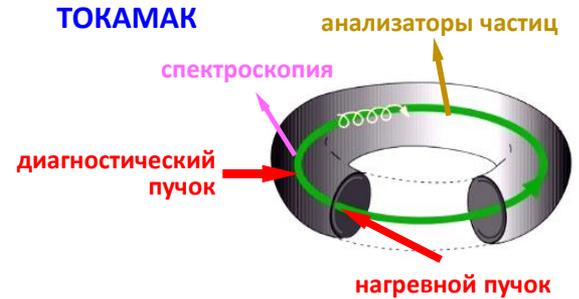
Инжектируемый поток нейтральных частиц передает импульс, увеличивая вращение плазмы. Важно для стабильности плазмы.

☐ Диагностика плазмы

Различные параметры плазмы определяются спектральным анализом светового излучения, генерируемого столкновениями быстрых нейтральных частиц с плазмой.

☐ Другие применения

Ускорительные источники нейтронов, гамма излучения
Инжекторы для ионных ускорительно/накопительных комплексов
Имплантеры



□ НИР «Разработка и испытание мощных систем инжекции атомарных пучков для нагрева плазмы и поддержания тока, в том числе стационарных» рамках ФП «Технологии термоядерной энергетики»:

1. Разработка проектов нагревного и диагностического инжекторов для токамака ТРТ
2. Инжекторы с использованием источников положительных ионов:
 - Инжектор водородного пучка: мощность 1,7 МВт, энергия **15 кэВ**, ионный ток - **150 А**
 - Инжектор атомарного пучка (D или H): мощность 3,5 МВт, энергия **100 кэВ**, ионный ток - **75 А**
3. Источники отрицательных ионов и инжекторы с их использованием:
 - Ионные источники 120 кэВ, 1.5 А и 9 А на основе отрицательных ионов водорода
 - Инжектор на основе отрицательных ионов с током 1 А, энергией 500 кэВ

□ Контрактные работы:

4. НИОКР «Разработка ТП комплекса ТРТ в части системы нагревных инжекторов атомов и диагностического инжектора атомов» для АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»
5. Модернизация источника поляризованных ионов для ускорительного комплекса Nuclotron-NICA (Дубна)
6. Запуск диагностического инжектора на токамаке Т15-МД
7. Разработка и изготовление электронных модулей для инжектора атомов токамака Глобус-М2

□ Ионные источники для ускорителей/имплантеров:

8. Ионный источник имплантера ионов ТМ-200Т
9. Касповый ионный источник
10. Высокочастотный источник ионов H^- для тандемного ускорителя

1. Разработка нагревных и диагностического инжекторов для ТРТ

Нагревные инжектора (D) - 21 МВт, 500 кэВ, 100 с. Диагностический инжектор (H): 80 кэВ, 10 А, 100 с

Гос.задание + Контракт с АО АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

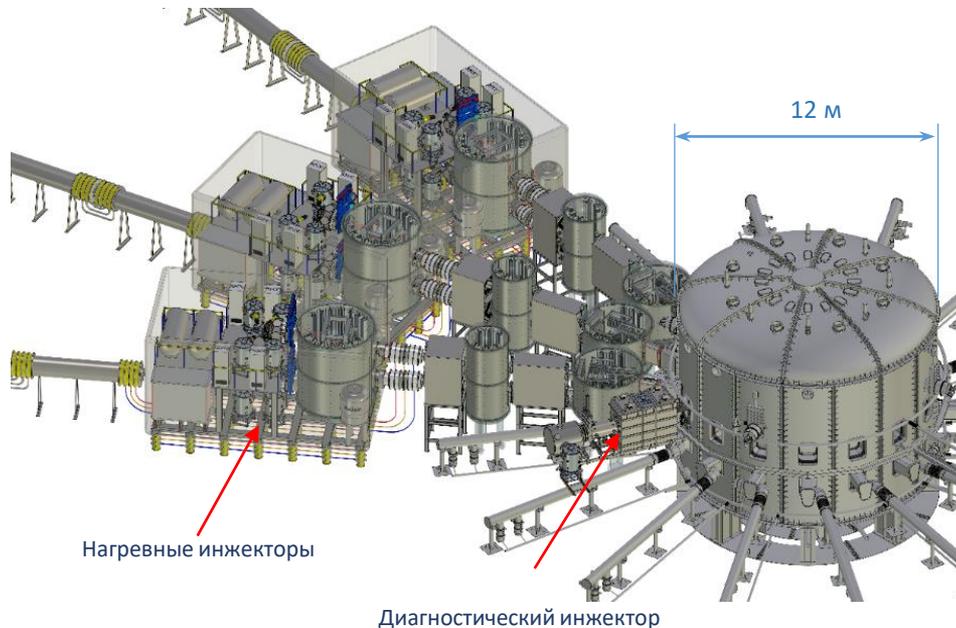
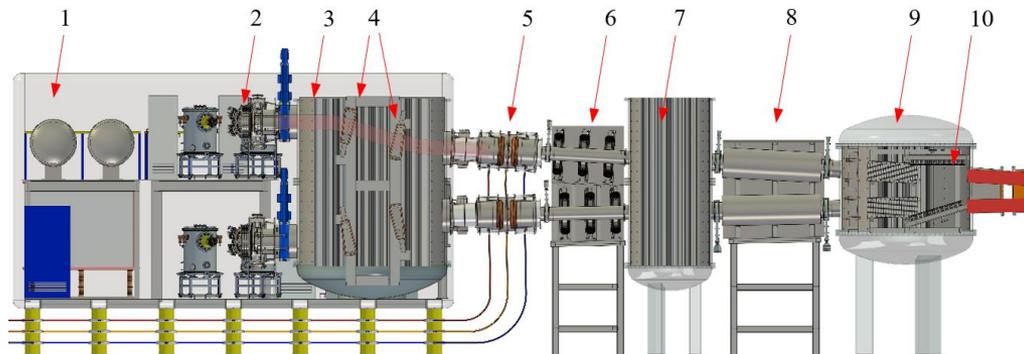


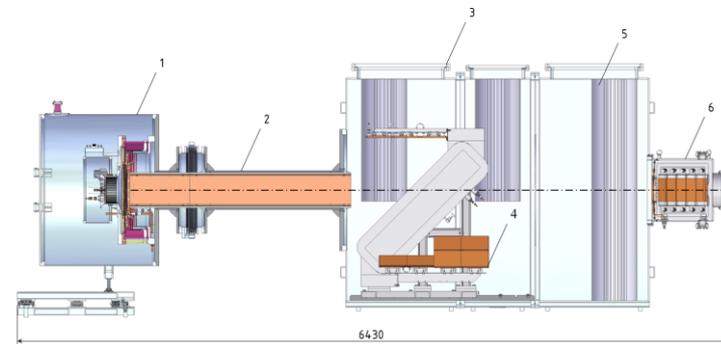
Схема размещения инжекторов нейтралов на установке ТРТ

