

Развитие атомарных инжекторов в ИЯФ

Шиховцев И.В.

Научная сессия ИЯФ СО РАН
3 марта 2023



ПРИМЕНЕНИЕ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ И АТОМАРНЫХ ИНЖЕКТОРОВ

Для плазменных установок

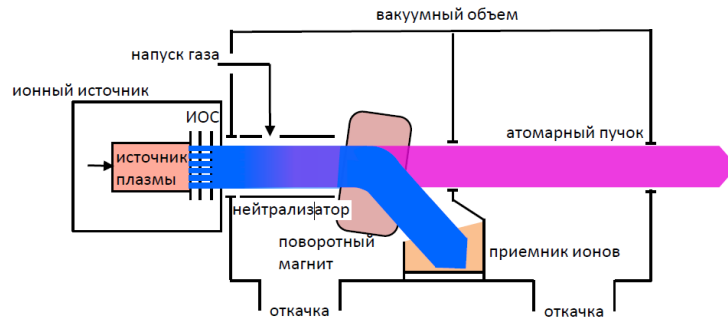
- ❑ Поддержание тока в плазме
- ❑ Нагрев плазмы, увеличение скорости реакции
- ❑ Стабилизация неустойчивостей
- ❑ Диагностика плазмы

Основные характеристики нагревных инжекторов:

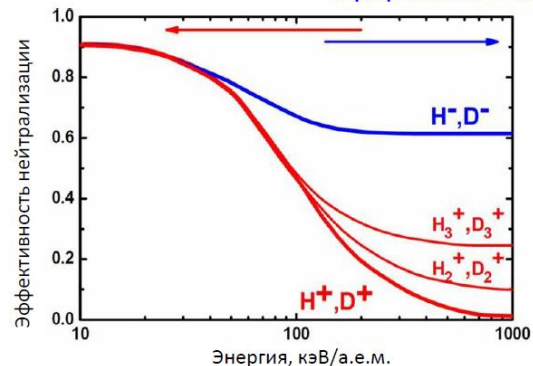
- ❑ Пучки низкой энергии (до 120кэВ): изменяемая энергия частиц: полная мощность более 20 МВт, длительность: 5 мс - 100 сек
- ❑ Пучки высокой энергии (0.5 - 1МэВ): полная мощность до 30МВт, длительность до 3600 сек

Другие применения

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



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» в ИЯФ СО РАН, Новосибирск

Мероприятие 1.1.4 «РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ МОЩНЫХ СИСТЕМ ИНЖЕКЦИИ АТОМАРНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ПОДДЕРЖАНИЯ ТОКА, В ТОМ ЧИСЛЕ СТАЦИОНАРНЫХ»

(2021 - 2024) (базовое финансирование)

(2022 - 2024) (дополнительное финансирование)

Мероприятие 3.4

«СОЗДАНИЕ ИСТОЧНИКОВ АТОМАРНЫХ И ИОННЫХ ПУЧКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ»

(2021 – 2024)

Источник отрицательных ионов для тандемного ускорителя БНЗТ

Мероприятие 1.1.4

«РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ МОЩНЫХ СИСТЕМ ИНЖЕКЦИИ АТОМАРНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ПОДДЕРЖАНИЯ ТОКА, В ТОМ ЧИСЛЕ СТАЦИОНАРНЫХ»

Результаты 2022 года

- Создан стенд атомарного инжектора
 - ✓ Энергия пучка 15 кэВ
 - ✓ Ток ионного пучка 150 А
 - ✓ Мощность атомарного пучка 1,7 МВт
 - ✓ Длительность 30 мс

На стенде производится запуск систем питания на эквивалентные нагрузки, ведутся эксперименты по запуску инжектора и формированию ионного пучка.

- Модернизированы дуговые генераторы плазмы для этого инжектора. Найдена специальная геометрия прикатодного узла, эффективно подавляющая концентрацию катодных пятен. В приосевой области катодного узла для прикатодного электрода вместо молибдена или вольфрама использована графитовая вставка.

Модернизация генераторов плазмы резко снизила эрозию в дуговом канале и повысила их ресурс, что позволило довести длительность рабочего импульса с 30 мс до 0,5 сек с сохранением ресурса работы.



Инжектор на испытательном стенде.

Мероприятие 1.1.4

«РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ МОЩНЫХ СИСТЕМ ИНЖЕКЦИИ АТОМАРНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ПОДДЕРЖАНИЯ ТОКА, В ТОМ ЧИСЛЕ СТАЦИОНАРНЫХ»

Высоковольтный источник питания и питание дуговых генераторов плазмы.

Основные параметры ВВ источника:

- Выходное напряжение: $5 \div 15 \text{ кВ}$
- Выходной ток: 150 А
- Импульсная выходная мощность: $2,25 \text{ МВт}$.
- Длительность импульса при макс. мощности: $0,3 \text{ с}$.
- Средняя потребляемая от сети мощность: 3 кВт .



