

Исследование источников отрицательных ионов водорода для инжектора высокоэнергетичных нейтралов

Сотников Олег Захарович
к.ф.-м.н., с.н.с. ИЯФ СО РАН

- Работы по ВВ инжекторам с использованием ОИ
 - Ускорительный стенд прототипа инжектора ИЯФ
 - Источники отрицательных ионов 1.5 А и 9 А
- Разработка 1.5 А, 120 кВ, 10 сек источника ОИ
 - Получение пучка 1.5 А
 - Поисковые Эксперименты на стенде испытания плазменных эмиттеров
- Работы на ускорительном стенде

Научная сессия Объединённого учёного совета по физическим наукам СО РАН
23 сентября 2026, г. Томск

Инжекторы высокоэнергетичных нейтралов основанные на нейтрализации ионных пучков

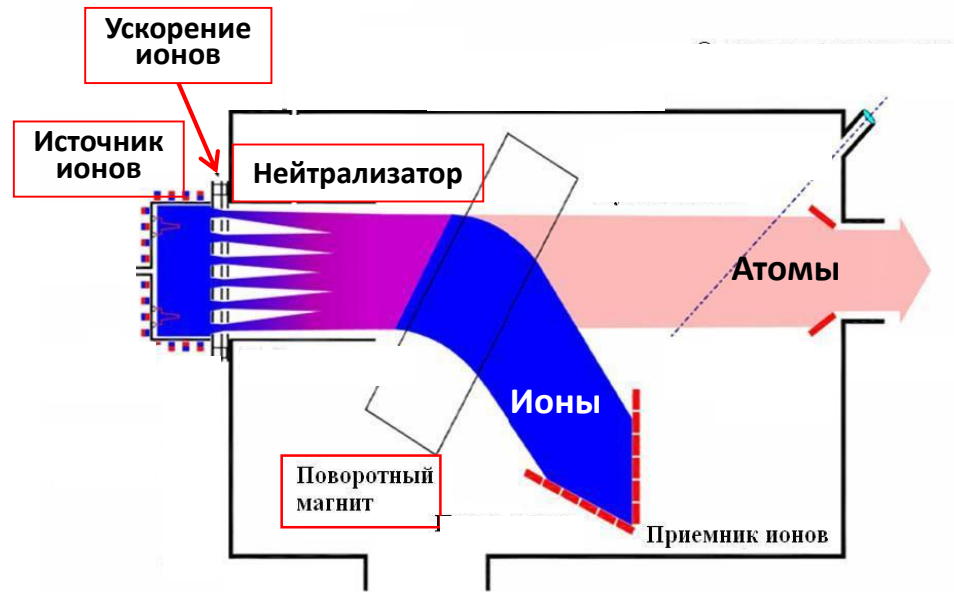
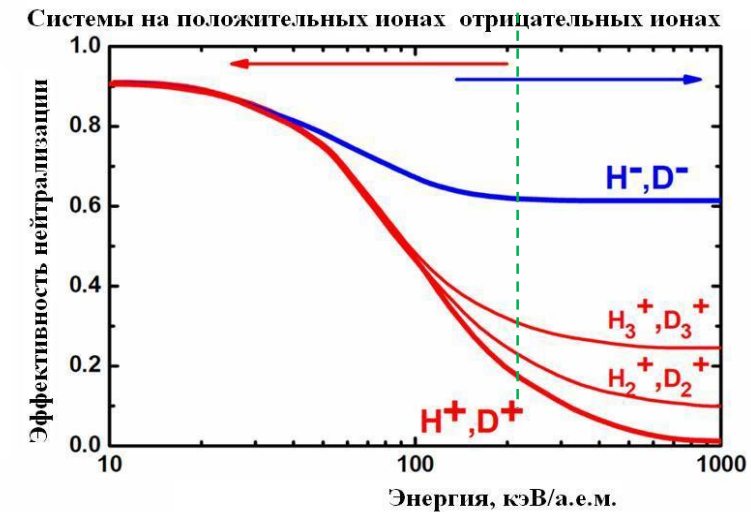