Двух-пучковый инжектор: 500 кэВ, 7 МВт



- 1 – высоковольтная платформа, 2 – ионные источники 120 кВ, 12 А,
- 3 – камера НЭТ, 4 – поворотные магниты НЭТ,
- 5 – широкоапертурный ускоритель 380 кВ, 9 А;
- 6 – квадрупольные магниты; 7 – бак откачки ускорителя и нейтрализатора,
- 8 – перезарядная мишень-нейтрализатор (плазменная/ газовая) ,
- 9 – бак узла сепарации 10 – раздвижной приемник атомарного пучка

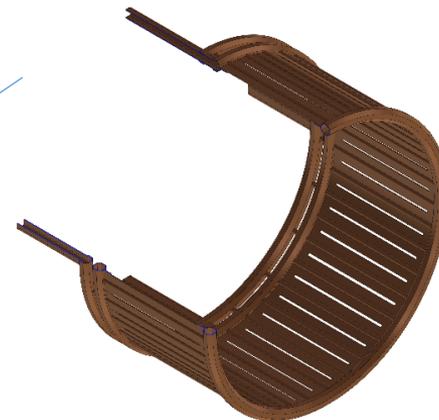
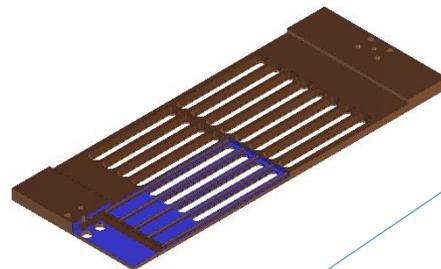
Диагностический инжектор:
80 кэВ, 10 А атомов с полной энергией,
полная мощность ~4.5 МВт



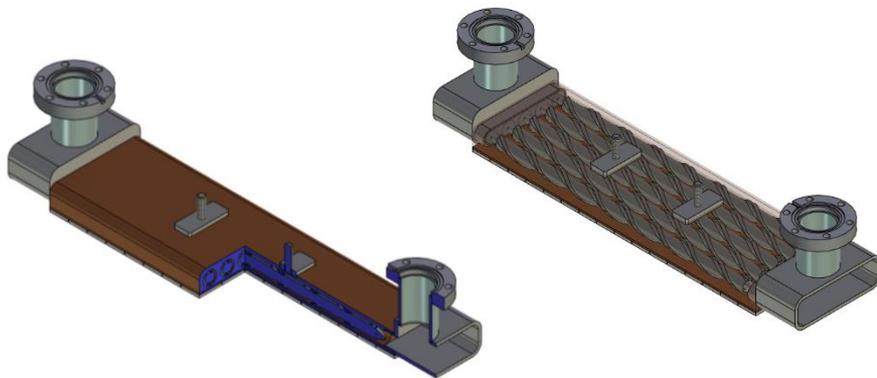
- 1 – ионный источник, 2 – нейтрализатор, 3 – вакуумный объем, 4 – сепаратор, 5 – крионасос, 6 – калориметр.



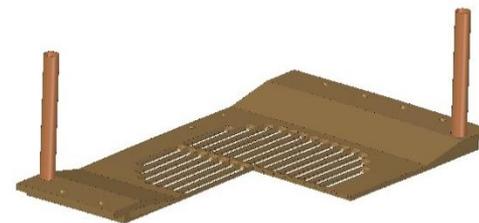
Электроды ионно-оптической системы, изготовленные методом 3D печати
(ВИАМ - НИЦ «Курчатовский институт»)



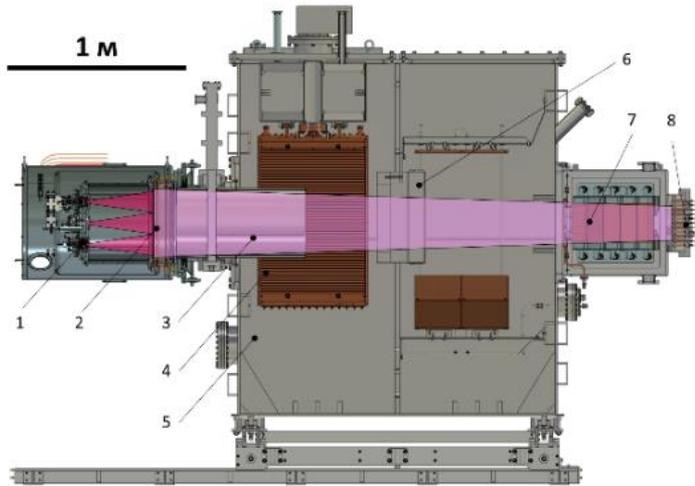
Фарадеевский экран ВЧ драйвера
ионного источника



Пластины приемника пучка с интенсивным теплообменом
за счет внутренних завихрителей потока воды