Высоковольтный источник питания на стенде.

Основные параметры питания дуговых генераторов плазмы (4 канала):

- Выходной ток до 700 А
- Выходное напряжение $120\text{-}150 \text{ В}$
- Пульсации выходного тока не более $\pm 5\text{-}10\%$;
- Длительность $0,3 \text{ с}$.



Четырехканальное дуговое питание в сборе: в каждом шкафу размещено питание двух дуговых генераторов плазмы.

Мероприятие 1.1.4 (дополнительное финансирование)

«РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ МОЩНЫХ СИСТЕМ ИНJEKЦИИ АТОМАРНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ПОДДЕРЖАНИЯ ТОКА, В ТОМ ЧИСЛЕ СТАЦИОНАРНЫХ»

2022 – 2024: Разработка, изготовление и тестирование ключевых компонентов системы атомарной инжекции с мощностью пучка 3,5 МВт и энергией 100 кэВ (дейтерий).

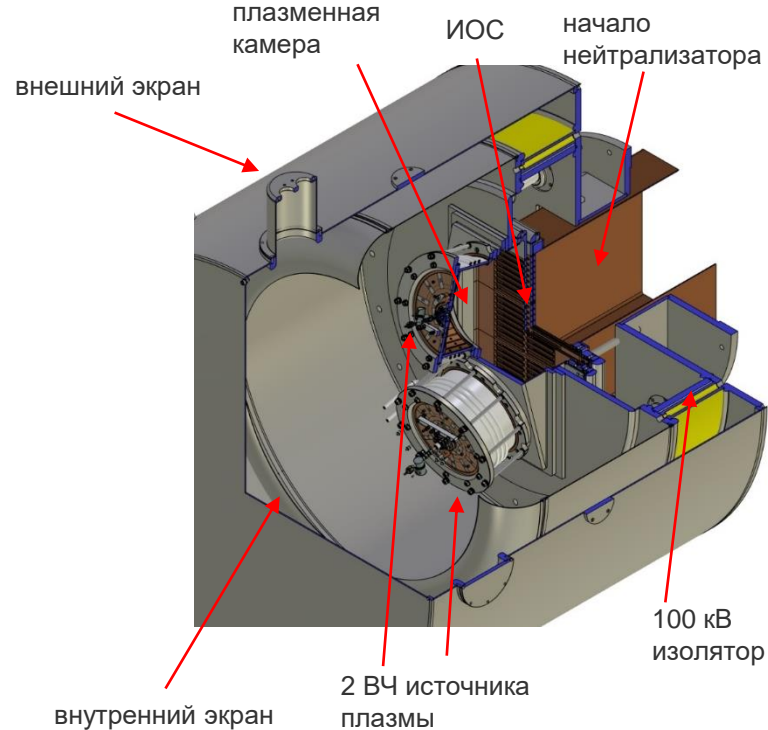
1. Ионно-оптическая система:

- трех-электродная
- ток ионного пучка 75 А
- плотность тока - 190 мА/см²
- начальным размер пучка - 214x434 мм²

2. Два источника плазмы и две высокочастотной системы питания (2x72 кВт).

3. Высоковольтная системы питания (на накопителях, длительностью 0,15 с), вспомогательные источники питания и система управления.

4. Нейтрализатор длиной 2 м, прямоугольный в сечении, водоохлаждаемый.

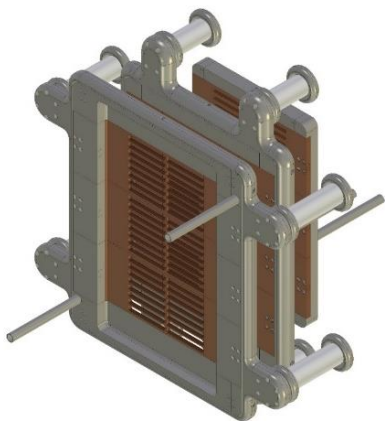


Мероприятие 1.1.4 (дополнительное финансирование)

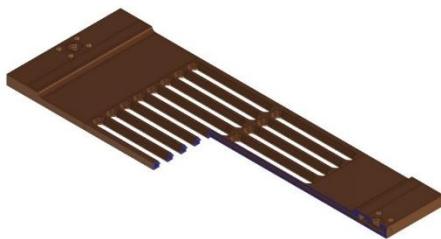
«РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ МОЩНЫХ СИСТЕМ ИНЖЕКЦИИ АТОМАРНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ПОДДЕРЖАНИЯ ТОКА, В ТОМ ЧИСЛЕ СТАЦИОНАРНЫХ»

Электроды ионно-оптической системы с активным охлаждением для ионного источника с мощностью 3,5 МВт и энергией 100 кэВ: технология изготовления

Ионно-оптическая система



Глубокое сверления каналов охлаждения

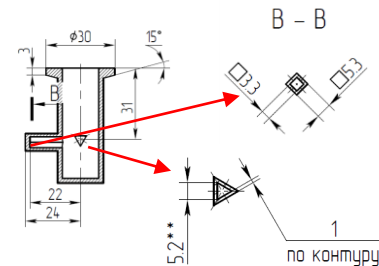
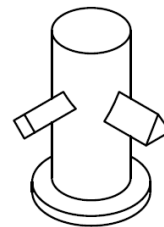


Модель сегмента первой сетки ИОС:
ширина щели 8.0 мм, каналы охлаждения 4 мм.