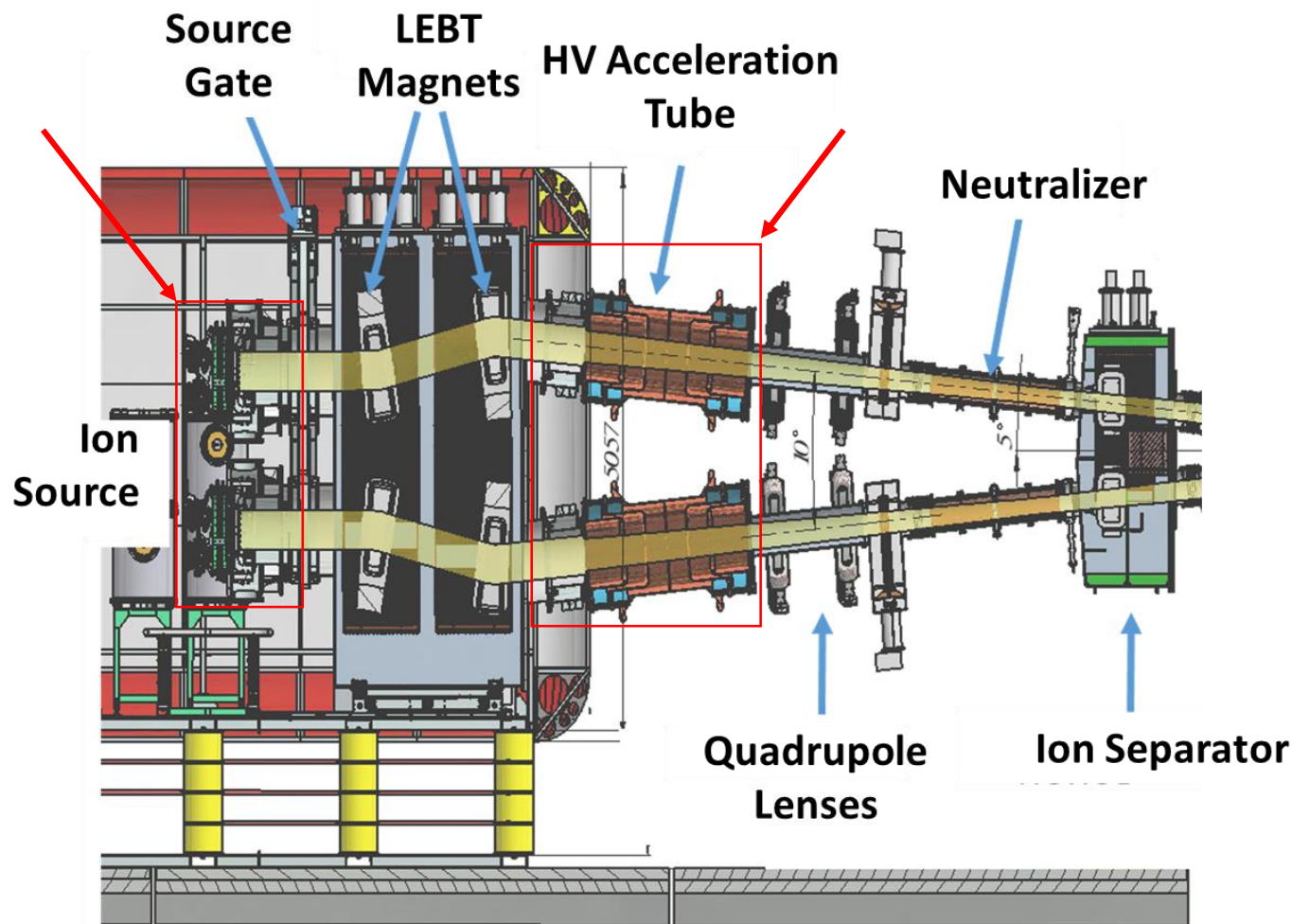
Схема перезарядного инжектора нейтралов



Эффективность нейтрализации ионов

В установках УТС используются для диагностики,
для получения и нагрева плазмы, для генерации тока в плазме,
для стабилизации неустойчивостей и др.

Концепция высоковольтного инжектора нейтралов ИЯФ



Принципиальная схема инжектора для TRT

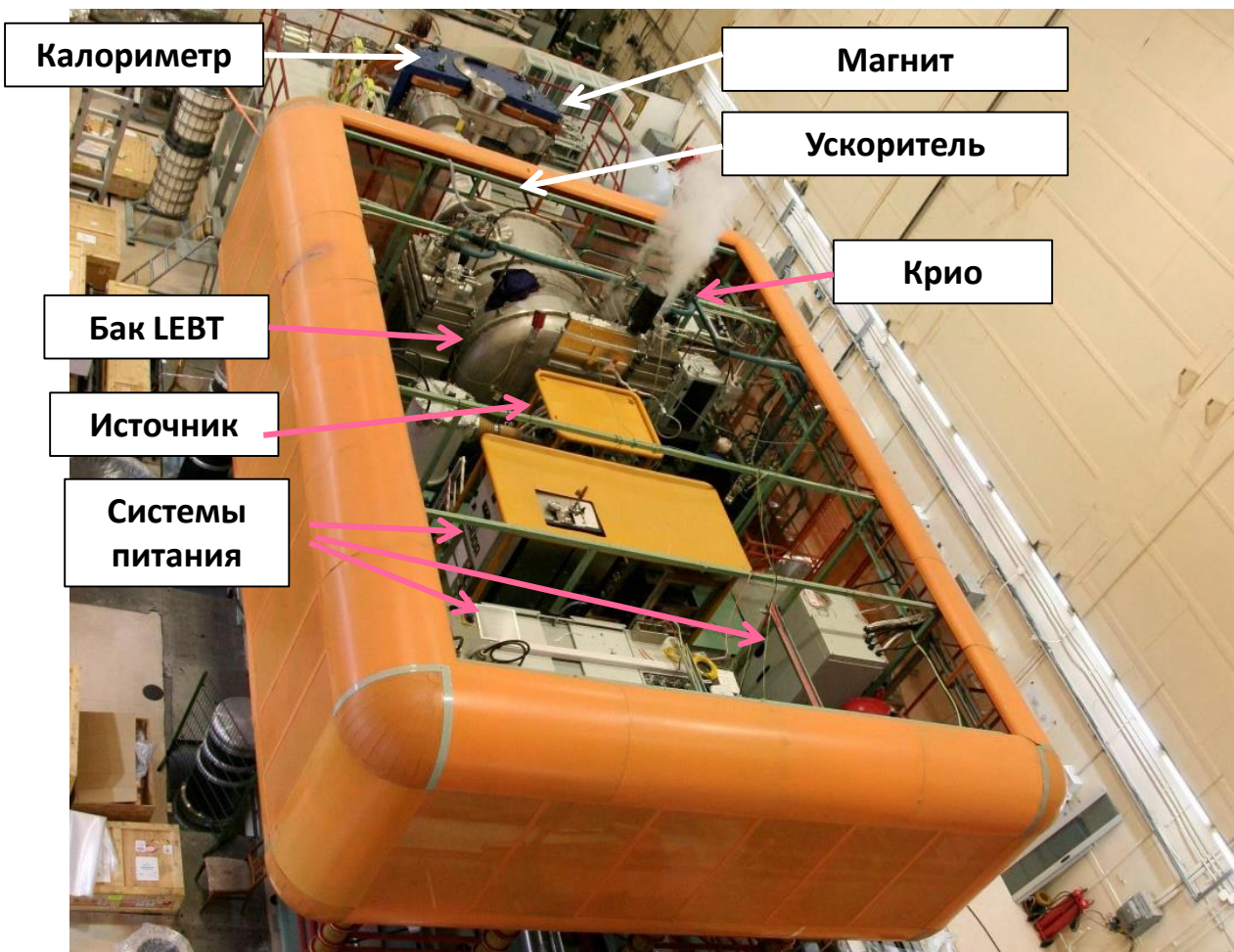
Отличительные особенности:

- Ускорение пучка происходит после его очистки от сопутствующих первичных и вторичных частиц (газ, быстрые нейтралы, электроны, цезий, свет)
- Для ускорения применяется одно-апертурная многоэлектродная ускорительная трубка, имеющая улучшенную откачку с двух сторон. Это уменьшает образование вторичных частиц в ускорителе и увеличивает стабильность его работы.