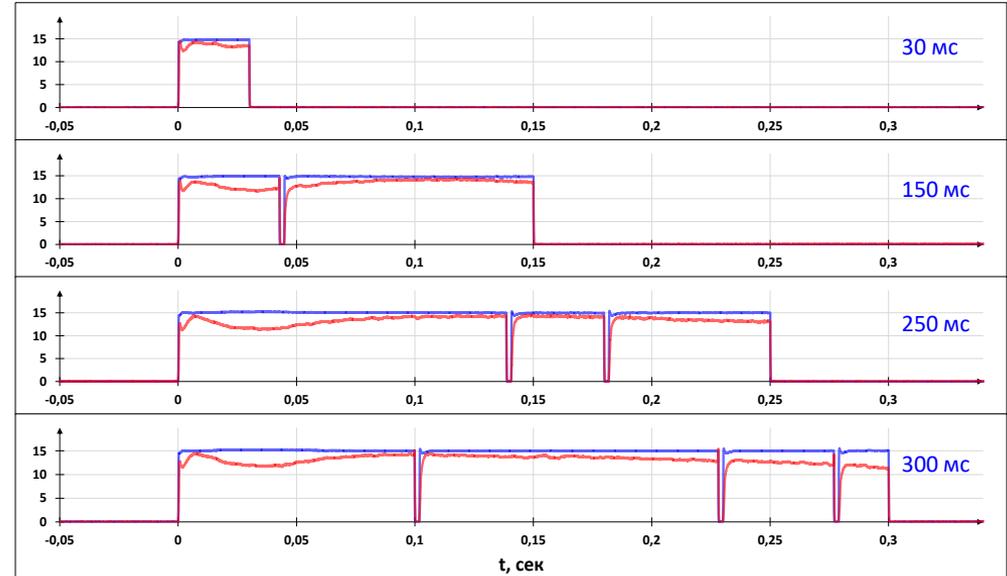


Плазменный электрод ионного источника
диагностического инжектора

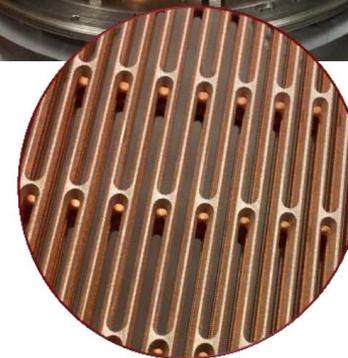
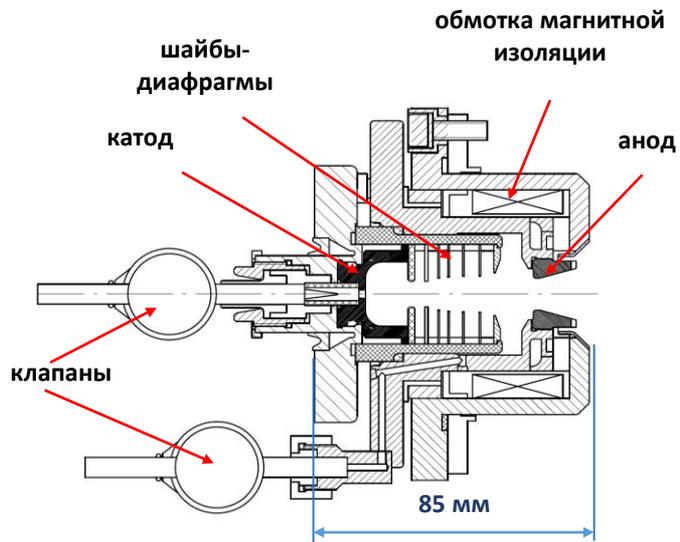


1 – дуговые генераторы плазмы; 2 – ИОС;
3 – нейтрализатор; 4 – крионасос; 6 – отклоняющий магнит; 7 – раздвижной калориметр-приемник пучка;
8 – измеритель профиля мощности пучка.

Увеличена длительность импульса пучка с 30 до 300 мс



Ток (красный луч, 150 А) и **энергия** пучка (синий луч, 15 кВ)
в импульсах 30, 150, 250 и 300 мс



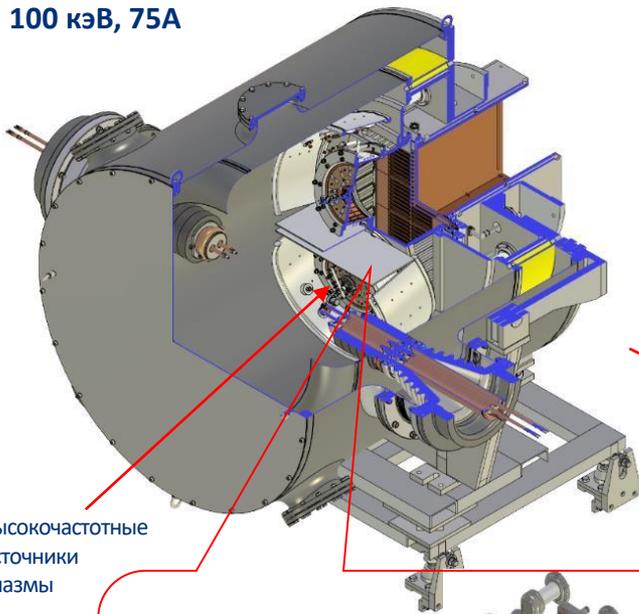
Дуговой генератор плазмы 600 А, ~150А, 90 кВт, 0.5 с

Четырех-электродная ионно-оптическая система:

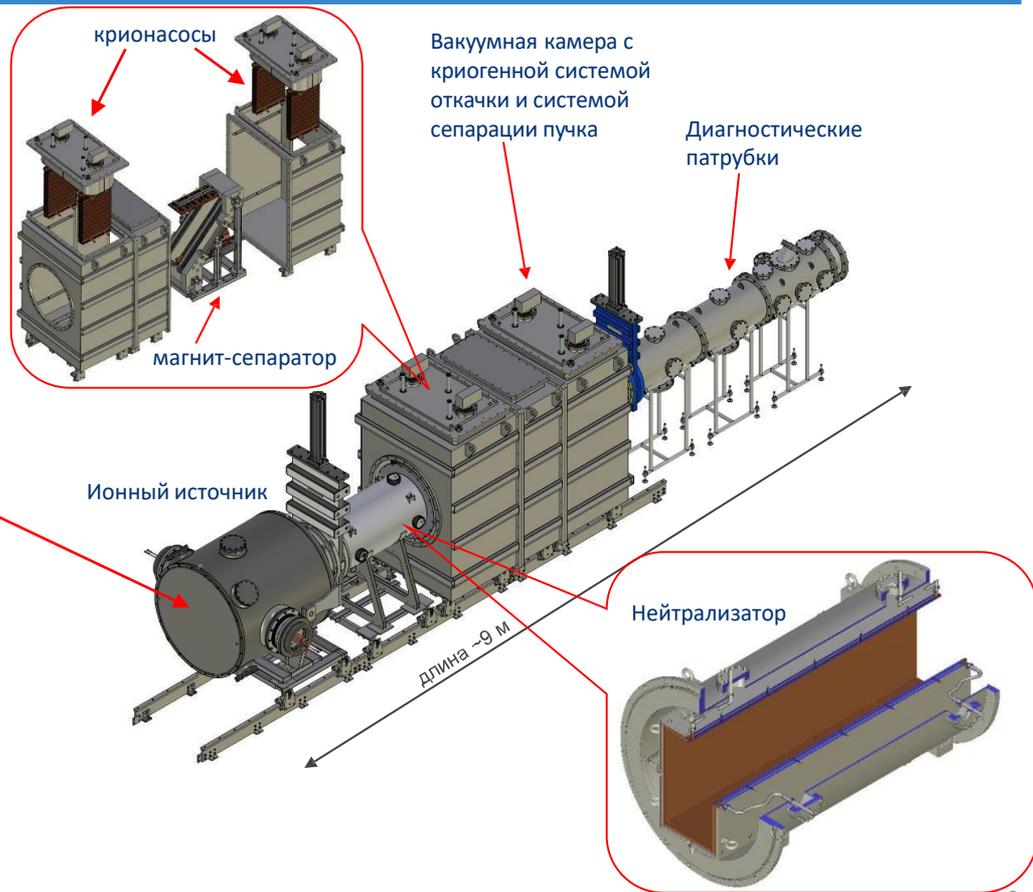
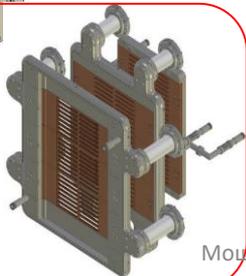
- электроды с щелевыми отверстиями,
- диаметр: 340 мм,
- сферические, для баллистической фокусировки пучка.