- Пластина из хромциркониевой бронзы:
222 x 105 x 12 мм
- Сверление $\varnothing 3.5$, 4.0 и 4.5 мм с двух сторон
- $\varnothing 4.0$ мм уход оси канала на 0,12 мм в месте встречи (допустимо)
- $\varnothing 3.5$ мм уход оси достигал 0,55 мм

Отработка технологии селективного лазерного сплавления бронзы марки БрХ08:
НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ

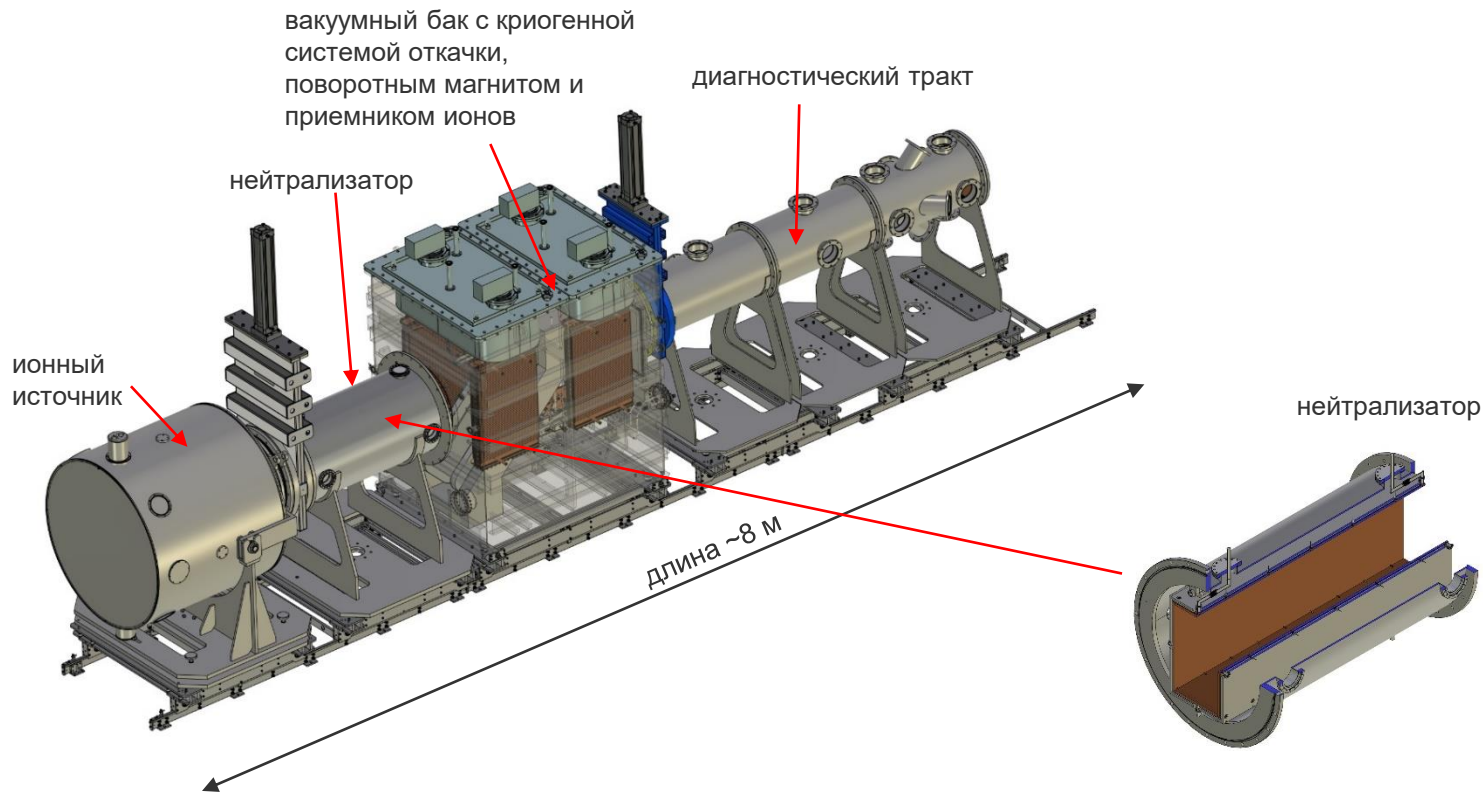


Изготовленные образцы



Мероприятие 1.1.4 (дополнительное финансирование) «РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ МОЩНЫХ СИСТЕМ ИНJEKЦИИ АТОМАРНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ПОДДЕРЖАНИЯ ТОКА, В ТОМ ЧИСЛЕ СТАЦИОНАРНЫХ»