В ИЯФ ведутся работы:

- ВЧ ППИ с током пучка 1.5 А , энергией 120 кэВ
- ВЧ ППИ с током пучка 9 А , энергией 120 кэВ
- LEVT
- Ускорительная трубка
- HEVT
- Плазменный нейтрализатор пучка
- Фотонный нейтрализатор

Ускорительный стенд высоковольтного инжектора

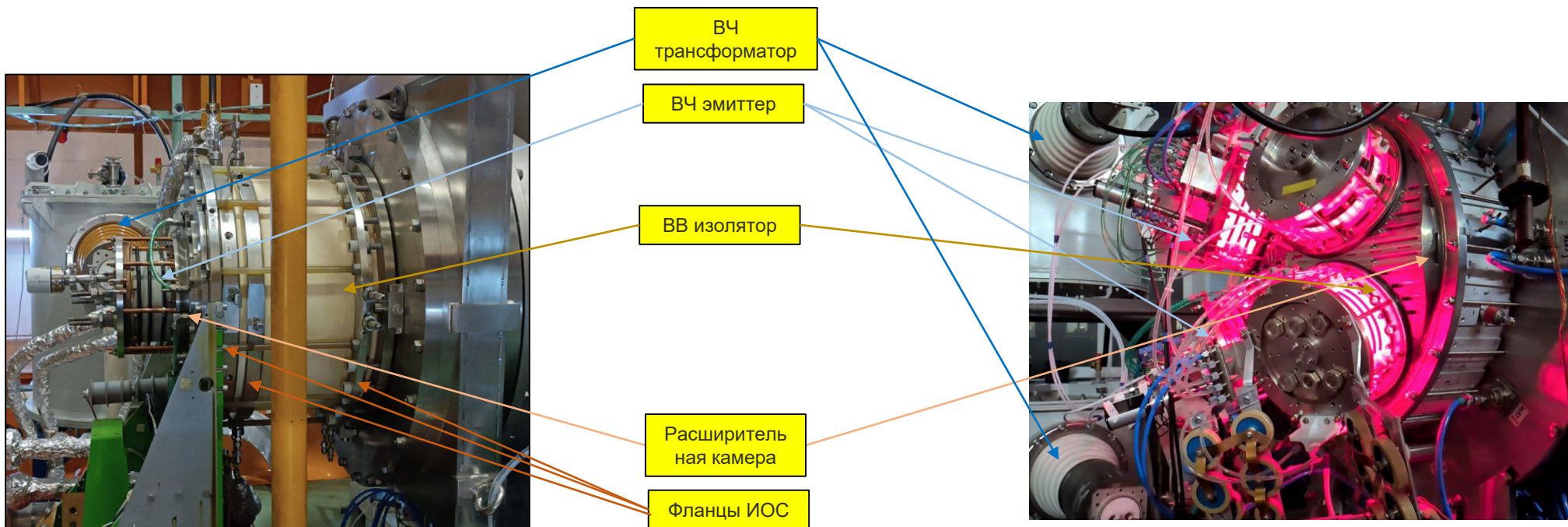


ВВ платформа вид сверху



ВВ платформа вид с боку

ВЧ источники отрицательных ионов ИЯФ



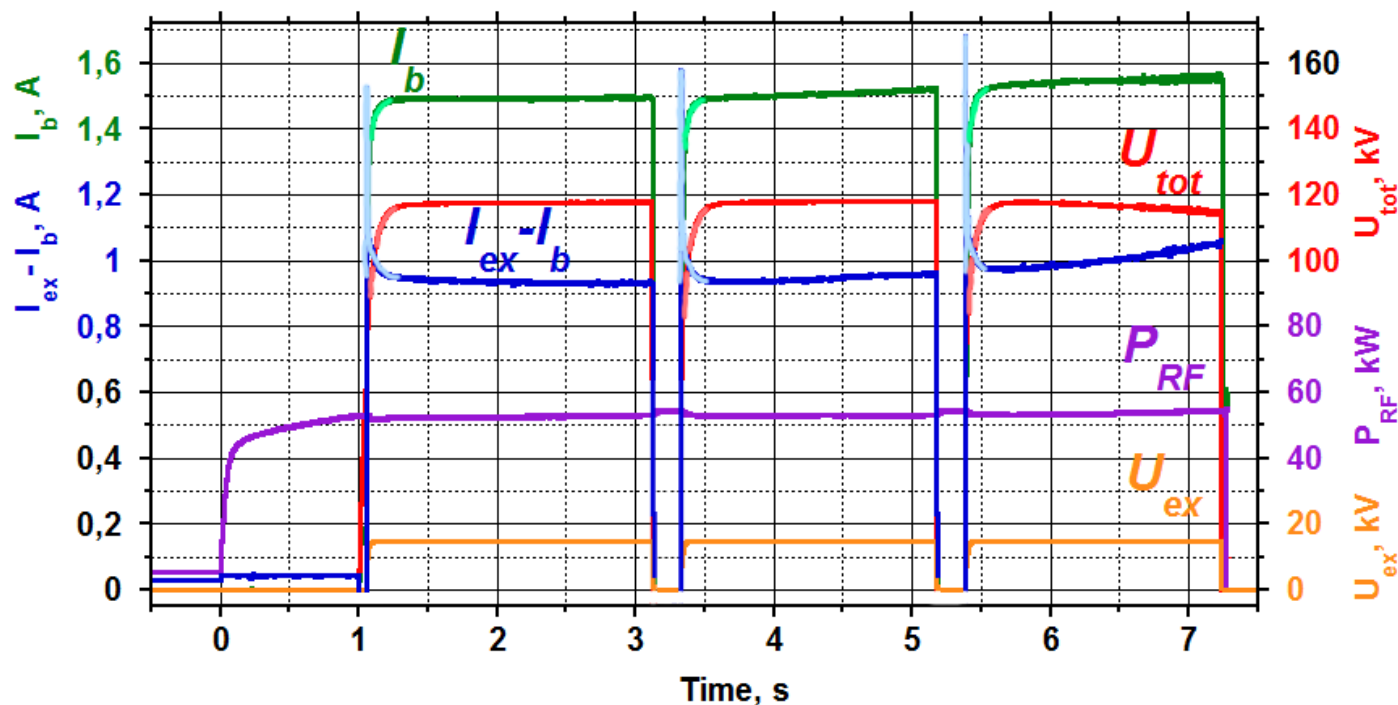
**Прототип источника с 1 ВЧ эмиттером
21 отверстие $\varnothing 16$ мм (площадь 42 см^2)**

