

Развитие комплекса ГОЛ-3. Краткий обзор проекта ИТЭР

Д.И. Сквородин

от имени команды

Введение

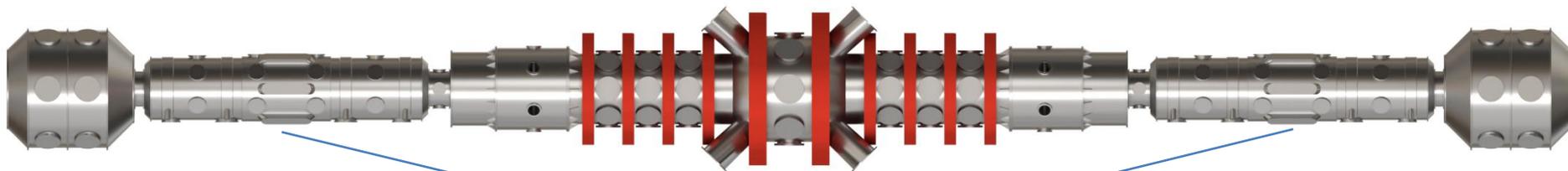
Работы по УТС в лаборатории 10:

- ❖ Развитие физики многопробочного удержания.
 - ❖ Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ.
 - ❖ Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка.
- ❖ Физика и технологии термоядерного реактора:
 - ❖ Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.
 - ❖ Взаимодействие плазмы с поверхностью.

Введение

- Российская термоядерная программа – федеральный проект «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий».
- Участие в создании ИТЭР – государственный заказчик ГК «РОСАТОМ».

