

Атомарные инжекторы и ионные источники

Шиховцев И.В.

Лаб.9-0, Сек.9-21, НКО, ЭП, ПО, ОГЭ,

Научная сессия ИЯФ СО РАН
1 февраля 2024



ПРИМЕНЕНИЕ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ И АТОМАРНЫХ ИНЖЕКТОРОВ

Для плазменных установок:

- ❑ Поддержание тока в плазме
- ❑ Нагрев плазмы
- ❑ Стабилизация неустойчивостей
- ❑ Диагностика плазмы

Основные характеристики нагревных инжекторов:

- ❑ Пучки низкой энергии (до ~120 кэВ): изменяемая энергия частиц: полная мощность более 20 МВт, длительность: 5 мс - 100 сек
- ❑ Пучки высокой энергии (0.5 – 1 МэВ): полная мощность до 30 МВт, длительность до 3600 сек

Другие применения:

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

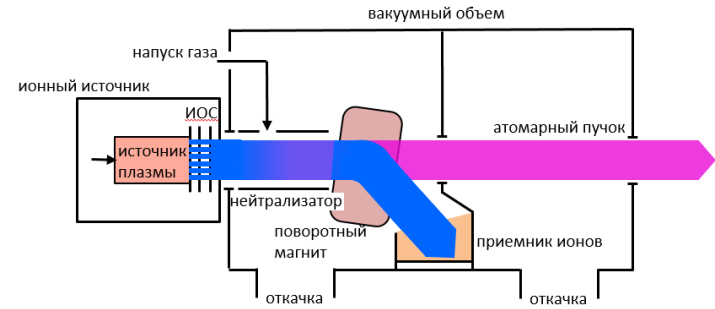
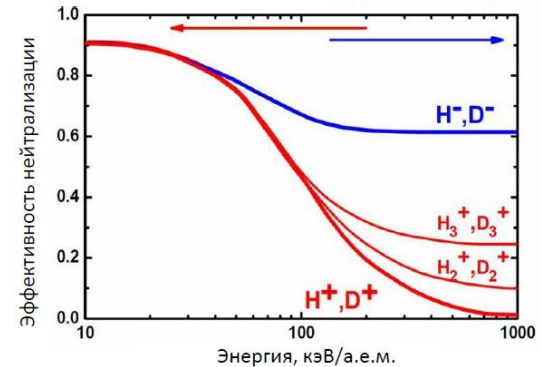


Схема инжектора на положительных ионах с газовым нейтрализатором

Инжекторы **на положительных ионах**
отрицательных ионах



СОДЕРЖАНИЕ ДОКЛАДА

Работы по атомарным инжекторам, выполняемые в рамках ФП-3 «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий»:

- Мероприятие 1.1.4 «Разработка и испытание мощных систем инжекции атомарных пучков для нагрева плазмы и поддержания тока, в том числе стационарных»
 - Инжектор с энергией 15 кэВ, ионным током 150 А, атомарным пучком 1,7 МВт (водород)
 - Ионный источник с энергией 100 кэВ, ионным током 75 А, атомарным пучком 3,5 МВт (дейтерий)
 - Проект 500 кэВ инжектора на основе отрицательных ионов
- Мероприятие 3.4 «Создание источников атомарных и ионных пучков нового поколения»
 - Ионные источники 120 кэВ, 1.5 А и 9 А на основе отрицательных ионов водорода

Контрактные работы:

- Диагностический инжектор для токамака Т15-МД
- ИОС для ионного источника нагревного инжектора токамака Глобус-М2
- ЭЦР ионный источник для ускорителя ЭГ-5

ВЧ источник отрицательных ионов для тандемного ускорителя

АТОМАРНЫЙ ИНЖЕКТОР:

- энергия и ток ионного пучка 15 кэВ / 150 А
- мощность атомарного пучка 1,7 МВт
- длительность 30 мс



Ионный источник:

- 4 дуговых генератора плазмы
- 3-х электродная щелевая ИОС
- Начальный диаметр пучка 350 мм
- Геометрическая фокусировка – 3.5 м



Питание 2-х дуговых генераторов плазмы

Система питания и управления на длительность 0,3 с



- 1) Система управления и вспомогательного питания
- 2) и 3) Питание 4-х дуговых генераторов плазмы: 700 А, 150 В x 4
- 4) 5) 6) Высокочувствительное питание