2в. Атомарный инжектор 3 МВт, 100 кэВ

ВЧ ИОННЫЙ ИСТОЧНИК 100 кэВ, 75А



- Ионно-оптическая система:
- трех-электродная
 - каждый электрод имеет 3 сегмента
 - плотность тока - 190 мА/см²
 - начальный размер пучка – 214x434 мм²



Мощные пучки быстрых атомов для исследований по управляемому термоядерному синтезу, И.В. Шиховцев

2в. Атомарный инжектор 3 МВт, 100 кэВ (сборка и запуск)



Высоковольтная система питания ионного источника 100 кВ, 10 МВт, 0,15 с



Система управления и вспомогательные блоки питания



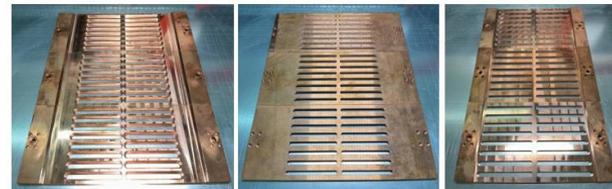
Высокочастотная система питания 2 x 100 кВт



Магнитный экран ионного источника



Вакуумная камера



Электроды ионно-оптической системы



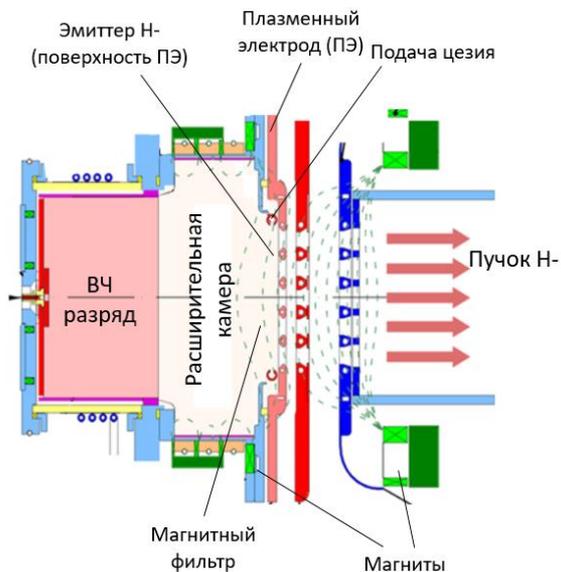
ВЧ драйверы, установленные на расширительной камере



Диагностические патрубки

За. Источники отрицательных ионов водорода 1.5 А и 9 А, 120 кэВ

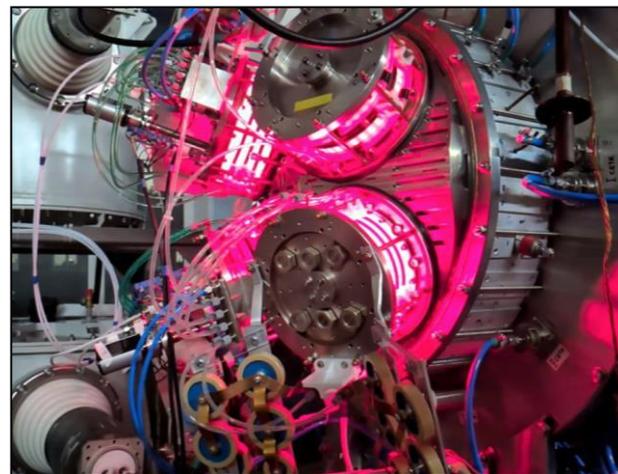
Схема источника с поверхностной генерацией отрицательных ионов и одним ВЧ генератором плазмы



1.5 А источник с одним ВЧ драйвером
4 МГц, 60 кВт, ИОС с 21 апертурой



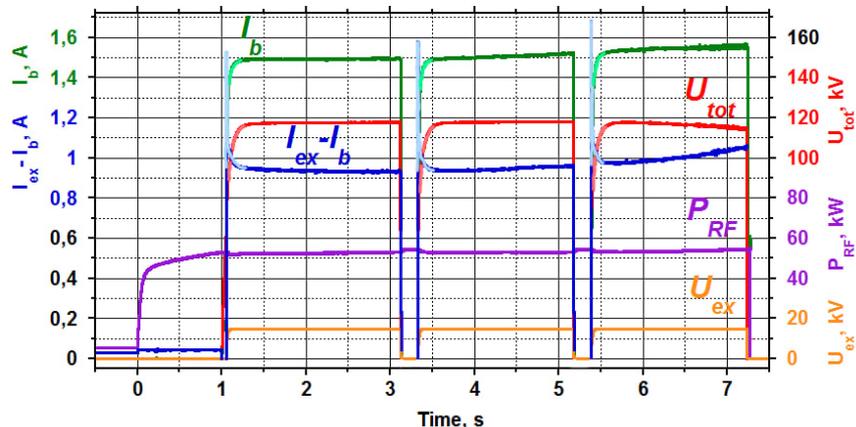
9 А источник с четырьмя ВЧ драйверами
4 МГц, 4x60 кВт, ИОС с 145 апертурами



1.5 А источник ионов H⁻ - получение и транспортировка пучка

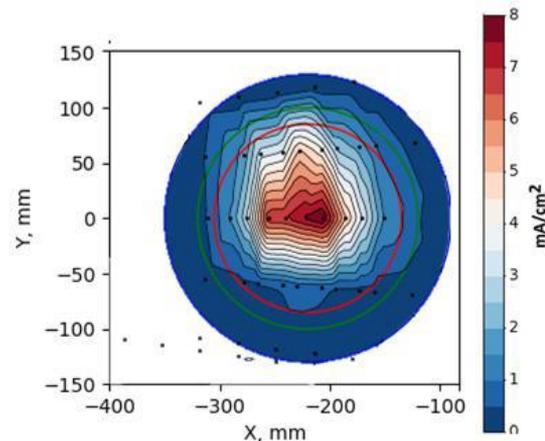
Модификация источника в 2025г. :

- Ускоряющий электрод с круглыми апертурами для снижения расходимости пучка;
- Система термостабилизации экрана ВЧ драйвера для повышения стабильности работы ВЧ разряда;
- ВЧ драйвер с квадрупольной конфигурацией магнитов на задней крышке для увеличения потока плазмы из драйвера и роста плотности тока эмиссии ОИ.