**9 А источник с 4 ВЧ эмиттерами
145 отверстий $\varnothing 14$ мм (площадь 227 см^2)**

1. Цезий подается непосредственно на поверхность генерирующего ионы плазменного электрода через распределительную систему
2. Электроды ИОС прогреваются и охлаждаются горячим теплоносителем
3. Магнитная система источника ионов Н- ИЯФ сделана из постоянных магнитов и обеспечивает благоприятную кривизну поля (без пеннинговских ловушек)
4. ВЧ эмиттер оригинальной конструкции



Получение 1.5 А пучка ОИ в источнике



1.5 А пучок ОИ получен благодаря

- Оптимизации конструкции ВЧ эмиттера
- Увеличению мощности ВЧ до 52 кВт, ВЧ напряжения на антенне до 12 кВ
- Оптимизации теплового режима работы источника
- Оптимизации ионно-оптической системы
- Увеличенному вытягивающему напряжению 14 кВ

Осциллограммы 6 сек импульса с получением 1,5 А пучка ОИ

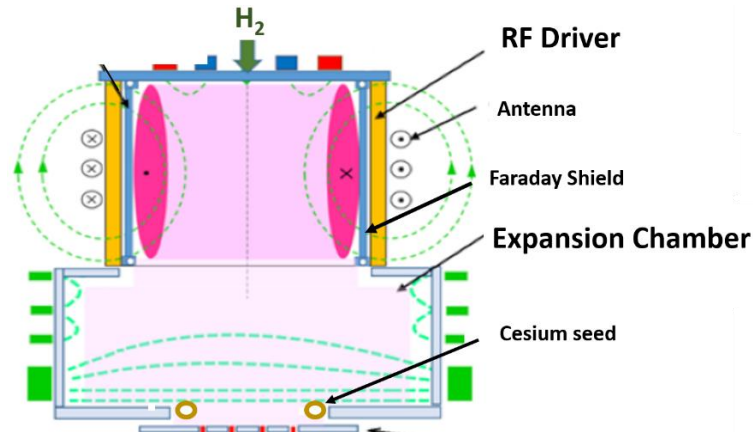
- 1,5 А пучок ионов Н-, 119 кВ полное напряжение ИОС
- 1 А ток электронов, 52 кВт мощность ВЧ драйвера

«Тренирующие» пробой напряжения ИОС (на 3-ей и 5-ой сек) обрабатываются системой управления и не приводят к нарушению ВВ прочности источника

Оптимизация конструкции ВЧ эмиттера

Основное удержание плазмы обеспечивается переменным магнитным полем создаваемым внешней антенной

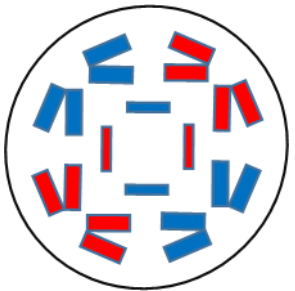
Магниты задней стенки ВЧ эмиттера предназначены для уменьшения потерь плазмы на металлической поверхности эмиттера



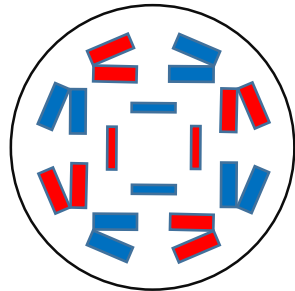
На отдельном стенде были исследованы несколько конфигураций магнитов ВЧ эмиттера для улучшения удержания плазмы в плазменном объеме.

Установка магнитов в конфигурации **квадруполь** продемонстрировала наибольший ток положительных ионов (H^+, H_2^+, H_3^+) на выходе драйвера при ВЧ мощности 10 - 50 кВт

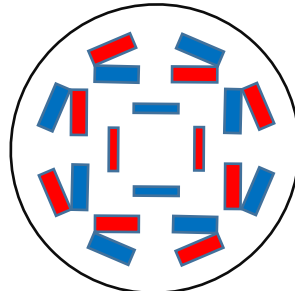
Увеличение плотности тока положительных ионов в плоскости выхода ВЧ эмиттера в сравнении с конфигурацией без магнитов составила 1,5 раза.