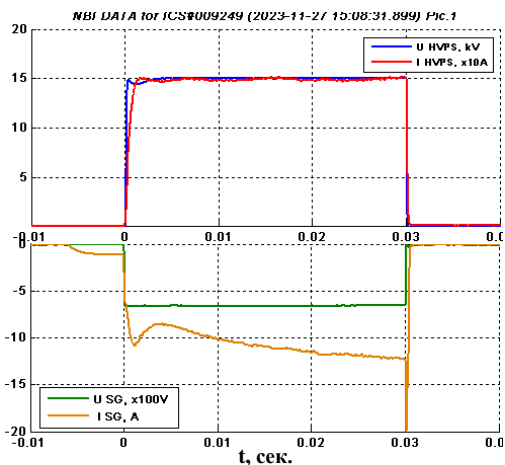
АТОМАРНЫЙ ИНЖЕКТОР:

получены требуемые параметры пучка, работа принята на НТС Росатома

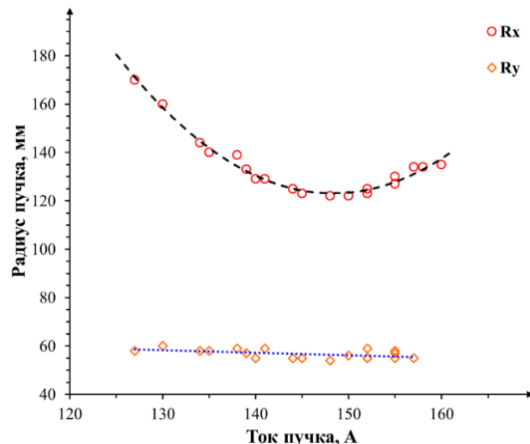
Параметры

- Энергия: **15 кэВ**;
- Ток ионного пучка: **150А** ($P_i \approx 2,25$ МВт);
- Эквивалентный ток атомарного пучка: **113А** ($P_N = 1,7$ МВт);
- Длительность импульса: **30 мс**;
- Минимальный угловая расходимость пучка (вдоль и поперек щелей ИОС): **25x10 мрад**.
- Массовый состав пучка водорода: ($E=15$ кВ : $E/2$: $E/3$) **87% : 10% : 3%**.
- Стабилизация, спад ускоряющего напряжения при мощности пучка 2 МВт: < 2%.

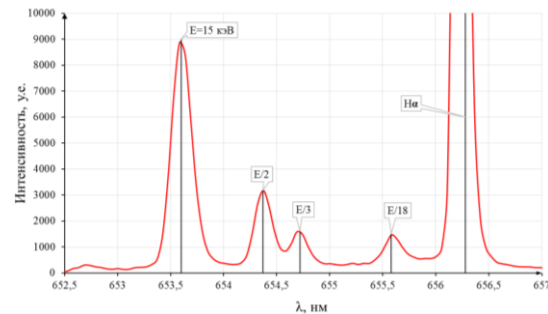
Осциллограммы напряжения и тока:



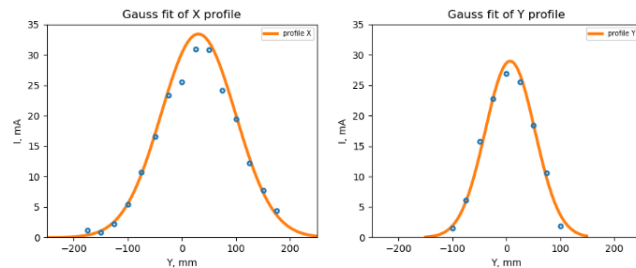
Зависимость полуширины пучка (1/e) от тока ионного пучка



Спектр пучка H⁰:

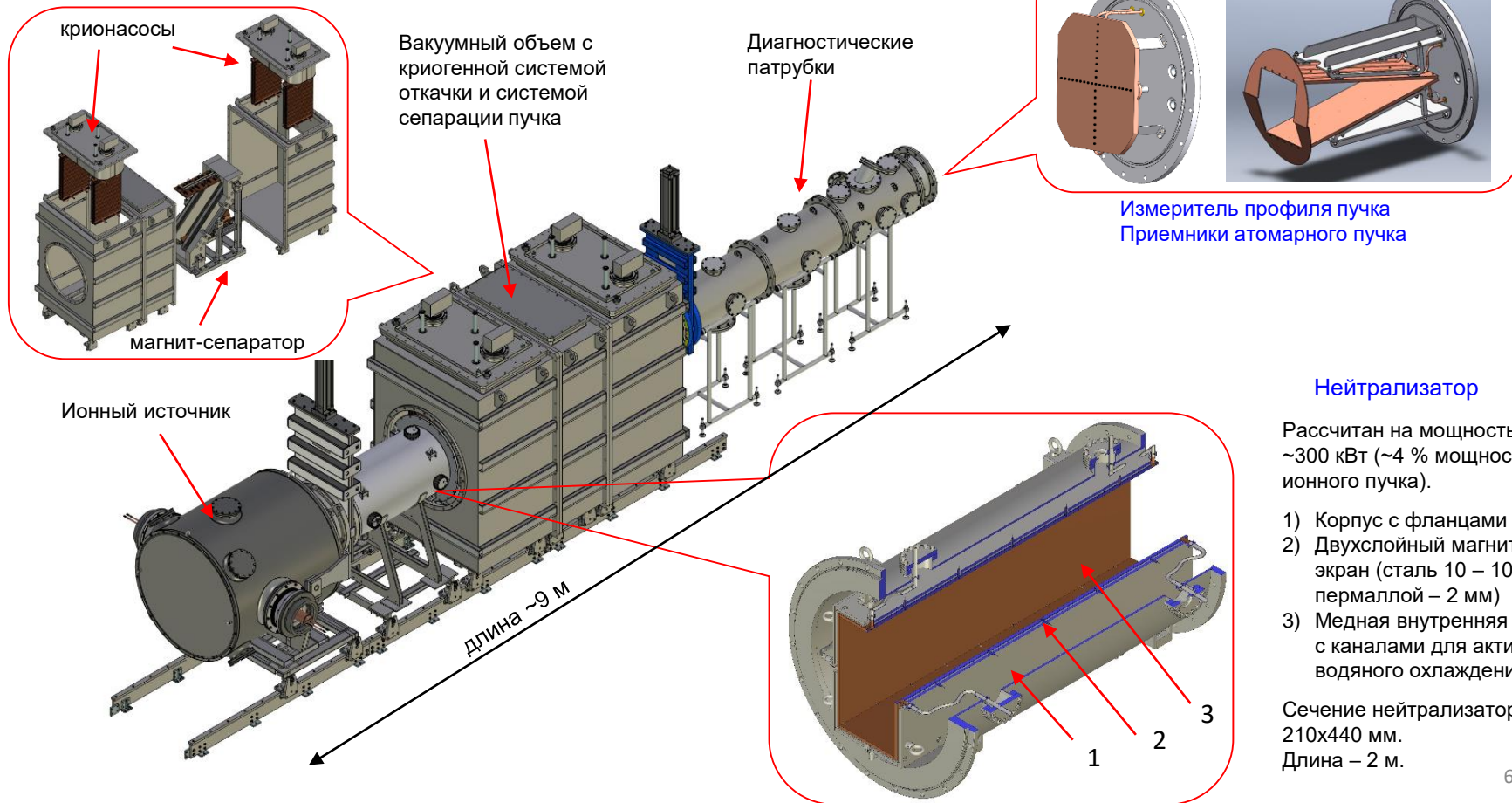


Профиль пучка по горизонтальной (X) и вертикальной (Y) осям на выходе из инжектора (2100 мм от ИОС):



Ширина профиля на уровне 1/e:
216 мм по X и 144 мм по Y

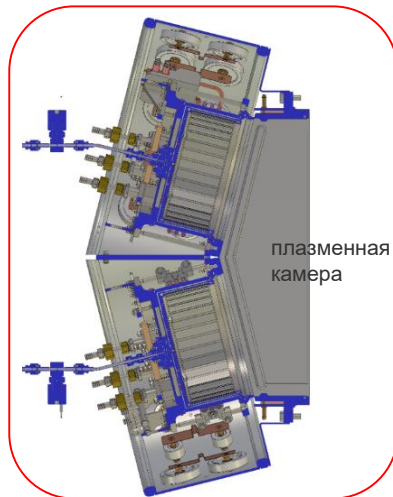
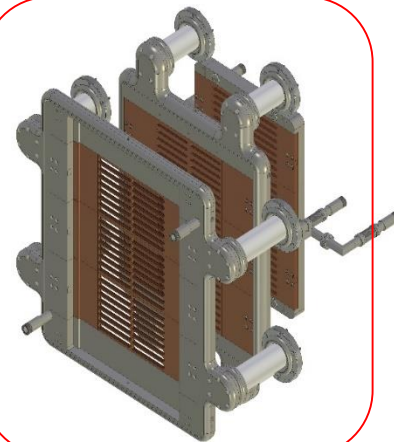
АТОМАРНЫЙ ИНЖЕКТОР С ЭНЕРГИЕЙ ПУЧКА 100 кэВ И МОЩНОСТЬЮ 3,5 МВт (дейтерий): спроектирован, изготовление в ООО НПО «ГКМП» Брянск и ЭП ИЯФ.