Осциллограммы **1,5 А**, **119 кэВ**, **6 сек** пучка отрицательных ионов.
Пробой высокому напряжению на 3 и 5 сек осциллограмм успешно обработаны системой защиты

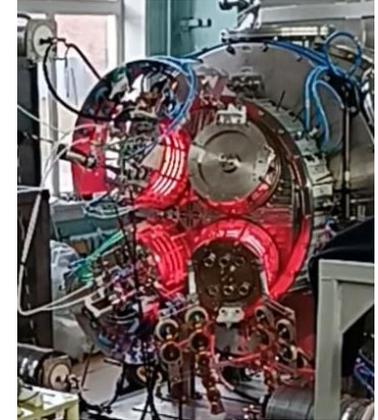
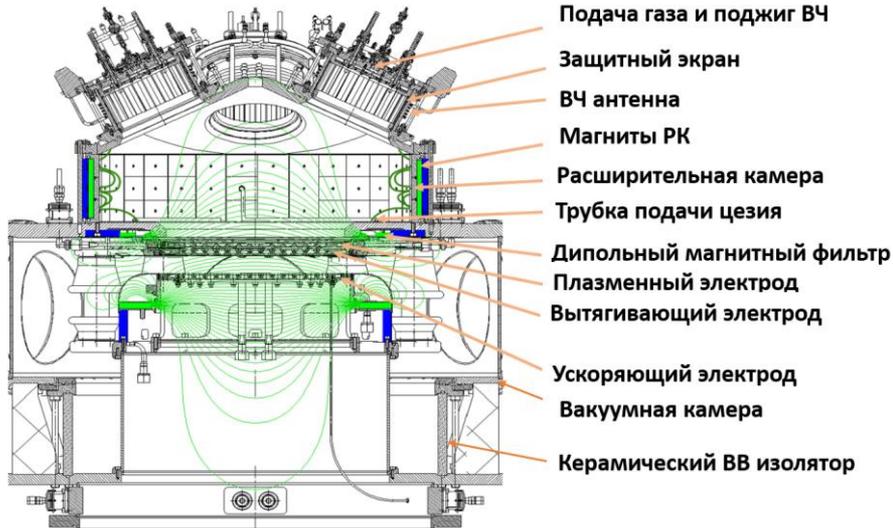
Транспортировка пучка через НЭТ



Измерения профиля пучка передвижным цилиндром Фарадея на расстоянии 2.5 м от источника

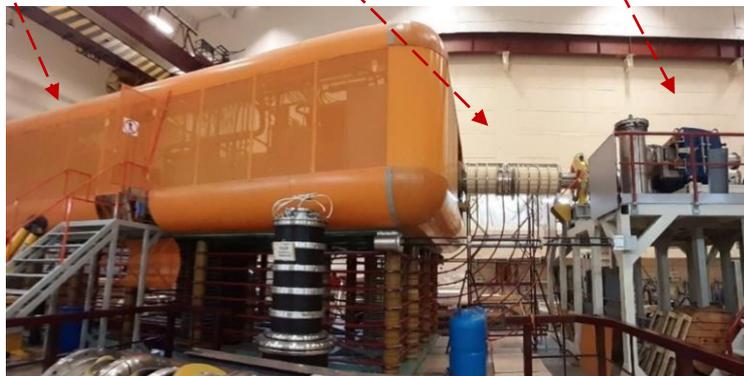
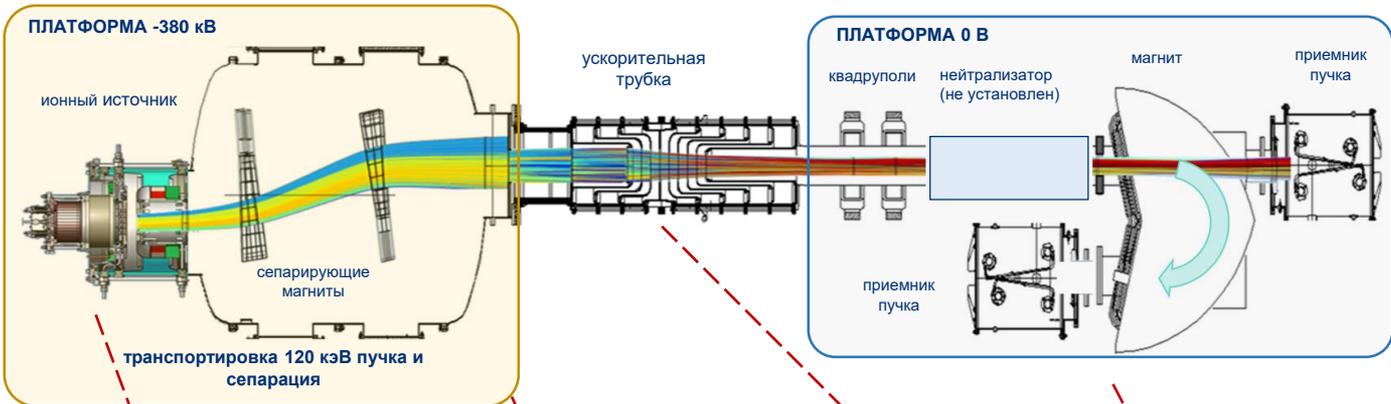
- Диаметр пучка ~96 мм (FWHM).
- Пучок расходимостью ± 15 мрад получен при оптимальном вытягивающем напряжении 10 кВ.

Схема 4-х драйверного источник отрицательных ионов водорода
с проектным током пучка 9 А

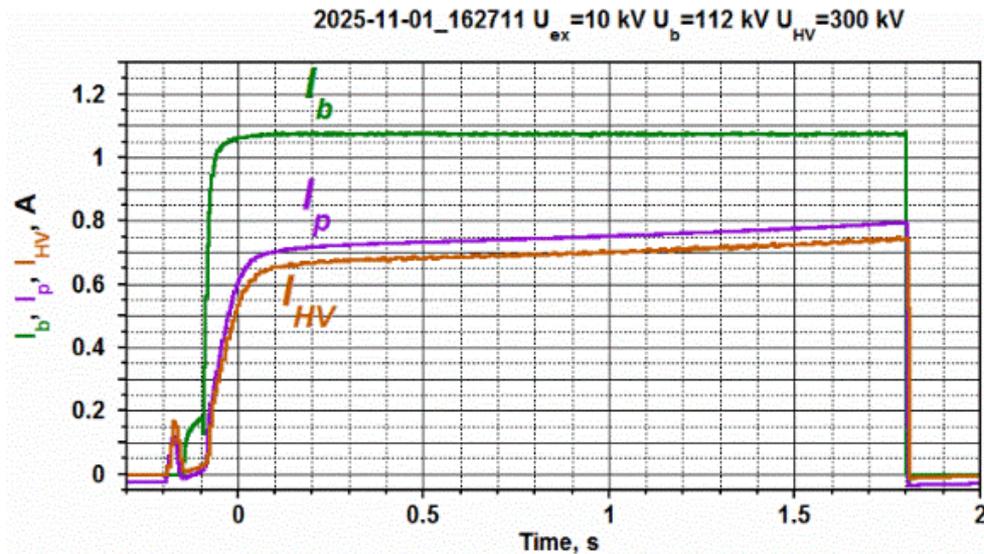


В 2025 г. начаты эксперименты с получением плазмы от четырех-драйверной системы и ее транспортировке через расширительную камеру на поверхность плазменного электрода.