Введение



Многопробочные (винтовые) секции

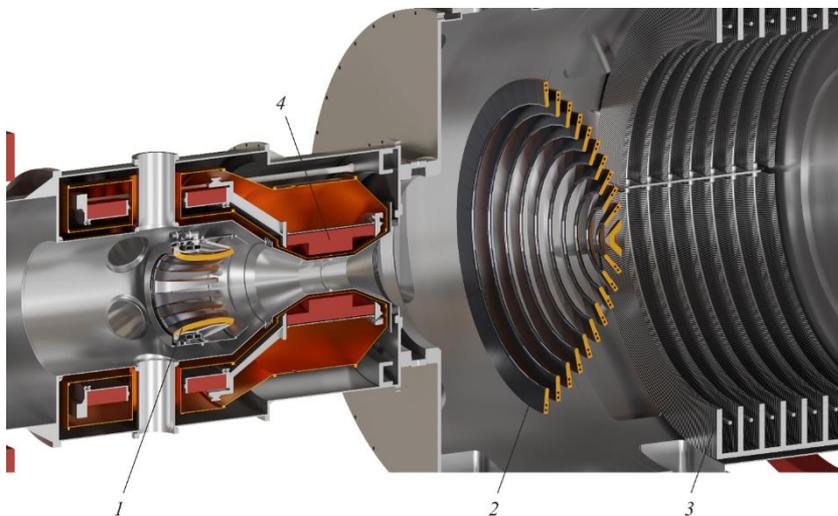


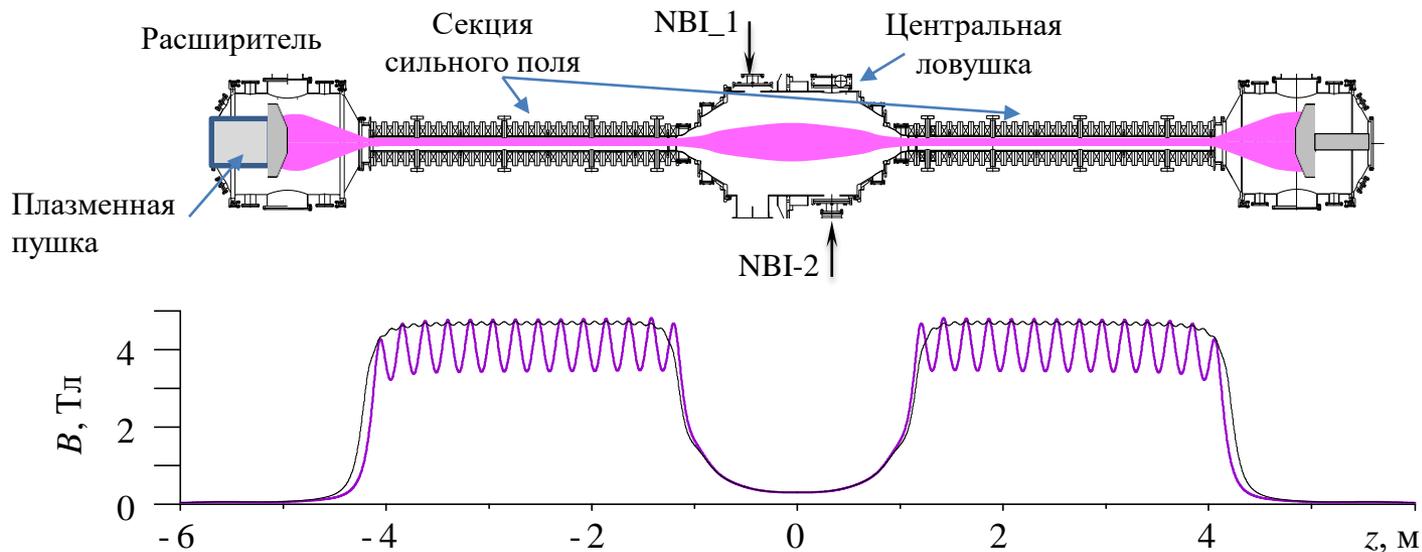
Рис. 10. Модуль магнитной пробки, расширительная секция и система электродов ГДМЛ в разрезе.
1 – лимитер, 2 – приемник плазмы, 3 – сорбционный насос, 4 – соленоид магнитной пробки.

Работы по УТС в лаборатории 10:

- ❖ Развитие физики многопробочного удержания.
 - ❖ **Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ.**
 - ❖ Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка.
- ❖ Физика и технологии термоядерного реактора:
 - ❖ Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.
 - ❖ Взаимодействие плазмы с поверхностью.



Установка ГОЛ-NB



Основная цель создания установки:

изучение технологии подавления продольных потерь частиц и энергии из открытых ловушек с плазмой реакторного класса и создание физической базы для ГДМЛ.

Работы на ГОЛ-NB входят в Мероприятие 1.1.6 Федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий».