ИОННЫЙ ИСТОЧНИК 100 кэВ, 75А

1. Ионно-оптическая система:
 - трех-электродная
 - плотность тока - 190 мА/см²
 - начальным размер пучка - 214x434 мм²
2. Два ВЧ драйвера, 2-4 МГц, 70 кВт

Электроды ИОС



плазменная камера

внешний экран

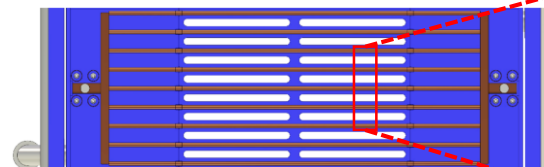
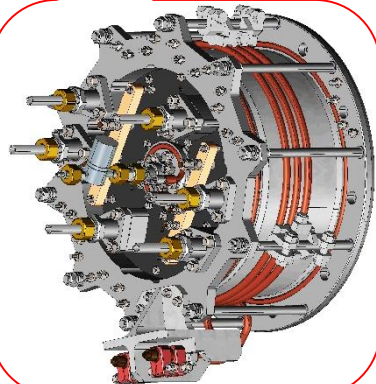
начало нейтрализатора

100 кВ изолятор

ВЧ фидеры

ВЧ источник плазмы (2 шт.)

- Апертура ВЧ драйвера 234 мм
- Трех витковая ВЧ антенна
- Активное водяное охлаждение внутреннего экрана



Сегмент ИОС

Технологии изготовления каналов охлаждения сеток ИОС

- 1) Сверление длинных отверстий в пластине с последующей фрезеровкой эмиссионных щелей (ИЯФ).
- 2) 3-D печать сегментов сеток (ВИАМ-НИЦ «КИ» **методом SLM** тестового образца из бронзы БрХ0,8).

ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ

Параметры:

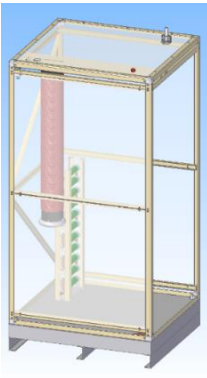
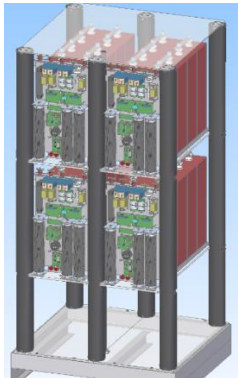
- Выходное напряжение: 10-100 кВ.
- Выходной ток: до 100 А.
- Выходная мощность: 10 МВт.
- Максимальная длительность импульса: 0,15 с.
- Накопители энергии: K75-100 15000 мкФ 1600 В

Стойка с конденсаторами и преобразователями 16 шт.

Шкаф с выходным фильтром

Снаббер и измерители

Стойка управления ВВ источником



Источник питания отклоняющего магнита

Параметры:

Выходной ток 650 А;
Выходное напряжение 40 В



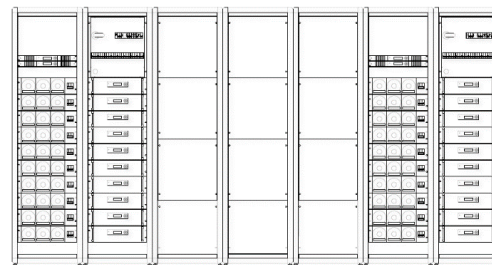
Источник питания запирающей сетки

Параметры:

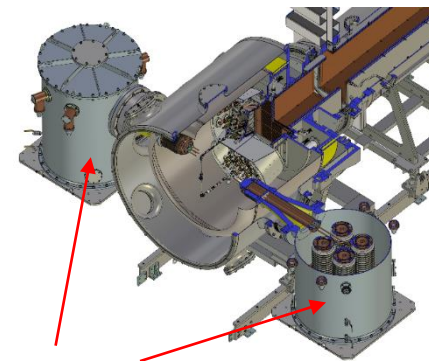
Выходное напряжение до -2,7 кВ;
Средний выходной ток 10 А



ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ



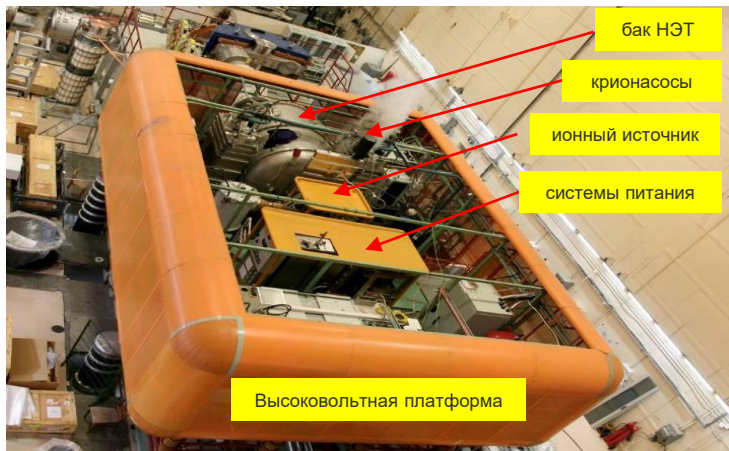
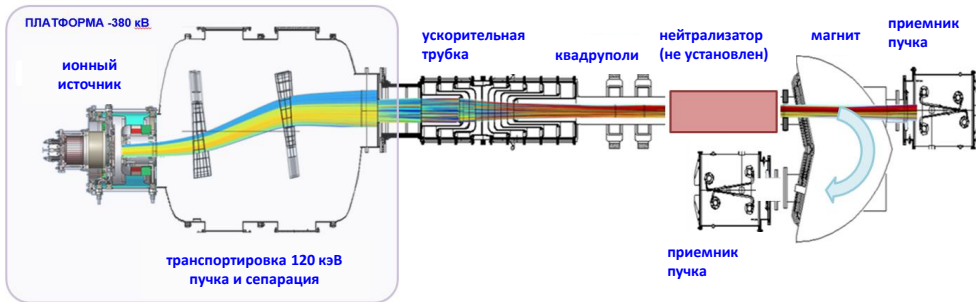
Два ВЧ генератора (НПП Триада-ТВ) мощностью 100 кВт, частота 2 – 4 МГц.