3-D модель испытательного стенда источника 100 кэВ, 75 А, 150 мс

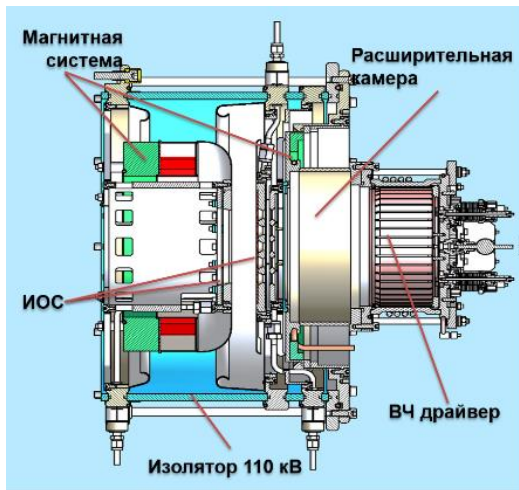


Мероприятие 3.4

«СОЗДАНИЕ ИСТОЧНИКОВ АТОМАРНЫХ И ИОННЫХ ПУЧКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ»

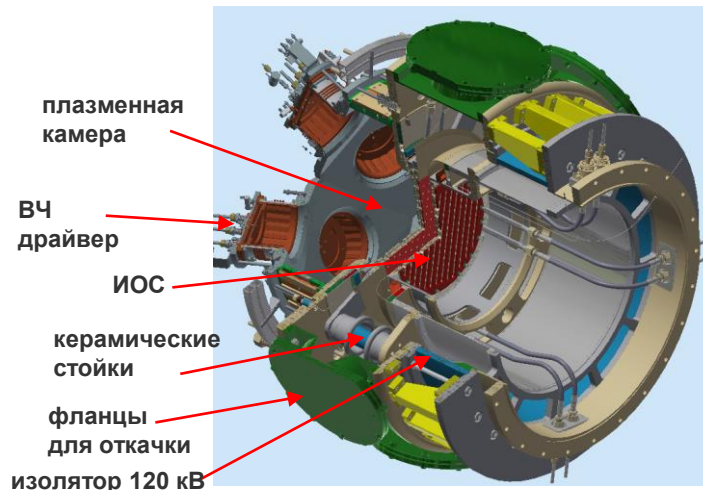
Цель работы (2024г) - создание двух ионных источников на основе отрицательных ионов водорода с током пучка 1,5 А и 9 А и энергией 120 кэВ для инжекторов мегаэлектронвольтового диапазона энергии.

Источник с током 1,5 А



- Источник плазмы - ВЧ драйвер 4 МГц, мощность до 65 кВт
- ИОС трех-электродная, многоапертурная, 25 отверстий диаметром 14 мм
- Начальный размер пучка – 122 мм x 122 мм
- Плотность тока ~30 мА/см²
- Магнитный фильтр на постоянных магнитах

Источник с током 9 А



- Источник плазмы – четыре ВЧ драйвера 4 МГц, мощность до 65 кВт
- 3-х электродная ИОС, многоапертурная 145 отверстий диаметром 14 мм
- Начальный размер пучка – 350 мм
- Плотность тока ~30 мА/см²
- Магнитный фильтр на постоянных магнитах

Мероприятие 3.4

«СОЗДАНИЕ ИСТОЧНИКОВ АТОМАРНЫХ И ИОННЫХ ПУЧКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ»

Работы по созданию 1,5 А источника отрицательных ионов с повышенной длительностью рабочего импульса и сфокусированным пучком:

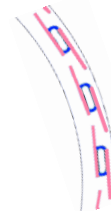
- Для работы в импульсах длительностью 20-100 с установлен и испытан ВЧ драйвер плазмы с охлаждаемым защитным экраном. Проведено исследование ВЧ драйверов с несколькими экранами различной конструкции
- Проведено 1,5-кратное усиление систем питания источника. Модифицирован ламповый ВЧ генератор драйвера с увеличением мощности до 65 кВт. Усилены системы питания вытягивающего и ускоряющего электродов источника.
- Изготовлен и проведены испытания источника со сферически-вогнутым зазором ускорения, обеспечивающего геометрическую фокусировку пучка с уменьшением его углового разброса и снижения поперечных размеров пучка при транспортировке.
- Получен пучок с током 1,2 А и энергией 120 кэВ (проектные параметры 1,5 А, 120 кэВ). Размер пучка на полувысоте уменьшен с 190 мм до 90 мм на расстоянии 3,5 м от ионного источника. Это позволит существенно увеличить прохождение пучка при ускорении до 500 кэВ.