Квадруполь



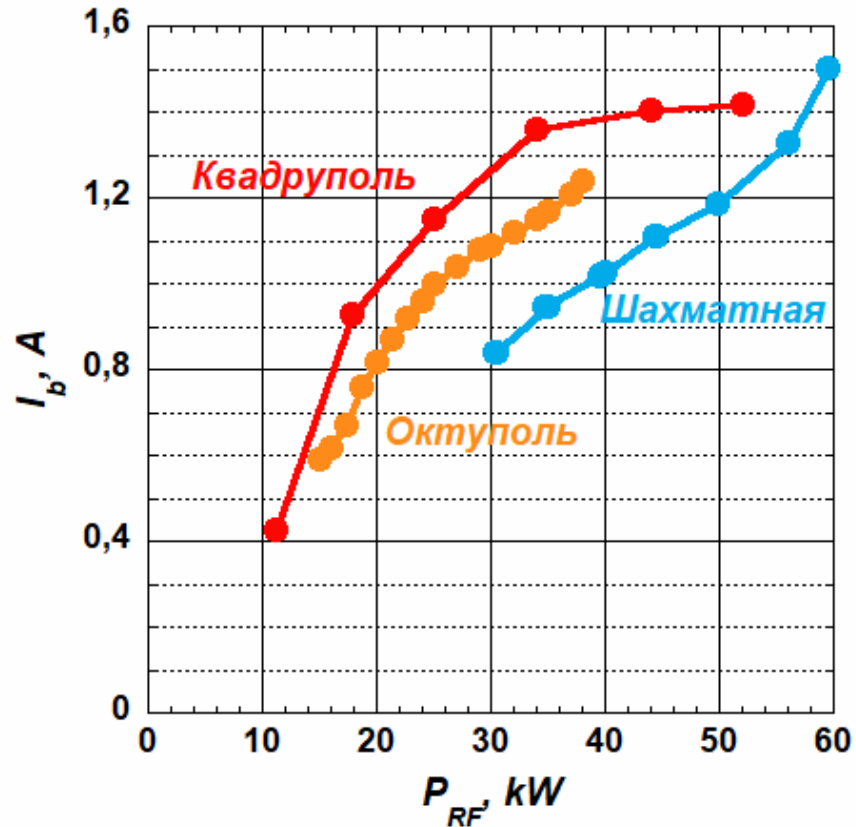
Октуполь



Шахматная

Оптимизация конструкции ВЧ эмиттера

Исследование эффективности примененных магнитных стенок было проверено на экспериментах с получением пучка в источнике 1,5 А



Увеличение эффективности генерации пучка ОИ наблюдается во всем исследуемом диапазоне мощности ВЧ разряда.

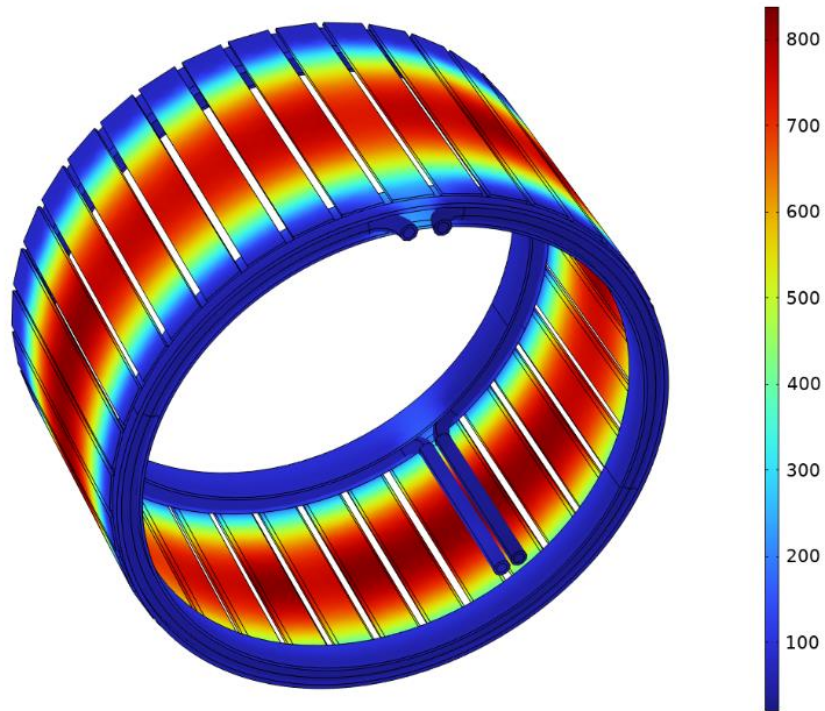
Насыщение генерации ОИ (при использовании квадрупольной магнитной стенки) обусловлено ограничением по пропусканию пучка в ИОС источника

Зависимости тока пучка ОИ от мощности ВЧ разряда

При использовании шахматной, октупольной и квадрупольной конфигурациях магнитной стенки

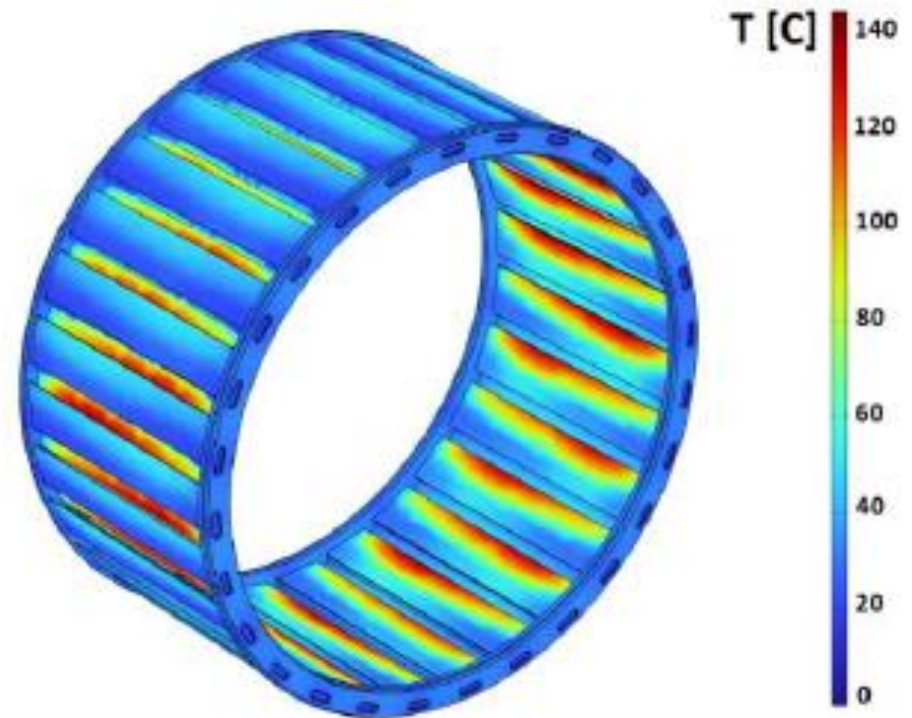
Оптимизации теплового режима работы источника

Нагрев экрана **1** типа с толщиной пластин 2 мм
при мощности 25 кВт за 20 секунд
COMSOL