Два ВЧ трансформатора разделительных (в ЭП ИЯФ)

СИЛЬНОТОЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА

Ускорительный стенд инжектора на основе отрицательных ионов



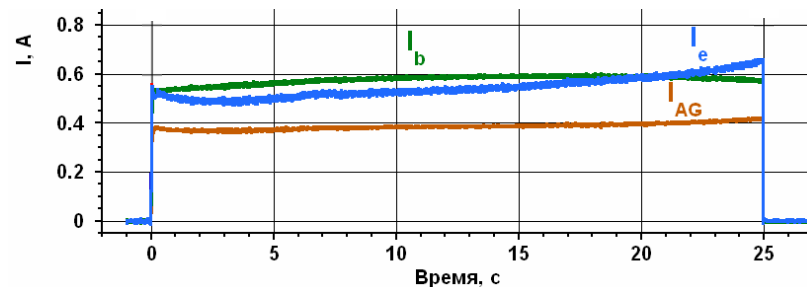
Здание 20В, зал А

Ведутся работы по модернизации 400 кВ выпрямителя ускорительной трубки

1,5 А источник ионов H⁻ на платформе ускорительного стенда

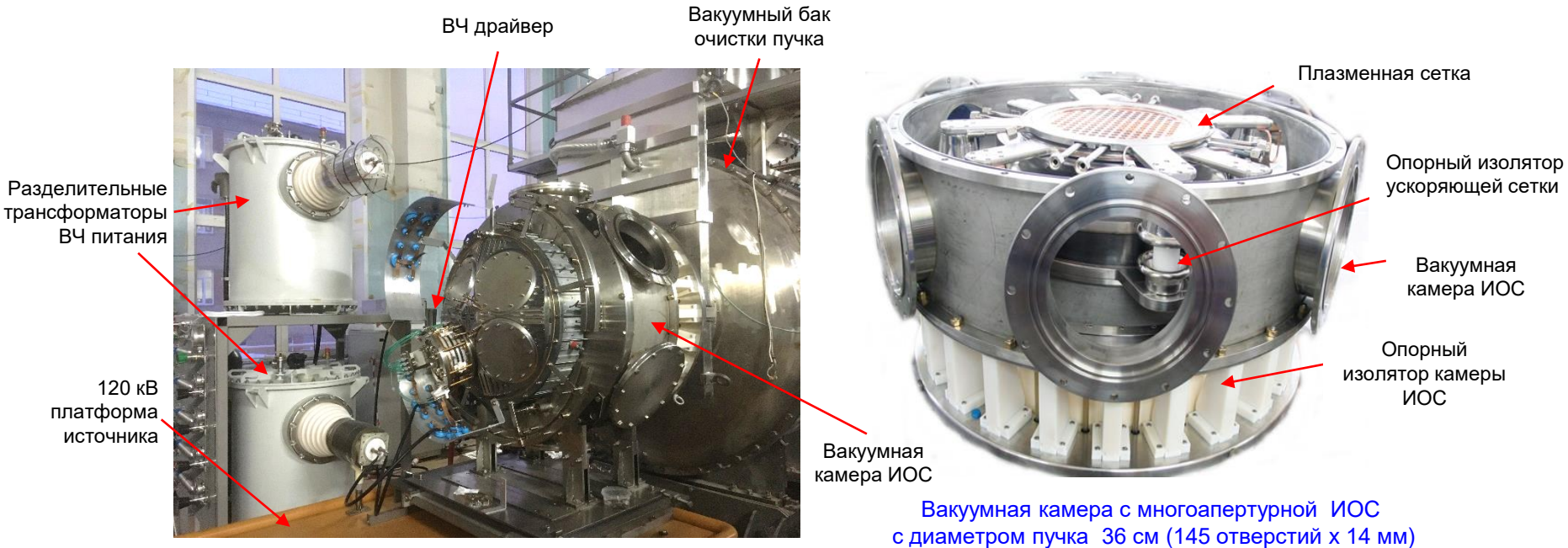


- Мощность ВЧ плазмы увеличена до 65 кВт
- Получен ток ионов H⁻ током до 1.2 А.
- Энергия пучка из источника 110 кэВ
- После очистки пучок H⁻ с током 0,35 А ускорен до 340 кэВ и проведен на 10 м от источника
- Ведутся работы по увеличению тока пучка до проектных 1.5 А и длительности 30 с



Осциллограммы 25 сек импульса тока пучка H⁻ (I_b) и электронов I_e
Ток пучка стабилен в течение 25 сек импульса, ток электронов слегка вырастает из-за травления цезиевого покрытия

9 А, 120 кэВ ИСТОЧНИК ИОНОВ Н-



- Мощность ВЧ разряда $4 \times 65 = 260$ кВт
- 3-х электродная ИОС с напряжением вытягивания 15 кВ, ускорения 110 кВ

- Ведется сборка и настройка каналов ВЧ питания, ВВ питания -110 кВ для ускорения пучка
- Подводится дополнительная мощность
- Разрабатывается радиационная защита
- В ЭП заказаны компоненты выпрямителя вытягивания пучка: -15 кВ, 20 А