Установка ГОЛ-НВ

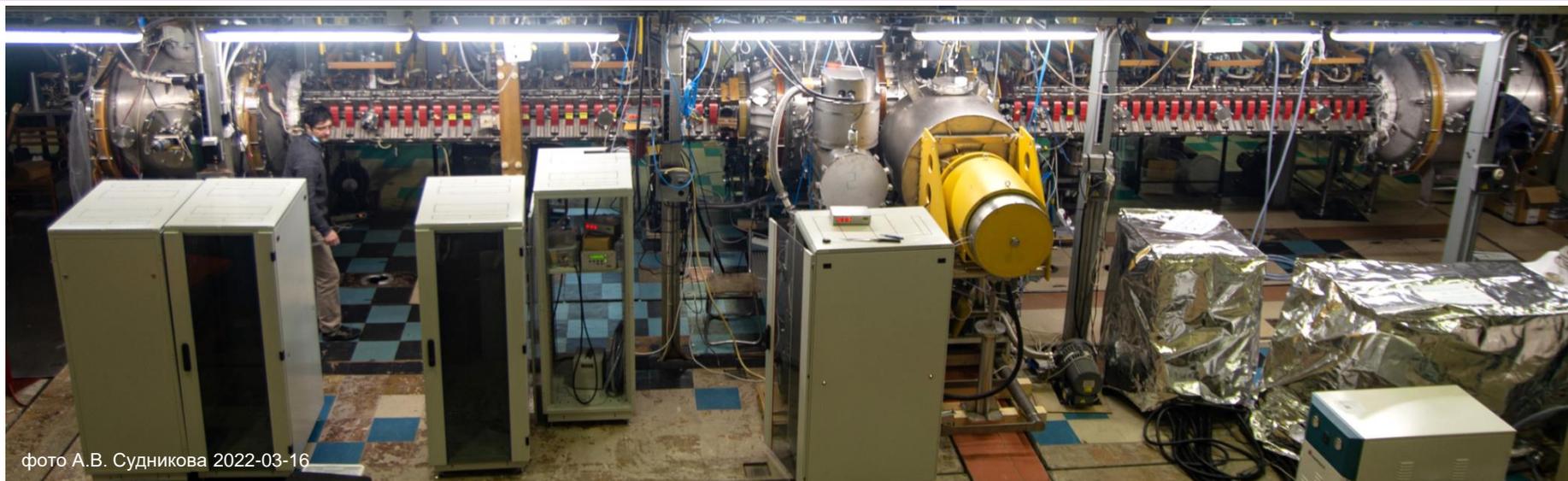
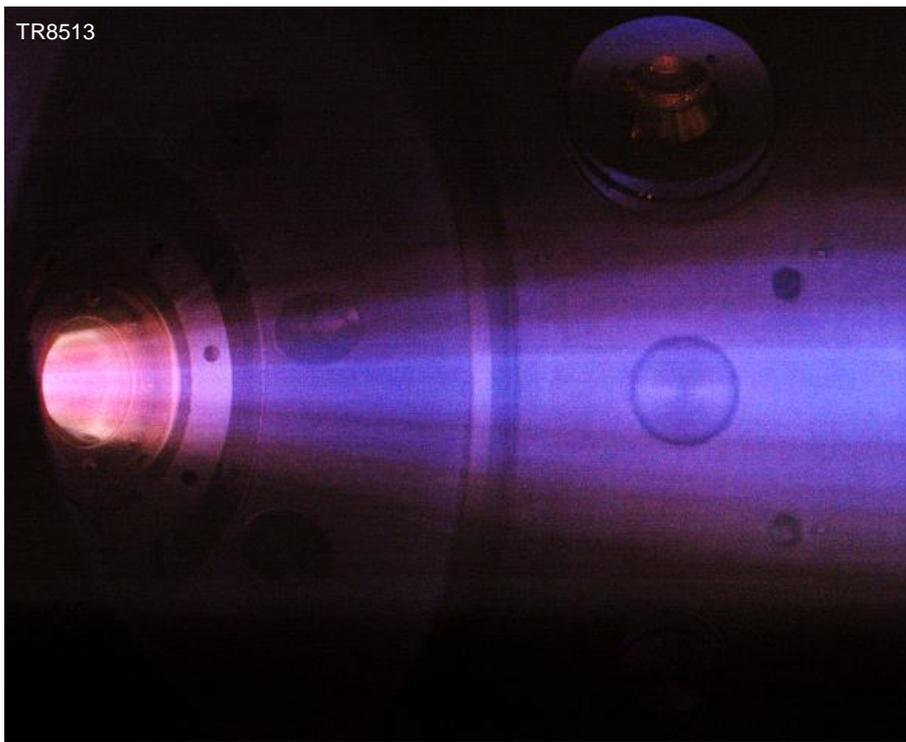


фото А.В. Судникова 2022-03-16

- 2021 год: начало экспериментов в проектной конфигурации установки.
- 2022 год:
 - эксперименты с соленоидальной конфигурацией секций сильного поля;
 - оптимизация параметров плазмы и сценариев эксперимента.
- **Задачи 2023 года:**
 - изучение физики стабилизации плазмы в ловушке,
 - изучение потоков плазмы вдоль магнитного поля,
 - перевод установки в конфигурацию многопробочной ловушки.

Изучение физики стабилизации плазмы

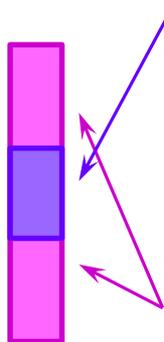
TR8513



РНФ 21-12-00133

Наши ожидания:

приосевая область стабилизируется в замороженностью силовых линий магнитного поля в хорошо проводящую плазму вблизи торца плазменной пушки (только во время её работы);



периферия плазмы стабилизируется при принудительном дифференциальном вращении вокруг оси за счёт $E \times B$ дрейфа.