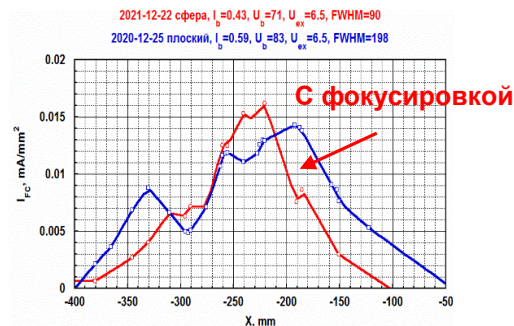
Сварной/паяный экран



Экран по технологии диффузионной сварки



Сечение Z – образного экрана с пайкой жалюзей



Профили плотности тока пучка отрицательных ионов проведенного на расстояние 3,5 м от источника.

Синим - плоский вытягивающий электрод,
красным - сферически-вогнутый электрод.

Мероприятие 3.4

«СОЗДАНИЕ ИСТОЧНИКОВ АТОМАРНЫХ И ИОННЫХ ПУЧКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ»

Работы по созданию 9 А источника отрицательных ионов

- Сооружен двухуровневый стенд для испытаний 9 А источника
- Изготовлены и установлены основные магнито-вакуумные элементы стенда: вакуумный бак и поворотные магниты.
- Расширительная камера и ионно-оптическая система установлены на вакуумный объем. Произведены испытания на вакуум.
- Ведется монтаж криогенного насоса с производительностью 1 млн л/с.
- Ведётся сборка 4-х каналов ВЧ питания драйверов источника.



Ионно-оптическая система 9 А источника



Расширительная камера и ионно-оптическая система установлены на вакуумный объем стенда в зале 20Г-101

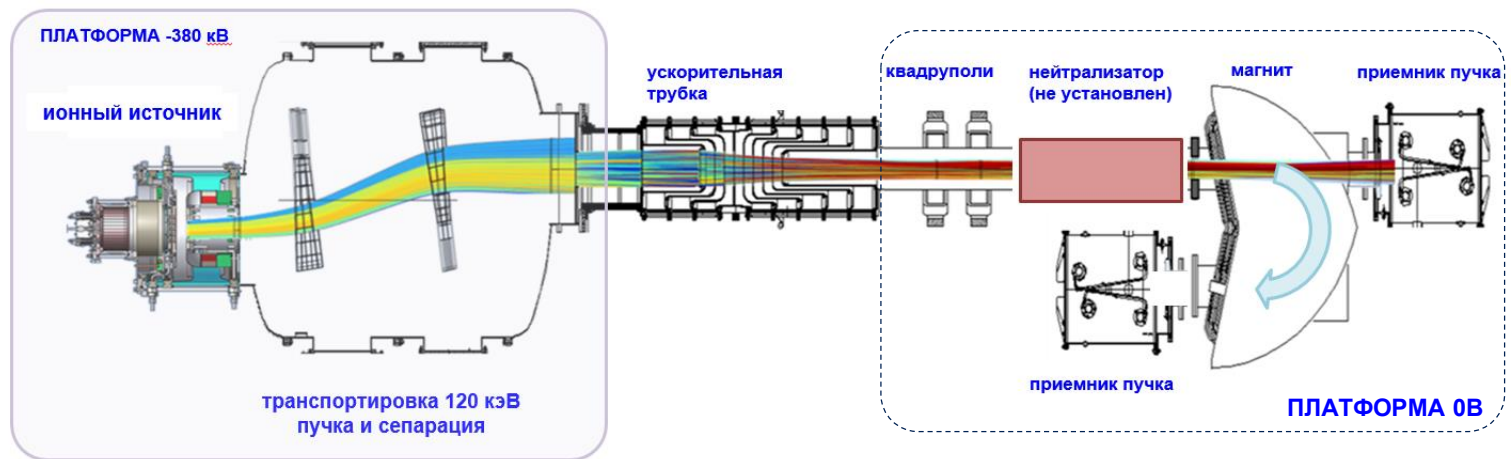
Мероприятие 1.1.4 (базовое финансирование)

«РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ МОЩНЫХ СИСТЕМ ИНЖЕКЦИИ АТОМАРНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ПОДДЕРЖАНИЯ ТОКА, В ТОМ ЧИСЛЕ СТАЦИОНАРНЫХ»

Вторая часть (2021-2024): разработка эскизного проекта прототипа атомарного инжектора непрерывного действия на отрицательных ионах водорода с энергией 500 кэВ, изготовление и испытание ключевых элементов прототипа.