Зв. Инжектор на основе отрицательных ионов с током 1 А, энергией 500 кэВ ИЯФ СО РАН



- Пучок с током до 0,75 А ускорен до энергии 400 кэВ.
- Получено 76% прохождения 1 А через НЭТ (расчетная обдирка ионов H^- в НЭТ ~24%)



Осциллограммы токов пучка: на выходе источника $I_b = 1.1 \text{ A}$,
на входе $I_p = 0.8 \text{ A}$ и на выходе ускорительной трубки $I_{HV} = 0.75 \text{ A}$

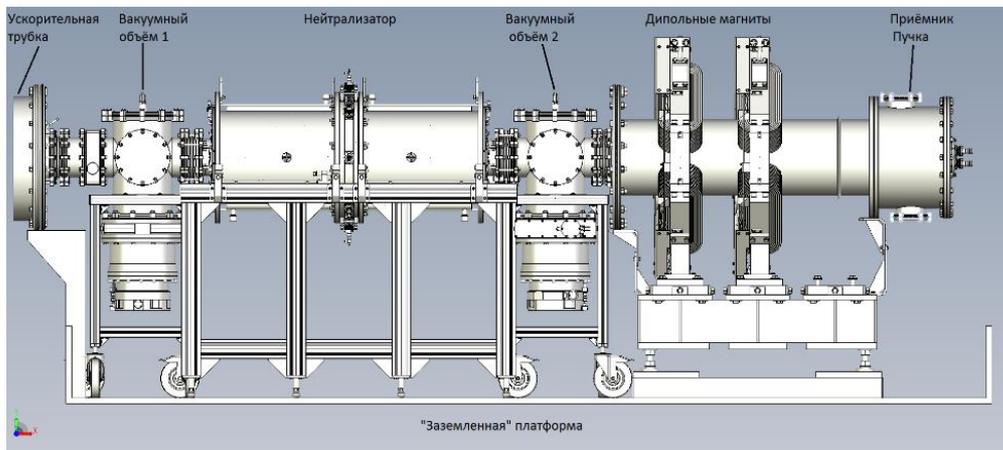
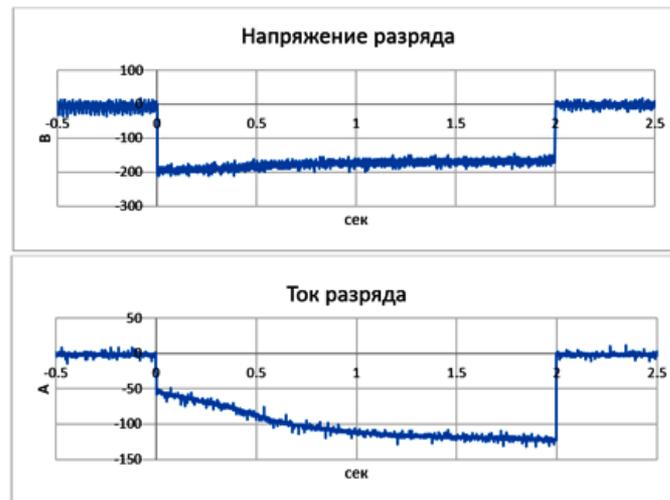


Схема установки плазменного нейтрализатора и его систем откачки на ускорительном стенде инжектора



- Получены разряды током 70-120 А, напряжением 200-150 В длительностью 2-8 сек (один LaB_6 катод).
- Начаты измерения интегральной плотности плазмы с помощью СВЧ интерферометра

5. Модернизация источника поляризованных дейтронов

для ускорительного комплекса Nuclotron-NICA (Дубна)

- Разработан, изготовлен и запущен дуговой генератор плазмы (ДГП) в ОИЯИ.
- Разработан, изготовлен и смонтирован высоковольтный сифонный узел подвески ДГП в ОИЯИ.
- Предложен проект 4-электродной ИОС.

Параметры ИОС и ионного пучка:

Прозрачность:	92.5%
Плотность тока:	0.24 А/см ²
Расходимость пучка:	$\theta=15\text{мрад}$
Извлеченный ток пучка:	$\approx 0.5\text{А (H)}$ $\approx 0.35\text{А (D)}$

Запас по току связан с тем, что полезный ток – поляризованных ионов D/H – составляет долю от полного извлеченного тока D/H.

Режим работы:

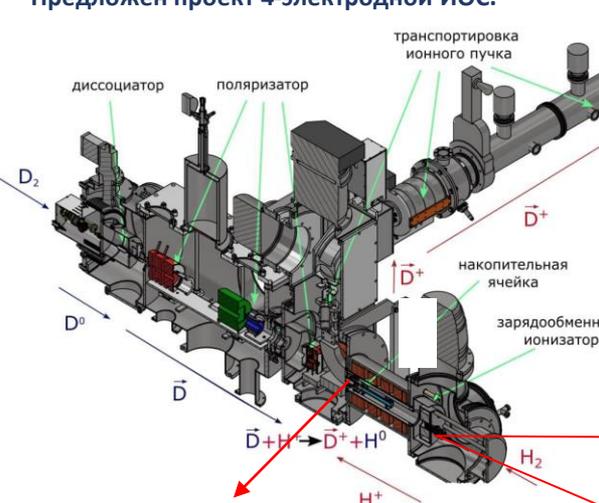
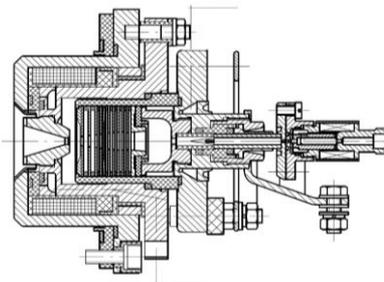
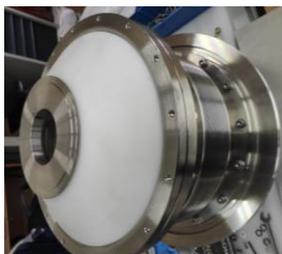
- импульсы ~ 200 мкс
- частота 0.2 - 0.5 Гц

Требуется обеспечить ионизацию пучка тепловых поляризованных атомов $D\uparrow$ или $H\uparrow$ и их ускорение в ИОС с формированием пучка ~ 10 мА / 25-40 кэВ для дальнейшего ускорения в Linac.