ЗАПУСК ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ИНЖЕКТОРА ДИНА-КИ60 в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт»

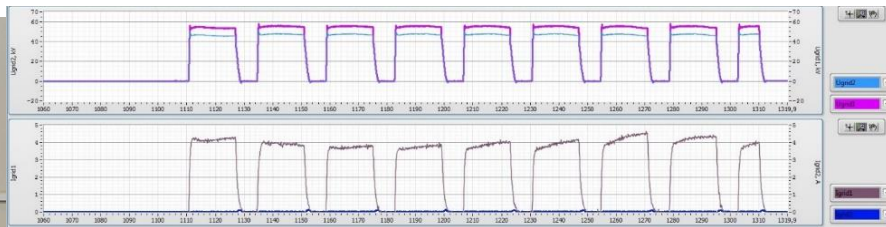
- Инжектор ДИНА-КИ60 запущен в ИЯФ с параметрами: 60 кэВ, 6А, 2 сек с модуляцией 1:1. Отправлен в Курчатовский институт в 2016 г.

- В октябре 2023 г., в связи с активизацией работ на Т-15МД, инжектор и система питания были собраны в зале токамака, протестированы покомпонентно и запущены.

- В планах изготовление заказчиком специальной платформы высотой 2.7 м под инжектор, разработанной в ИЯФ, пристыковка инжектора к Т-15МД, замена заливных криогенных насосов на крио-сорбционные.



Команда ИЯФ около инжектора (токамак Т-15МД на заднем плане)



Сигналы напряжения и тока пучка: 56 кВ, 4.2 А, 200 мс.

Основные параметры инжектора:

Энергия атомов – 60 кэВ

Ток пучка ионы/атомы – 6 А / 2 экв. А

Длительность имп. – до 10 сек (1 сек активная)

Модуляция пучка – от 1:1 до 1:10

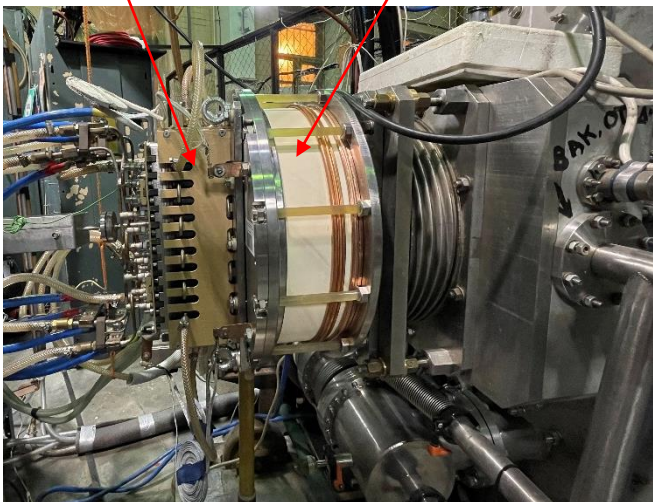


Система питания размещена на нижнем уровне зала

ИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИОННОГО ИСТОЧНИКА ИПМ-1 нагревного инжектора токамака Глобус-М2 (ФТИ им. А.Ф.Иоффе)

Газоразрядная
камера

Ионно-оптическая система



Инжектор на токамаке Глобус-М2

Параметры 3-х электродной ИОС:

Эмиссионный размер: 120 x 250 мм²

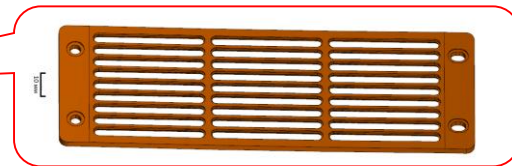
Напряжение: 40 кВ

Ионный ток: до 60 А

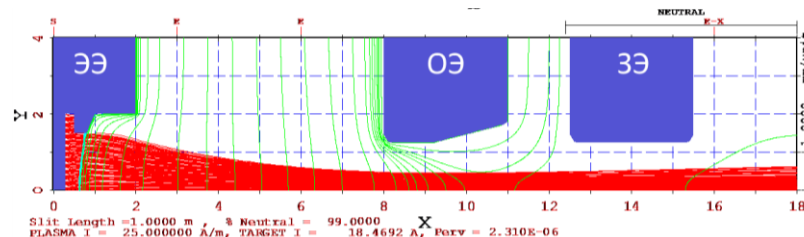
(водород/дейтерий)



Вид на плазменный
(эмиссионный) электрод

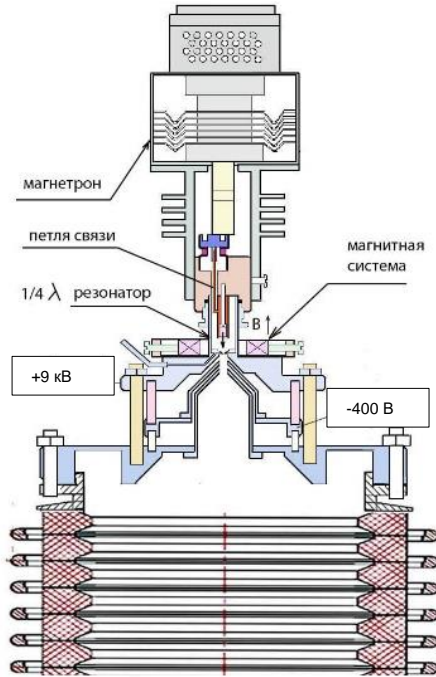


Щелевой сегмент электрода.
Каждый электрод имеет 5 сегментов.

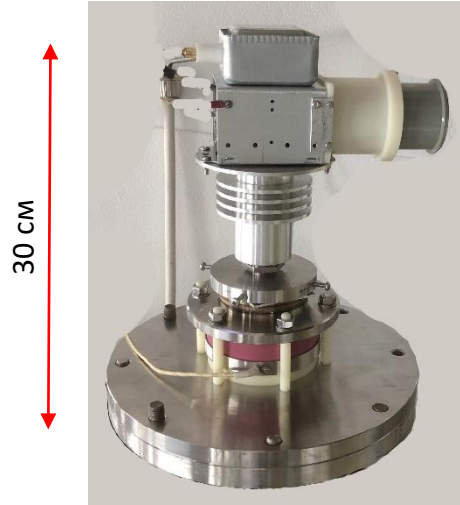


Траектории частиц протонного пучка, ускоренного до энергии 40 кэВ.
Эмиссионный электрод: + 40 кВ, отрицательный: -0.5 кВ, земляной 0 В.

ЭЦР ИОННЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ ЭГ-5 для лаборатории нейтронной физики (ОИЯИ, Дубна)



Ионный источник на ускорительной трубке



Сек.9-21

С.Ю. Таскаев и команда БНЗТ – интеграция с ускорителем, автоматизация под высоким потенциалом, запуск в ОИЯИ

Лаб.9-0

Ионный источник - С.Г. Константинов,
Система ВВ питания - В.В. Колмогоров

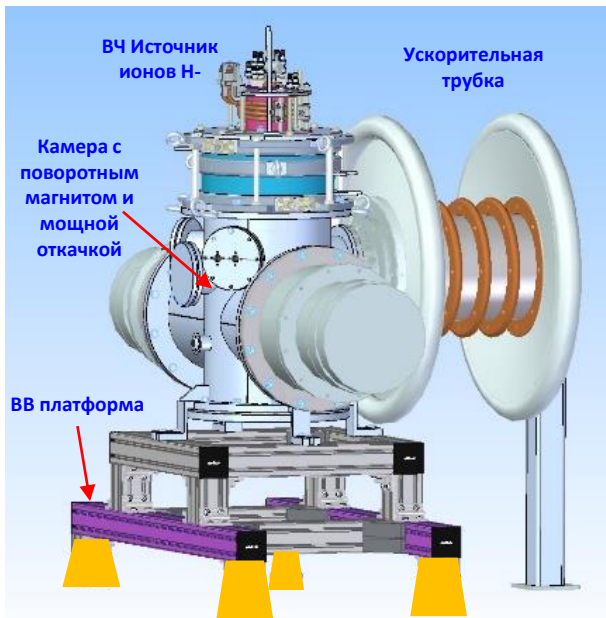
• Параметры ионного источника:

- Энергия ионов – 9 кэВ
- Ионный ток: ~200 мкА (для ускорителя ЭГ-5)
до 3 мА (на стенде в ИЯФ)
- Источник СВЧ – магнетрон 2,45 ГГц
- Мощность ЭЦР разряда: < 50 Вт

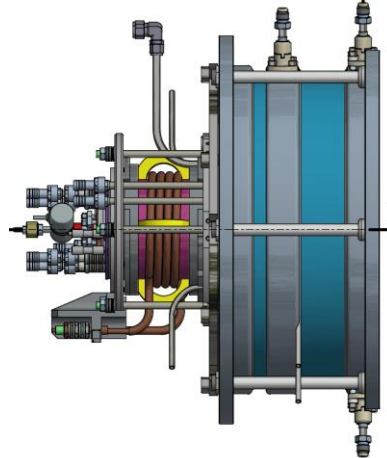
В перспективе – увеличение тока и проектирование прямолинейного протонного ускорителя на основе ЭЛВ.

Стационарный ВЧ источник ионов H^- для тандемного ускорителя

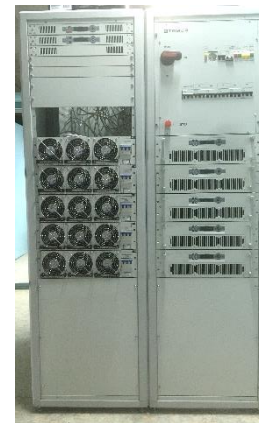
ВЧ источник ионов H^- (30 кэВ, ~10-15 мА)
Отдан в производство



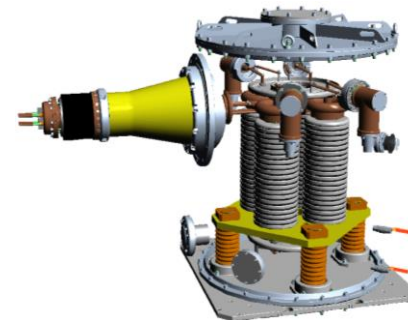
Стенд стационарного ВЧ источника ионов H^- с поворотным магнитом и предускорителем



ВЧ драйвер изготовлен



ВЧ генератор 30 кВ,
поставлен НПП Триада-ТВ,
в процессе запуска в ИЯФ



3D модель разделительного
ВЧ трансформатора (в заказе в ЭП вместе
с трансформаторами для 100 кэВ ИИ)

ПЛАНЫ РАБОТ

Финансирование по прикладным ГЗ продолжается.

Инжекторы и ионные источники на основе положительных ионов

- Изготовление (2024) и запуск (2025) инжектора с энергией пучка 100 кэВ
- В перспективе - диагностический инжектор для токамака TRT (2025 ...)

Диагностический инжектор должен формировать атомарный водородный пучок с энергией 80 кэВ, эквивалентным током 10 А, длительностью 100 с.

Инжекторы и ионные источники на основе отрицательных ионов

- Получение требуемых параметров 1,5 А и 9 А ионных источников (2024-2025)
- Изготовление и испытание ускорительной трубки на ток 9 А и плазменного нейтрализатора на стенде высокоэнергетического инжектора (2024-2025)
- Изготовление и запуск ВЧ источника отрицательных ионов (~10-15 мА)
- Исследования по D⁻ источнику (с ограничениями из-за активации оборудования) (2025-2026)
- Проект нагревного инжектора для токамака TRT

ПЛАНЫ РАБОТ

Финансирование по прикладным ГЗ продолжается.

Инжекторы и ионные источники на основе положительных ионов

- Изготовление (2024) и запуск (2025) инжектора с энергией пучка 100 кэВ
- В перспективе - диагностический инжектор для токамака TRT (2025 ...)

Диагностический инжектор должен формировать атомарный водородный пучок с энергией 80 кэВ, эквивалентным током 10 А, длительностью 100 с.

Инжекторы и ионные источники на основе отрицательных ионов

- Получение требуемых параметров 1,5 А и 9 А ионных источников (2024-2025)
- Изготовление и испытание ускорительной трубки на ток 9 А и плазменного нейтрализатора на стенде высокоэнергетического инжектора (2024-2025)
- Изготовление и запуск ВЧ источника отрицательных ионов (~10-15 мА)
- Исследования по D⁻ источнику (с ограничениями из-за активации оборудования) (2025-2026)
- Проект нагревного инжектора для токамака TRT

Спасибо за внимание!