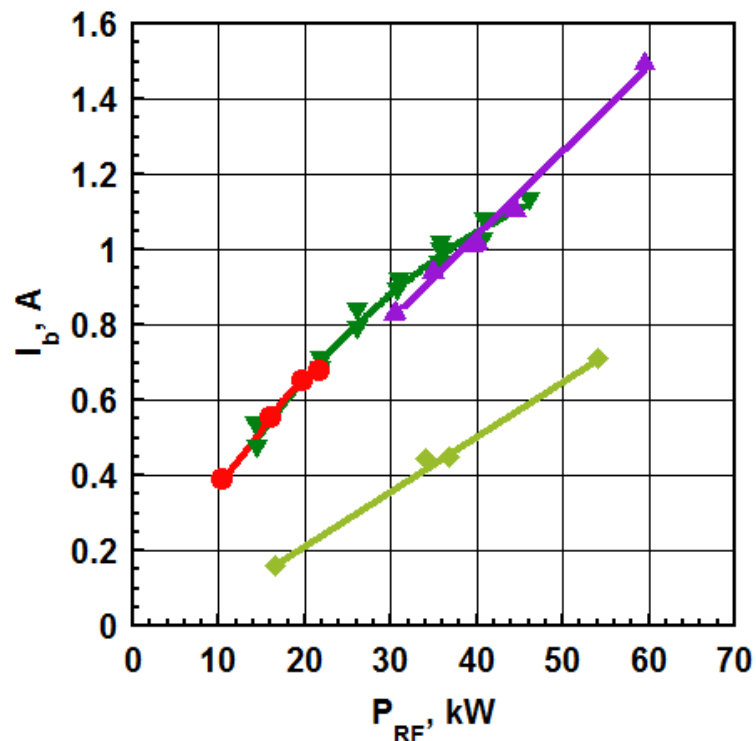
Максимальный нагрев $\sim 800^{\circ}\text{C}$, нагрев торцов 80°C

Нагрев экрана **2** типа с толщиной 6 мм
при мощности 20 кВт в стационаре



Максимальный нагрев $\sim 140^{\circ}\text{C}$, нагрев торцов 30°C

Оптимизации теплового режима работы источника



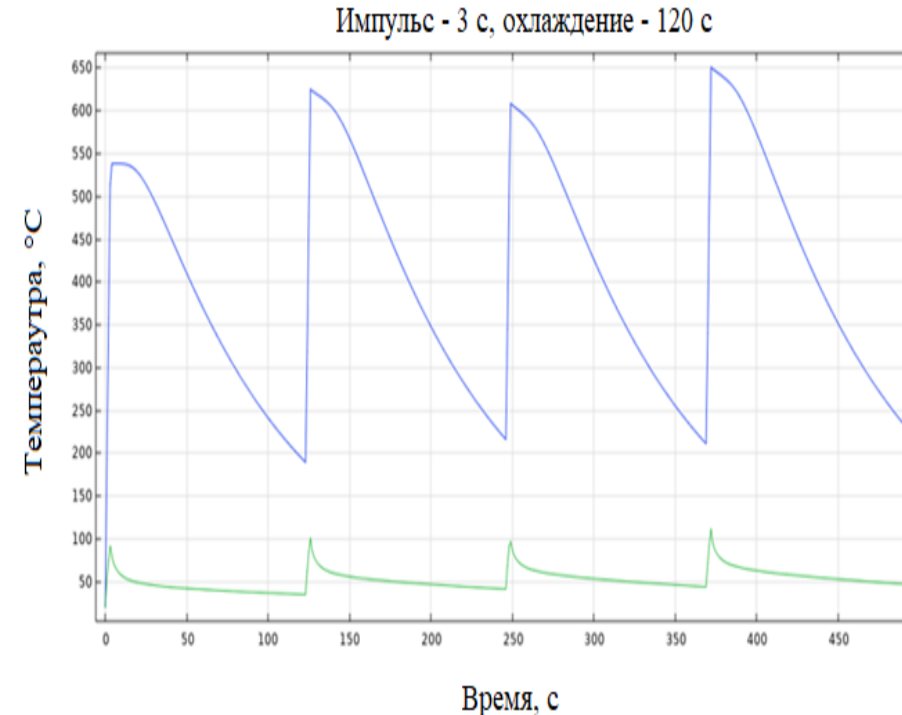
Ток пучка ОИ vs мощность
ВЧ генератора

Экраны 1 типа:

- с толщиной 0.5 мм,
- с толщиной 1 мм,
- с толщиной 2 мм,

Экран 2 типа:

- с толщиной 6 мм



Нагрев и охлаждение
поверхности экрана 0.5 мм

Для экранов 1 типа выбраны тепловые режимы (длительность импульса и скважность), которая обеспечивает эффективное перераспределение цезия в паузах между импульсами. Нагрев экрана 2 типа разрядом недостаточен для перераспределения цезия, требуется прямой нагрев теплоносителя.

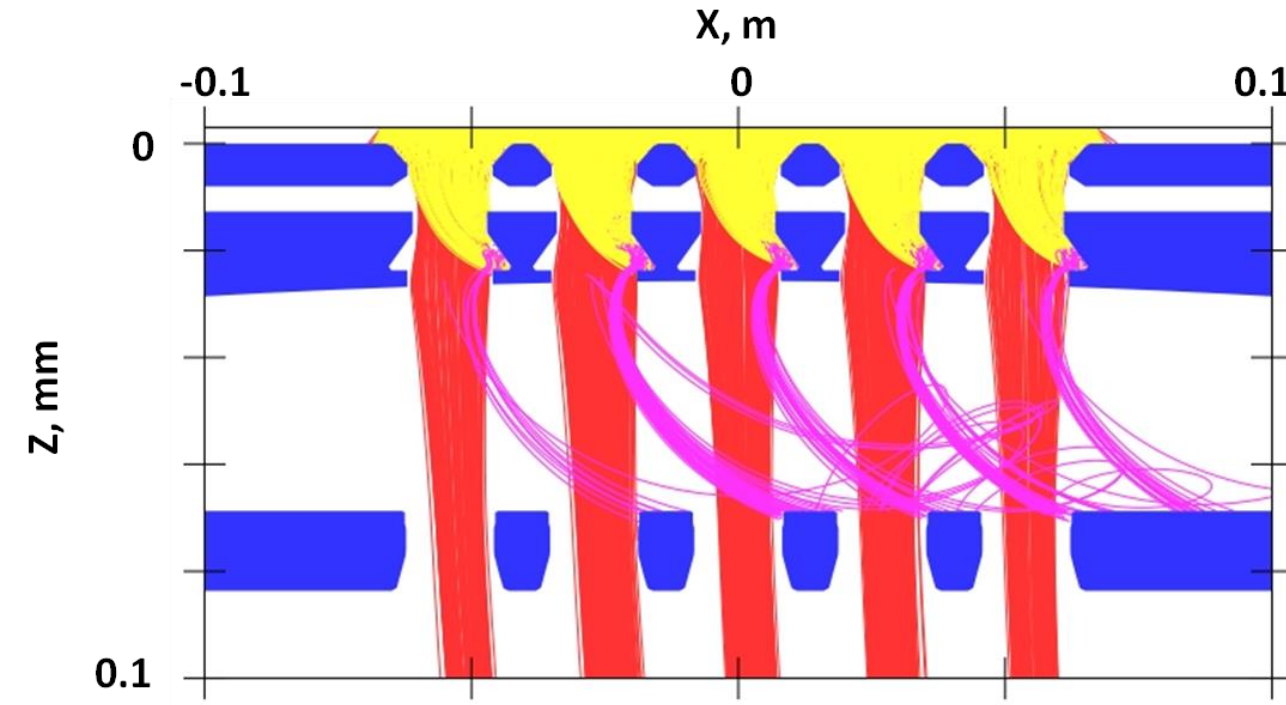
Высокочастотный плазменный эмиттер с охлаждаемым защитным экраном