2023-2024 – Изготовление и испытание ускорительной трубки и нейтрализатора ионного пучка

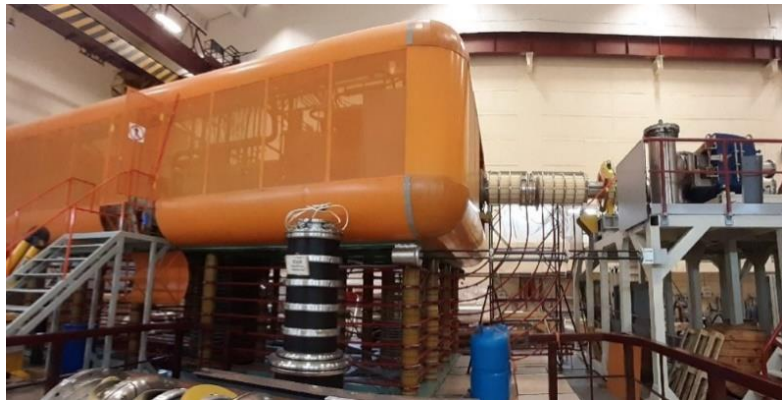
Ускорительный стенд высоковольтного инжектора в ИЯФ



Мероприятие 1.1.4 (базовое финансирование)

«РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ МОЩНЫХ СИСТЕМ ИНЖЕКЦИИ АТОМАРНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ПОДДЕРЖАНИЯ ТОКА, В ТОМ ЧИСЛЕ СТАЦИОНАРНЫХ»

Ускорительный стенд высоковольтного инжектора в ИЯФ



1,5 А ионный источник и вакуумный бак НЭТ
на высоковольтной платформе инжектора

ВВ платформа, ускоритель, платформа с квадруполями,
поворотным магнитом, приемником пучка



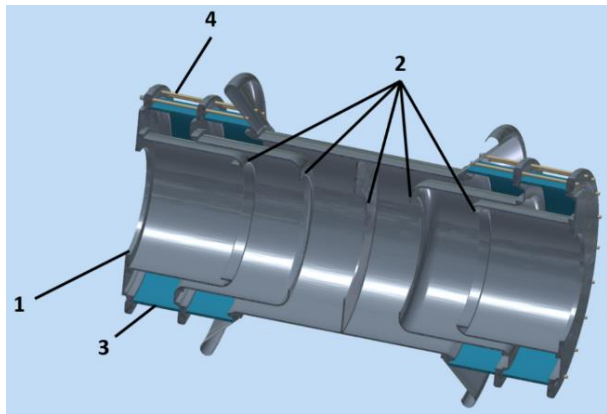
Системы ВВ питания в подвальном помещении

Мероприятие 1.1.4 (базовое финансирование)

«РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ МОЩНЫХ СИСТЕМ ИНЖЕКЦИИ АТОМАРНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ПОДДЕРЖАНИЯ ТОКА, В ТОМ ЧИСЛЕ СТАЦИОНАРНЫХ»

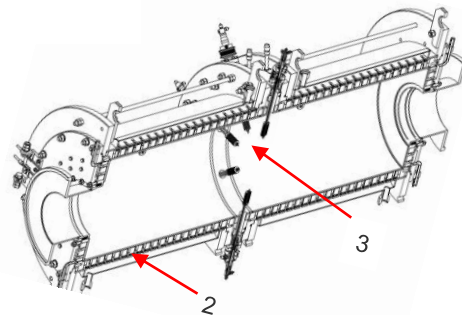
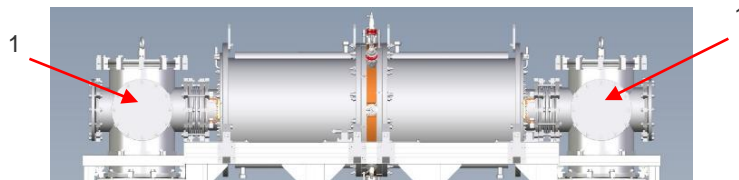
2022: Проведено моделирование и разработка конструкции ускорительной трубки и нейтрализатора пучка ионов H^- .

Ускорительная трубка на напряжение 400 кВ, пучок 9А



1 - входная апертура; 2 - электроды; 3 - изоляционные кольца; 4 - диэлектрические шпильки.