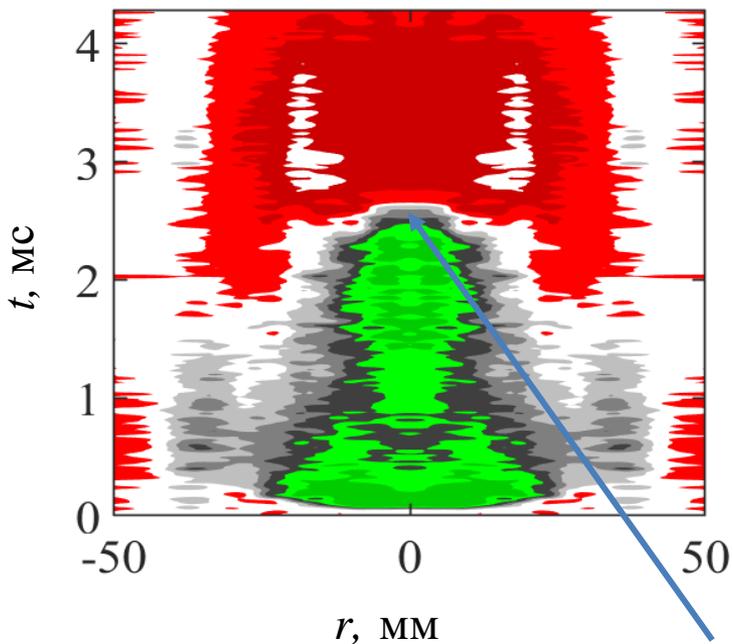
Результаты экспериментов:

- созданы необходимые системы установки;
- получилось так, как мы и ожидали;
- мы научились «выключать» любой из этих двух способов стабилизации.

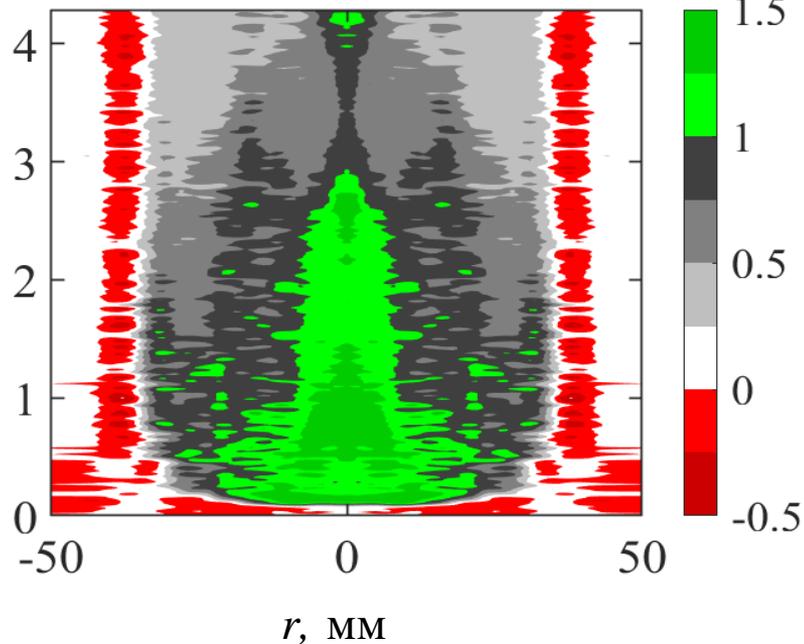
Изучение потоков плазмы вдоль магнитного поля

Хронограммы потоковой скорости (зонды Маха)

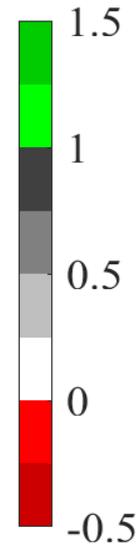
до ловушки $z = -1,37$ м



● после ловушки $z = +1,37$ м



число Маха



инверсия направления течения
плазмы после выключения пушки

оттенки серого: дозвуковое движению плазмы от пушки в сторону выходного плазмоприемника,

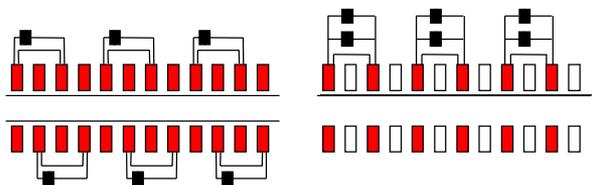
оттенки зеленого: движению в ту же сторону со звуковой или сверхзвуковой скоростью