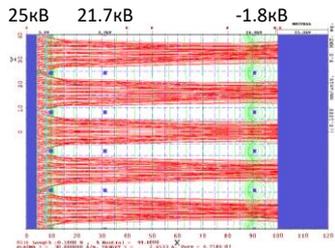


Высоковольтный сифонный узел подвески ДГП

Дуговой генератор плазмы (ДГП)



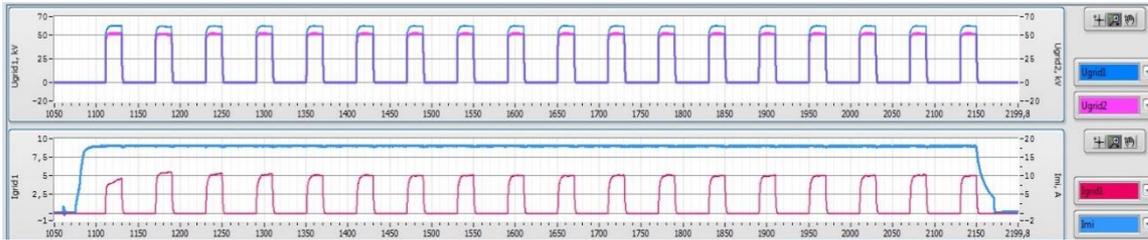
Моделирование 4-х электродной ИОС



6. Запуск диагностического инжектора ДИНА-КИ60 на токамаке Т-15МД в

НИЦ «Курчатовский институт»

- В 2025 г. завершена модернизация системы питания инжектора атомов ДИНА-КИ60.
- Инжектор установлен на штатное место рядом с Т-15МД на специальную платформу высотой 2.7 м.
- Смонтированы и запущены криосорбционные насосы НКВ-500 (2шт) производства «НКТ Криогенная техника» г. Омск (суммарно 50000 л/сек по H_2) вместо заливной системы.
- В октябре 2025 на собственный приемник-калориметр получен модулированный пучок (1:2) с параметрами: энергия 60 кВ, ток ионов 5.5-6 А, длительность 1 сек.



Выстрел #2175, $t=1,04$ сек, 20x40 мс



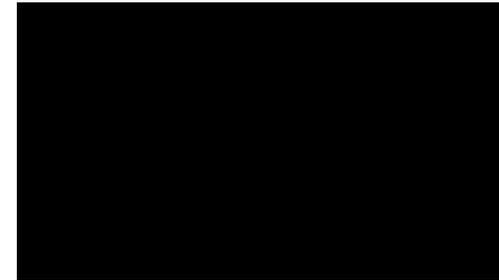
Система питания инжектора на нижнем уровне зала Т-15МД обеспечивает 60 кВ, 10 А.

Параметры инжектора:

Энергия атомов: 60 кВ
Ток пучка ионы/атомы: 6 А / 2 экв. А
Длительность импульса: до 10 сек
(1 сек активная)
Модуляция пучка: от 1:1 до 1:10



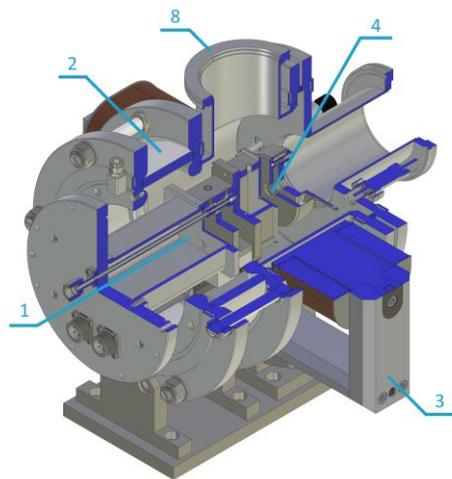
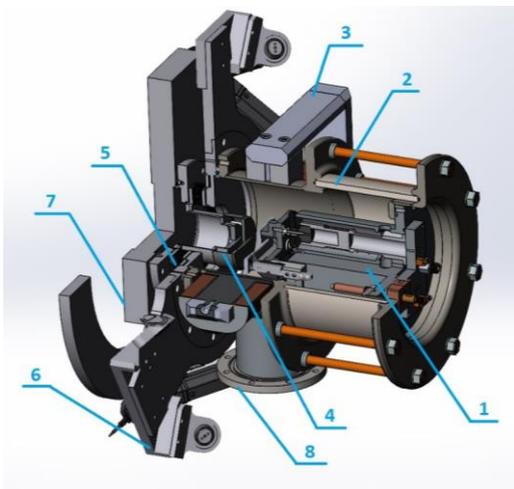
Платформа под инжектор высотой 2.7 м, рассчитанная на нагрузку 2.5 тонны, разработана в ИЯФ СО РАН



Инжектор ДИНА-КИ60 на Т-15МД

8. Ионный источник имплантера ионов TM-200T

Источник на основе пеннинговского разряда с горячим катодом (Bernas)

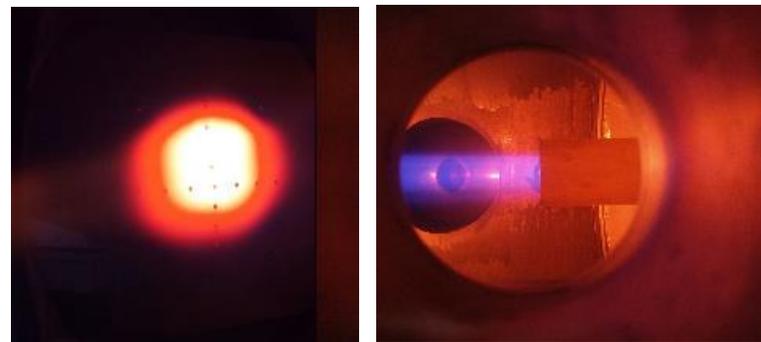


Общий вид ионного источника. Слева: до изменения. Справа: после.

- 1 — источник плазмы; 2 — изоляторный узел; 3 — магнит ионного источника;
4 — узел экстракции; 5 — сильфонный узел; 6 — механическая регулировка;
7 — шибер источника ионов; 8 — фланец для вакуумной откачки.

Изменения в конструкции источника ионов:

- Наборная плазменная камера вместо цельноточеной
- Стандартные разъемы вместо цельноточеных тоководов
- Измененная конструкция сбора ИОС
- Измененное крепление пластины с эмиссионным отверстием
- Распределённая подача газа
- Введение охлаждения фланцев изоляторного узла



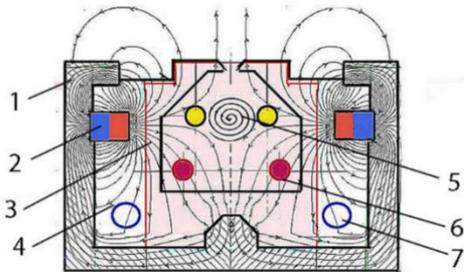
Слева: свечение молибденового экрана при попадании на него пучка. Расстояние между датчиками по вертикали 20 мм, по горизонтали – 30 мм. **Справа:** вид на пучок сбоку.

Достигнутые параметры пучка:

- Ускоряющее напряжение 50 кВ
- Ток пучка до 80 мА (аргон)
- Угловая расходимость 15x23 мрад
- Длительность режима без пробоев до 10 минут
- Беспереывный режим работы ~4 ч.