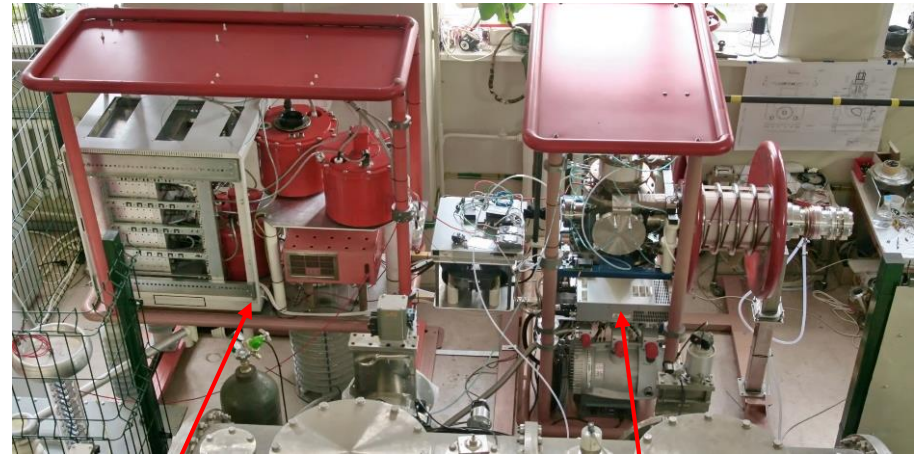
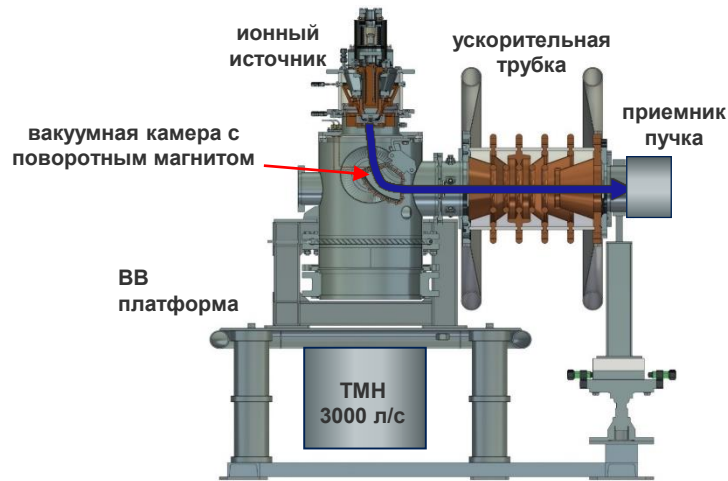
Плазменный нейтрализатор для 9 А пучка



1 – камеры откачки, 2 – постоянные магниты, 3 – накаливаемые катоды.

Источники ионов H^- для тандемного ускорителя БНЗТ

Инжекторный стенд источников ионов H^- с током 15 мА, энергией 130 кэВ
(238 зал 1-го здания)



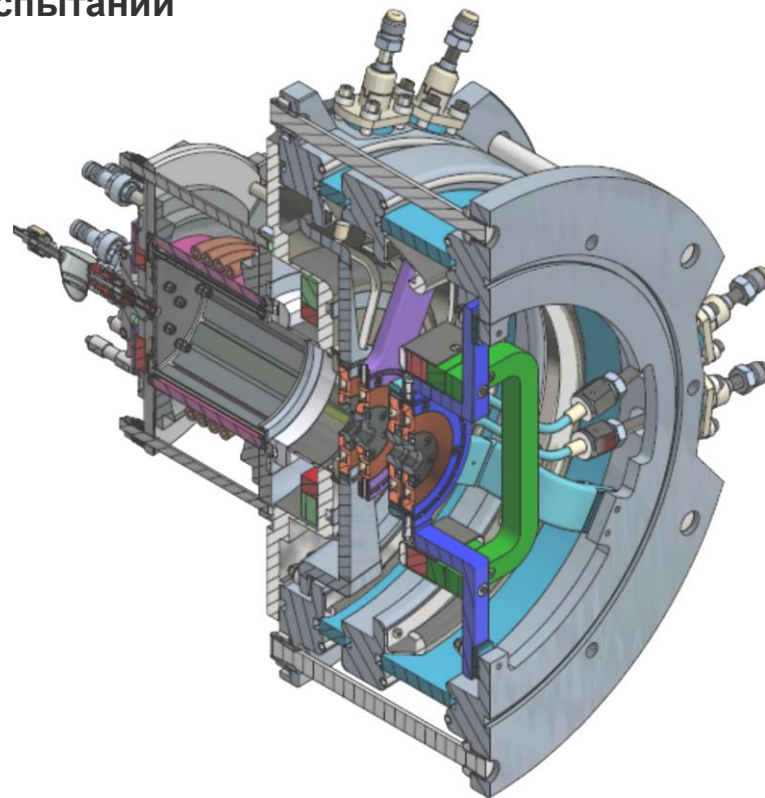
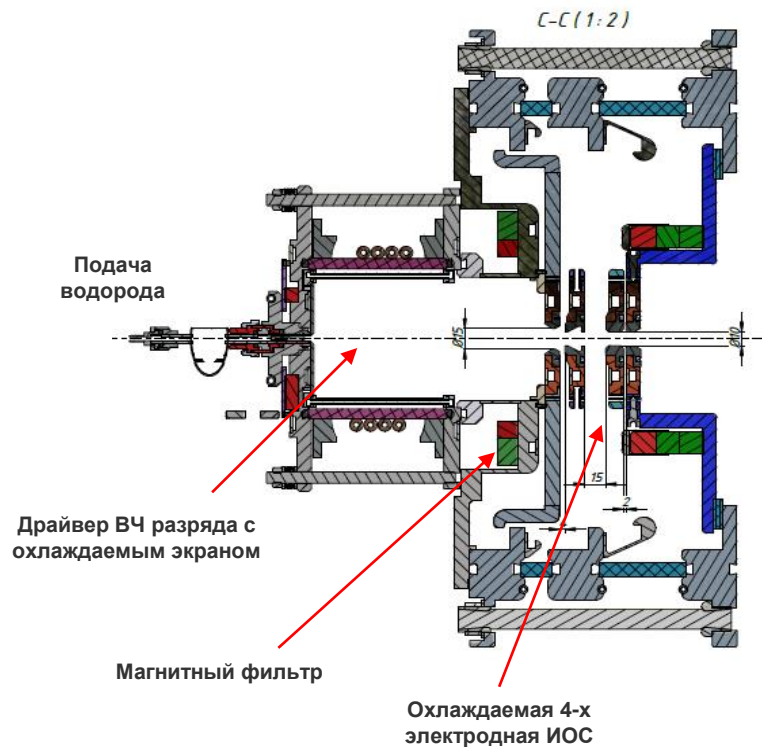
ВВ платформа с системой питания