- ✓ **Разработан и испытан высокочастотный плазменный эмиттер применяемый в инжекторах быстрых атомов для получения многосекундных атомарных пучков.** Продолжительность рабочего импульса эмиттера новой конструкции составляет несколько десятков секунд, и в проведенных экспериментах ограничивалась системами питания. Увеличенная продолжительность работы эмиттера достигнута за счет уменьшения тепловых потерь в элементах драйвера и установке охлаждаемого экрана. Нагрев экрана при разработанном сценарии работы эмиттера позволяет предотвратить накопление цезия в объеме эмиттера.
- ✓ **Эмиттер был успешно испытан** на отдельном стенде в импульсах длительностью **20 с** при мощности ВЧ генератора **40кВт**, при этом были получены потоки плазмы с плотностью тока положительных ионов **300мА/см²**, достаточной для работы разрабатываемых стационарных поверхностно-плазменных источников отрицательных ионов. При ВЧ мощности 40 кВт после 20 секундного импульса температура внутренней поверхности экрана не превысила **1000°С**
- ✓ **Были проведены испытания эмиттера** при мощности ВЧ генератора до **60 кВт**. В импульсах длительностью **50 мс** получены потоки плазмы с плотностью тока положительных ионов **470 ма/см²**. Произведен анализ работы нового эмиттера, выявлены причины высокой эффективности получения плазмы и их влияние на работу эмиттера в режимах большой продолжительности импульсов.
- ✓ **На поверхностно-плазменном источнике отрицательных ионов** с использованием разработанного плазменного эмиттера **был получен ток пучка 1.5 А** (плотность тока 45 мА/см²) **при мощности вкладываемой в разряд 34 кВт**, ограничение по току пучка было вызвано используемой ионно-оптической системой.
- ✓ **Обеспеченна одновременная работа четырех плазменных эмиттеров с мощностью до 30 кВт каждый** на источник с большой площадью эмиссии. Проведены работы по настройке и модернизации антенн и внешних экранов эмиттеров. Подтверждено пропорциональное увеличение плотности плазмы в близи плазменного электрода источника.

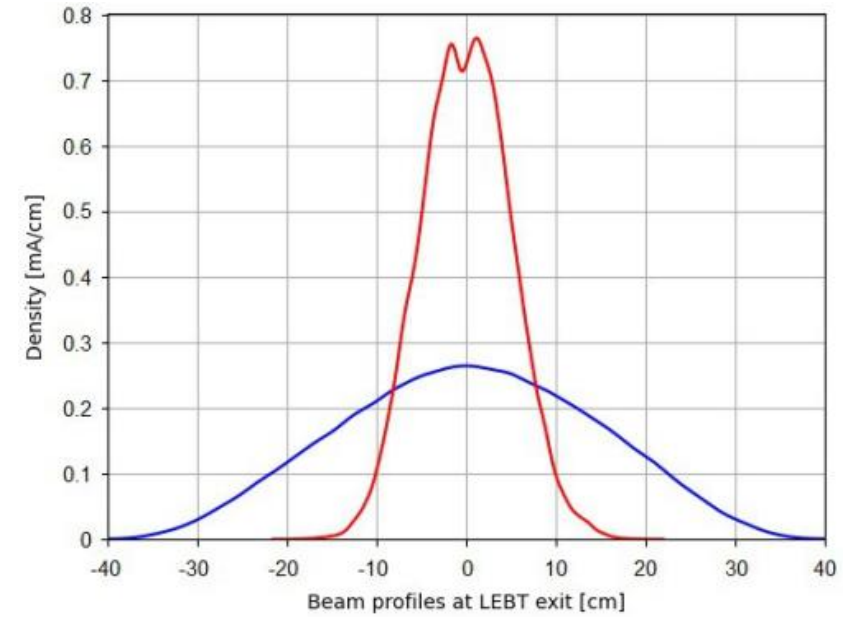
[1] Shikhovtsev I., et al. Overview of neutral beam injectors for plasma heating and diagnostics developed at Budker INP// Journal of plasma physics. – 2024. – vol. 90 . – № 1. – P. 155900301 . – DOI: 10.1017/s0022377824000278

[2] Sotnikov O., Sanin A., Gavrisenko D., et al. RF Driver Operation in the Cesium Hydrogen Negative Ion Source // 9th International symposium on Negative Ions, Beams and Sources - NIBS'24 .–2024 .– <https://event.ipr.res.in/event/9/abstracts/1337>