оттенки красного: движение плазмы в сторону плазменной пушки



Многопробочная конфигурация ГОЛ-NB

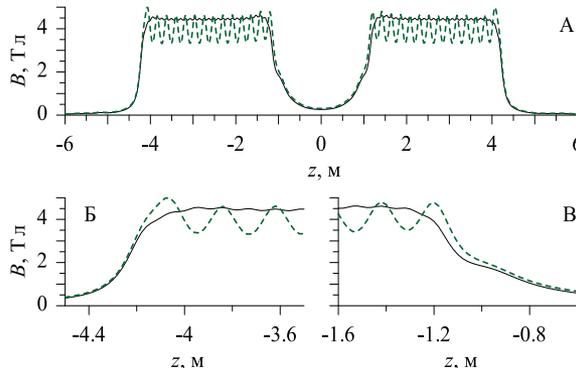
соленоид → многопробочное поле



71 медная катушка, сильная связь по потоку. Импульсное питание от емкостного накопителя, энергозапас до 12,5 МДж. Ток до 10,6 кА (265 А/мм² по меди). Очень большая роль скин-эффекта в камере.



подбор магнитной конфигурации

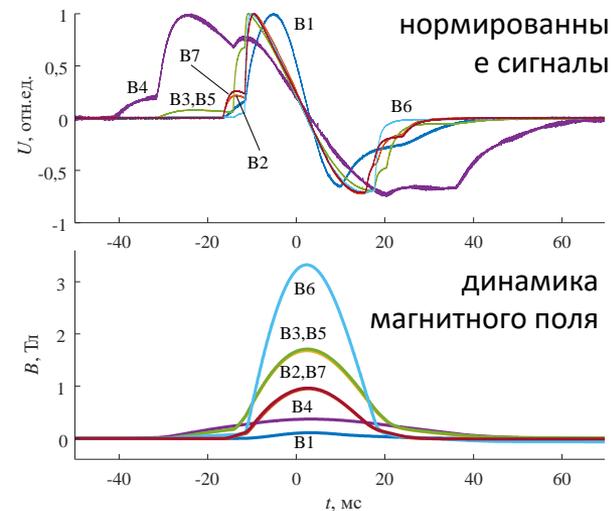
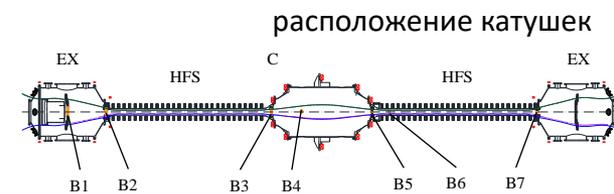


Полная система (А) и участки перехода к расширителю (Б) и к центральной ловушке (В).

задачи:

- решение «проблемы последней катушки»;
- согласование потоков через четыре лимитера, ограничивающих плазму;
- подбор моментов запуска и напряжений зарядки конденсаторов (всего 10 выпрямителей на 50 секций батареи).

результат измерений



Результат работы: всё получилось



Результаты и планы

2023

- Проведены точные измерения и подстройка магнитной конфигурации в соленоидальном режиме.
- Оптимизированы потенциалы на внутрикамерных электродах
→ увеличилась плотность плазмы в ловушке и улучшился коэффициент ослабления нагревных нейтральных пучков в плазме.
- Создана диагностика потоковой скорости плазмы с зондом Маха, изучено течение плазмы в ловушке.
- Установка переведена в конфигурацию многопробочной ловушки.
- Начаты эксперименты в многопробочной конфигурации.
- Продолжается развитие комплекса диагностик плазмы.

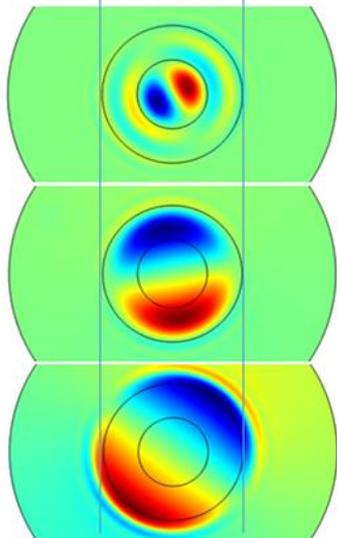
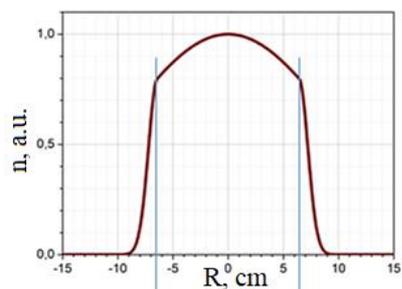
2024 – основные направления работ (мероприятие 1.1.6 ФП УТС и госзадание)

- Изучение физических закономерностей нагрева и удержания плазмы в ловушке при многопробочном включении секций сильного поля при нагреве плазмы методом нейтральной инжекции с мощностью не менее 1 МВт;
- Эксперименты по инжекции электронов с энергией до 400 эВ вдоль магнитного поля;
- Предварительные эксперименты с вводом электромагнитной волны в ионно-циклотронном диапазоне частот (источник 13,6 МГц, 25 кВт);
- Проверка методов снижения рециклинга газа со стенок камеры.