Параметры ионного источника:

- Энергия пучка 10 кэВ
- Полный ионный ток ~ 50 мА
- плотность тока вдоль ширины пучка ~ 10 мА/см
- Рабочий газ - аргон



Поперечное сечение касповой ячейки: 1 – магнитное ярмо, 2 – постоянные магниты, 3 – керамический держатель катодов, 4 – газоразрядная камера, 5 – катод, 6 – анодные стержни, 7 – отверстия для водяного охлаждения.

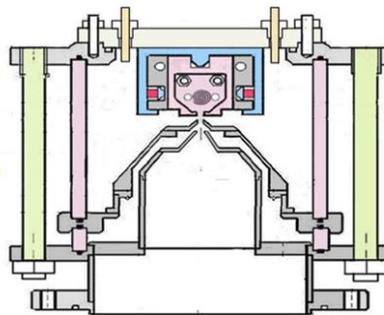
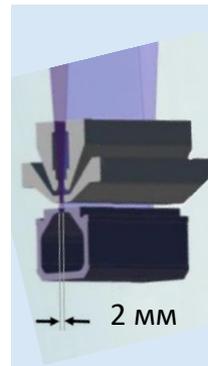
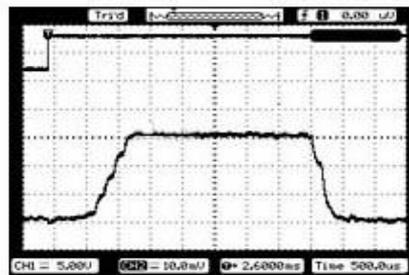


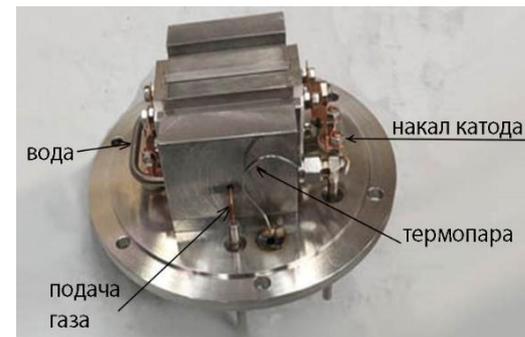
Схема ионного источника с триодной ионно-оптической системой



Ионный источник на стенде в к.1-237



Распределение плотности ионного тока по ширине ленточного пучка с помощью координатной линейки с 32 ламелями.

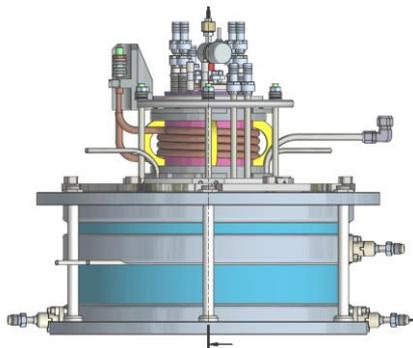
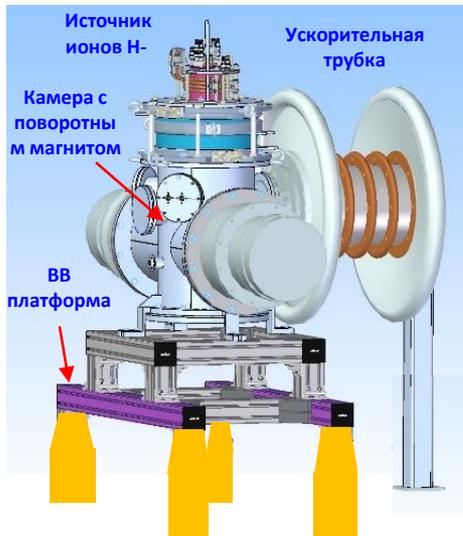


Касповый источник плазмы

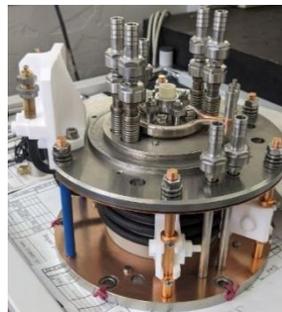
10. Высокочастотный источник ионов Н⁻ для тандемного ускорителя

Параметры ионного источника:

- Ток ионного пучка – до 15 мА
- ВЧ мощность – до 30 кВт
- Энергия пучка 30 кэВ
- Вытягивающее напряжение – до 8 кВ
- Ускоряющее напряжение – до 36 кВ
- Рабочее давление– 0.3-2 Па



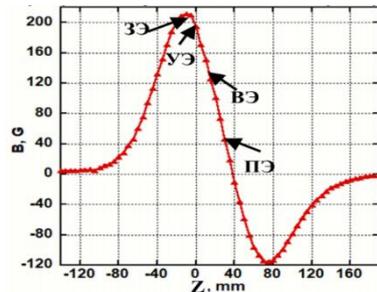
ВЧ источник ионов Н- готов, изоляторы ИОС заказаны



ВЧ драйвер готов и испытан



Электроды ИОС готовы



Магнитное поле вдоль оси источника совпадает с расчетным



30 кВт ВЧ генератор TRIADA установлен на стенд

- Испытан ВЧ разряд мощностью 20 кВт, длительностью 30 сек
- Вытягивание пучка в водородном и водородно-цезиевом режимах запланировано на 2026 г

Инжекторы и ионные источники на основе положительных ионов

- Запуск инжектора с энергией пучка 100 кэВ
- Разработка ТП диагностического инжектора для токамака ТРТ

Инжекторы и ионные источники на основе отрицательных ионов

- Разработка ТП нагревного инжектора для токамака ТРТ
- Испытание новой ускорительной трубки и плазменного нейтрализатора на стенде высокоэнергетического инжектора
- Получение требуемых параметров 9 А ионного источника
- Исследования по D^- источнику (с ограничениями из-за активации оборудования)
- Сборка и запуск ВЧ источника отрицательных ионов (~10-15 мА)
- Создание стационарно-работающего макета фотонного нейтрализатора

Продолжение работ по ионным источникам для ускорителей/имплантеров

Инжекторы и ионные источники на основе положительных ионов

- Запуск инжектора с энергией пучка 100 кэВ
- Разработка ТП диагностического инжектора для токамака ТРТ

Инжекторы и ионные источники на основе отрицательных ионов

- Разработка ТП нагревного инжектора для токамака ТРТ
- Испытание новой ускорительной трубки и плазменного нейтрализатора на стенде высокоэнергетического инжектора
- Получение требуемых параметров 9 А ионного источника
- Исследования по D^- источнику (с ограничениями из-за активации оборудования)
- Сборка и запуск ВЧ источника отрицательных ионов (~10-15 мА)
- Создание стационарно-работающего макета фотонного нейтрализатора

Продолжение работ по ионным источникам для ускорителей/имплантеров

Спасибо за внимание!