ВВ платформа с ионным источником

Ведется модернизация инжекторного стенда для установки
ВЧ источника ионов H^- и его систем питания

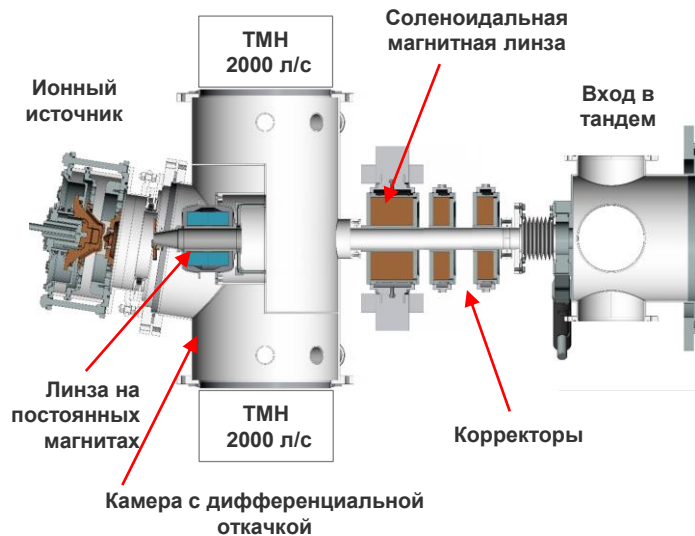
Источники ионов H⁻ для тандемного ускорителя БНЗТ

Разрабатывается проект ВЧ источника ионов H⁻ с током 15 мА
для клинических испытаний

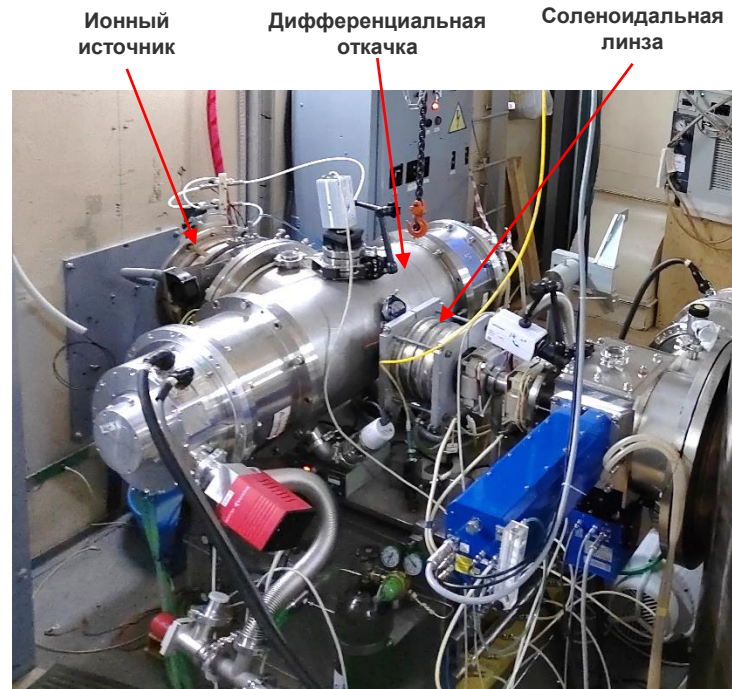


С-С (1:2)

Источник ионов H⁺ на тандемном ускорителе БНЗТ (с 2022 г.)



- DC пеннинговский ППИ с током до 15 мА
- Магнитная линза (П. Воблый) перед входом в LEVT
- Дифференциальная откачка с ТМН высокой производительности
- LEVT прежний (с соленоидальной линзой и корректорами пучка)



Стандартный режим работы - ток 5 (из 15) мА

Спасибо за внимание!