Ионно-циклотронный нагрев (задел)

Предварительные эксперименты с вводом электромагнитной волны в ионно-циклотронном диапазоне частот (источник 13,6 МГц, 25 кВт)



Моделирование ВЧ-мод в плазме

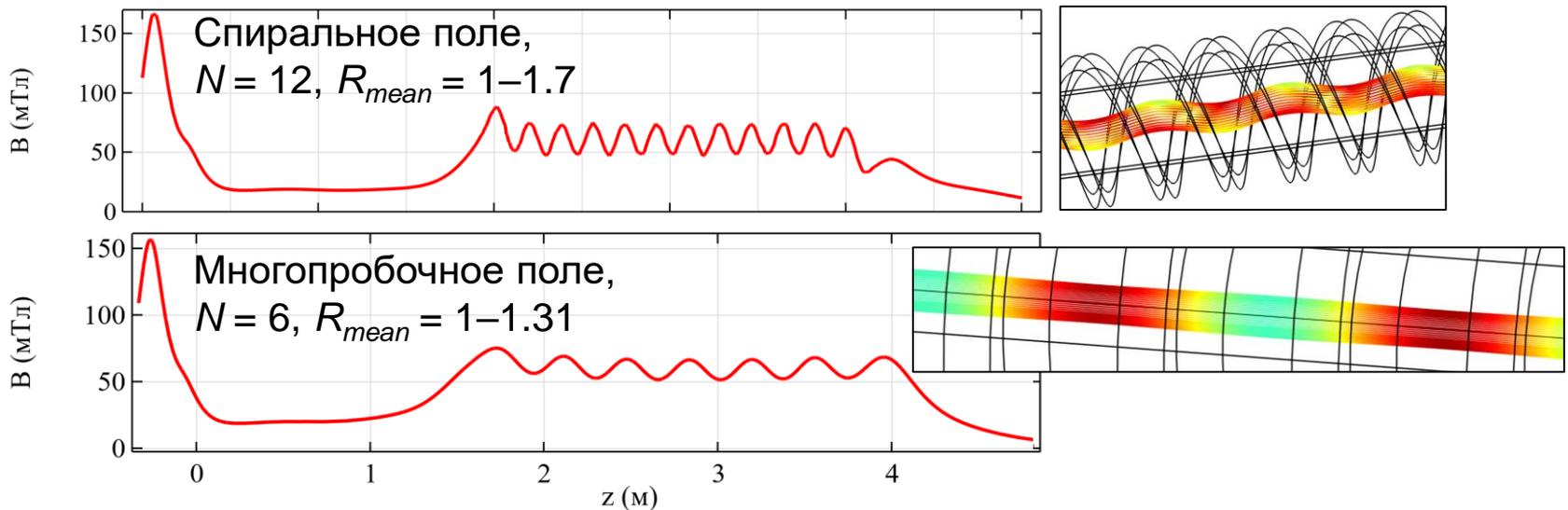
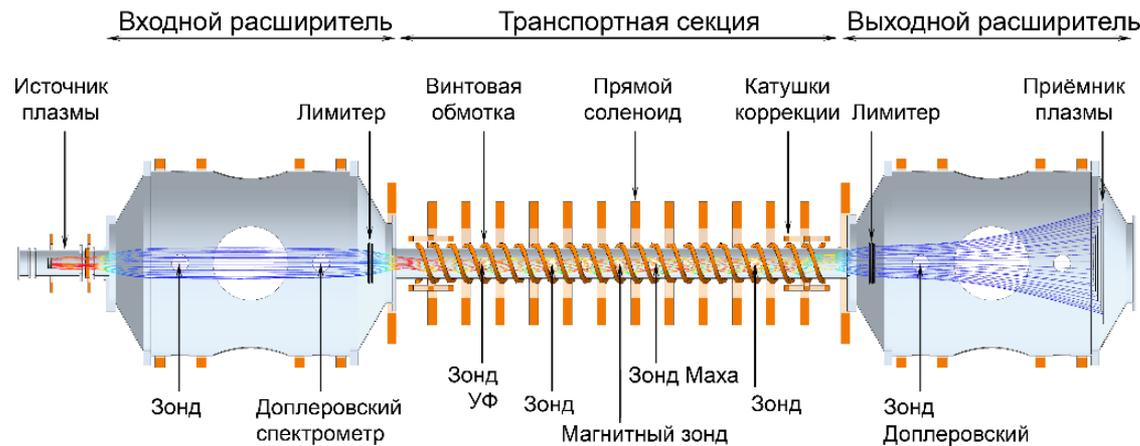
Антенна