Оптимизации ионно-оптической системы



Траектории частиц в ИОС. **ОИ**, **Электроны**, **вторичные электроны**

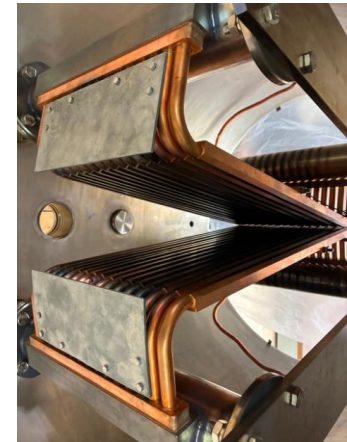
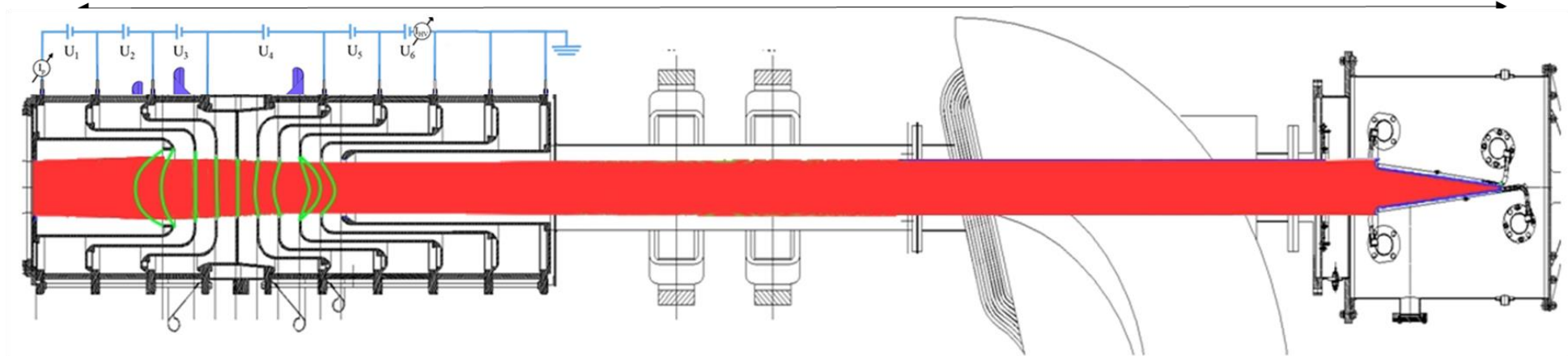


Профиль пучка на входе в ускоритель, на расстоянии 4,5 м

Моделирование в IBSimu позволило получить **прохождение пучка** отрицательных ионов с эмиссионной плотностью тока 45 мА/см² через ИОС, обеспечить формирование пучка с током 1.5 А и требуемой угловой расходимостью ± 12 мРад при эффективном **перехвате сопутствующих электронов более 90%**.

Эксперимент по транспортировке и ускорению пучка 1,24 А

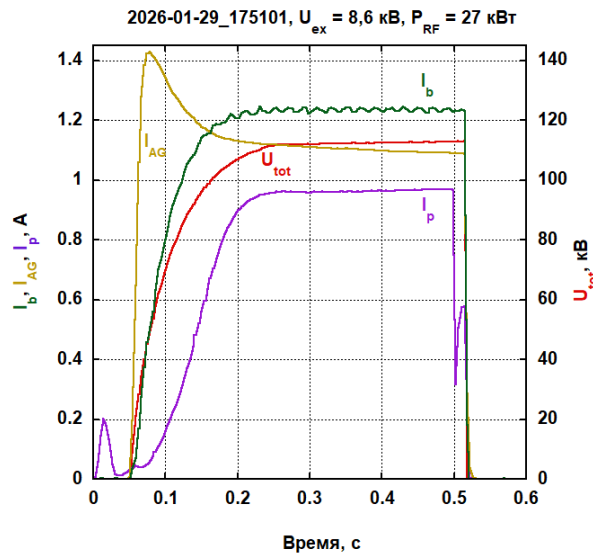
6 м



Измерение токов I_p и I_{HV} текущих в цепях ВВ выпрямителей позволяет определить входящий и выходящий токи в ускорителе

При напряжении ускорения 300 кВ пучок полностью проходит на калориметр

Эксперимент по транспортировке и ускорению пучка 1,24 А



Осциллограммы токов источника и ускорителя: тока пучка из источника $I_b = 1.1$ А, тока на вход ускорителя $I_p < 0.8$ А и тока на выходе ускорителя $I_{HV} < 0.75$ А. Ускорение в импульсе продолжительностью 1.8 сек.

Была улучшена транспортировка ионного пучка на вход ускорителя через секцию LEVT. Введена в строй система динамического контроля характеристик пучка, усилены системы охлаждения ускорителя и приёмника пучка. Проведена модификация систем высоковольтного питания ускорителя инжектора, достигнута стабилизация напряжения 300 ± 10 кВ при токе до 1А.

В результате проведенных работ:

- На выходе ионного источника получен пучок отрицательных ионов током 1,24 А с энергией 112 кэВ.
- Пучок с током 0.97 А (78 % пучка источника) проведено через LEVT на вход ускорительной трубки.
- Пучок с током 0.87 А ускорен до энергии 410 кВ .
- На калориметр, установленный на расстоянии 10 м от источника проведен и измерен пучок интенсивностью 0.7 А, что составляет 73% пучка на входе ускорителя и 56% пучка на выходе из источника.

Публикации:

[1] Sotnikov O., Sanin A., Belavsky A., et al. //30th IAEA Fusion Energy Conference. Technologies of high voltage neutral beam injectors for magnetic fusion devices.– 2025.– p. 383.–

<https://conferences.iaea.org/event/392/contributions/36060>

[2] Shikhovtsev I., et al. Overview of neutral beam injectors for plasma heating and diagnostics developed at Budker INP// Journal of plasma physics. – 2024. – vol. 90 . – № 1. – P. 155900301 . – DOI: 10.1017/s0022377824000278

[3] Sotnikov O., Sanin A., Gavrisenko D., et al. RF Driver Operation in the Cesium Hydrogen Negative Ion Source // 9th International symposium on Negative Ions, Beams and Sources - NIBS'24 .–2024 .– <https://event.ipr.res.in/event/9/abstracts/1337>