Источник 13,6 МГц, 25 кВт

Работы по УТС в лаборатории 10:

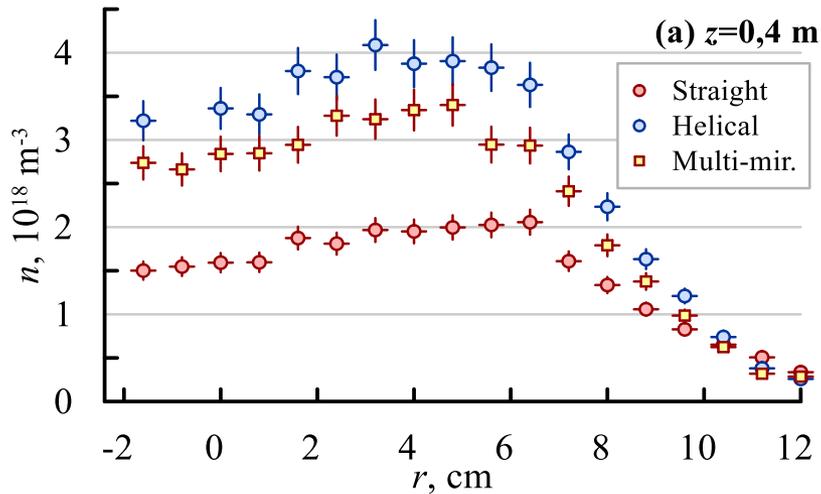
- ❖ Развитие физики многопробочного удержания.
 - ❖ Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ.
 - ❖ **Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка.**
- ❖ Физика и технологии термоядерного реактора:
 - ❖ Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.
 - ❖ Взаимодействие плазмы с поверхностью.

Установка СМОЛА



| h [см] | N [1] | r [см] | B_z [мТл] | R_{mean} [1] | n_i [10^{18} м^{-3}] | T_i [эВ] | T_e [эВ] | ω [с^{-1}] | λ [м] |
|----------|---------|----------|-------------|----------------|------------------------------------|------------|------------|------------------------------|---------------|
| 18 | 12 | 5 | 50-100 | 1 – 1.7 | 0.25–5.6 | 4–7 | 20–30 | $(4-11) \times 10^5$ | 0.3–2.5 |

Различные типы многопробочного удержания

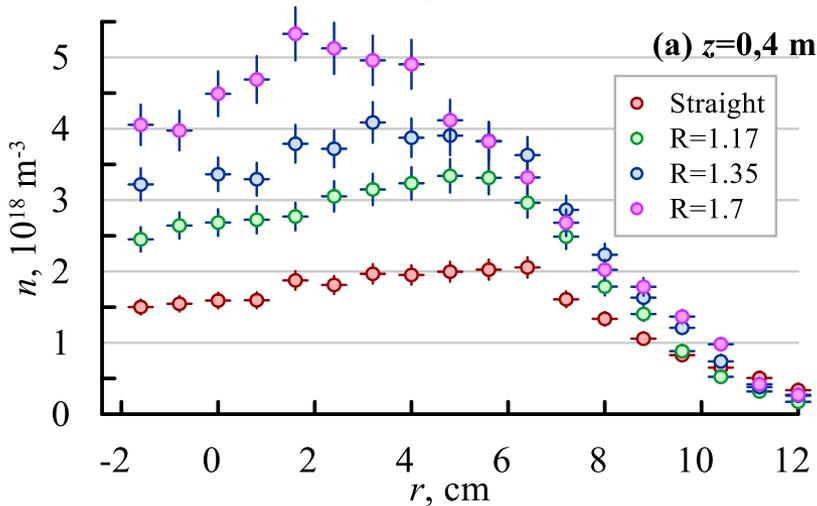


Винтовое поле, $R_{mean} = 1.35$:

$$R_{eff} = 8.8$$

Многопробочное поле, $R_{mm} = 1,31$:

$$R_{eff} = 6.5$$



Винтовое поле,

$$R_{mean} = 1.17:$$

$$R_{eff} = 6.3$$

$$R_{mean} = 1.35:$$

$$R_{eff} = 8.8$$

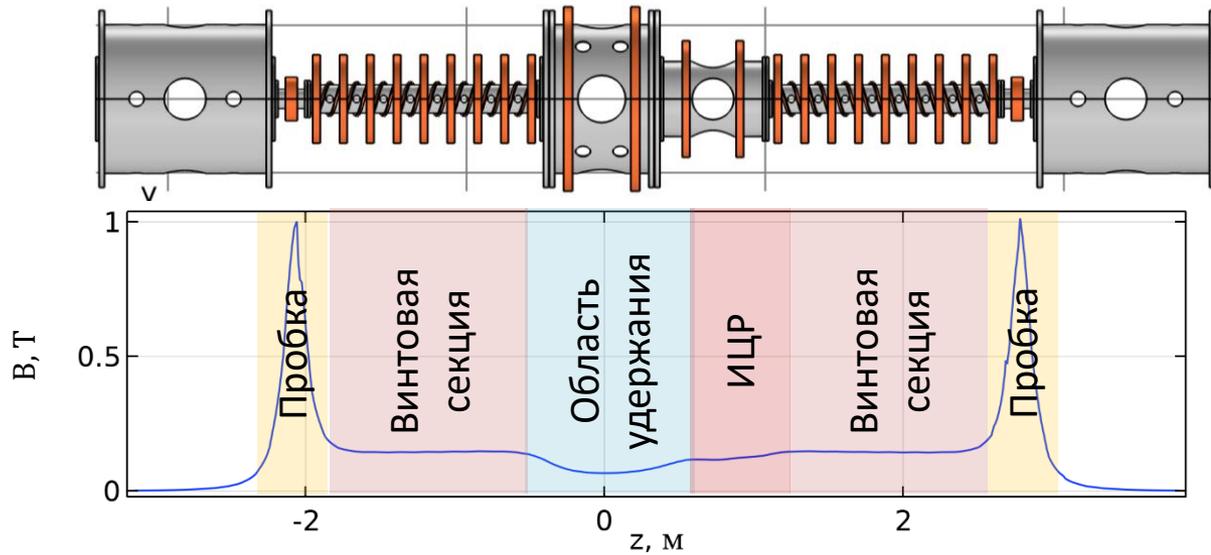
$$R_{mean} = 1.7:$$

$$R_{eff} = 17.2$$

Как многопробочная, так и винтовая конфигурация улучшают удержание.

При равной длине и глубине гофрировки винтовая секция эффективнее.

Винтовое удержание: дальнейшие задачи



Сверху: предложенная конфигурация эксперимента на установке СМОЛА

Нужны ли винтовые пробки для больших открытых ловушек?

Расчётное подавление сравнимо с многопробочной секцией при $L \sim (10-20) \cdot h$.

Возможна ли работа при безразмерной столкновительности $\nu^* \ll 1$?

Для «редкой горячей» плазмы необходима аномальная столкновительность.

Можно ли совместить винтовые и обычные пробки?

Будет ли эффективность комбинации различных пробок выше, чем эффективность каждой из пробок по отдельности?

Работы по УТС в лаборатории 10:

- ❖ Развитие физики многопробочного удержания.
 - ❖ Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ.
 - ❖ Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка.
- ❖ Физика и технологии термоядерного реактора:
 - ❖ **Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.**
 - ❖ Взаимодействие плазмы с поверхностью.

Работы по проекту ИТЭР



china eu india japan korea russia usa



What It Takes To Light A Star

Работы по проекту ИТЭР



ИТЭР:
7 участников, 35 стран
Участие России 9%, доступ и возможность использования
всей интеллектуальной собственности

ИТЭР защищен от санкций специальным межправительственным
соглашением, ратифицированным парламентами.
Решения принимаются единогласно.

What it takes To Light A Star

Работы по проекту ИТЭР

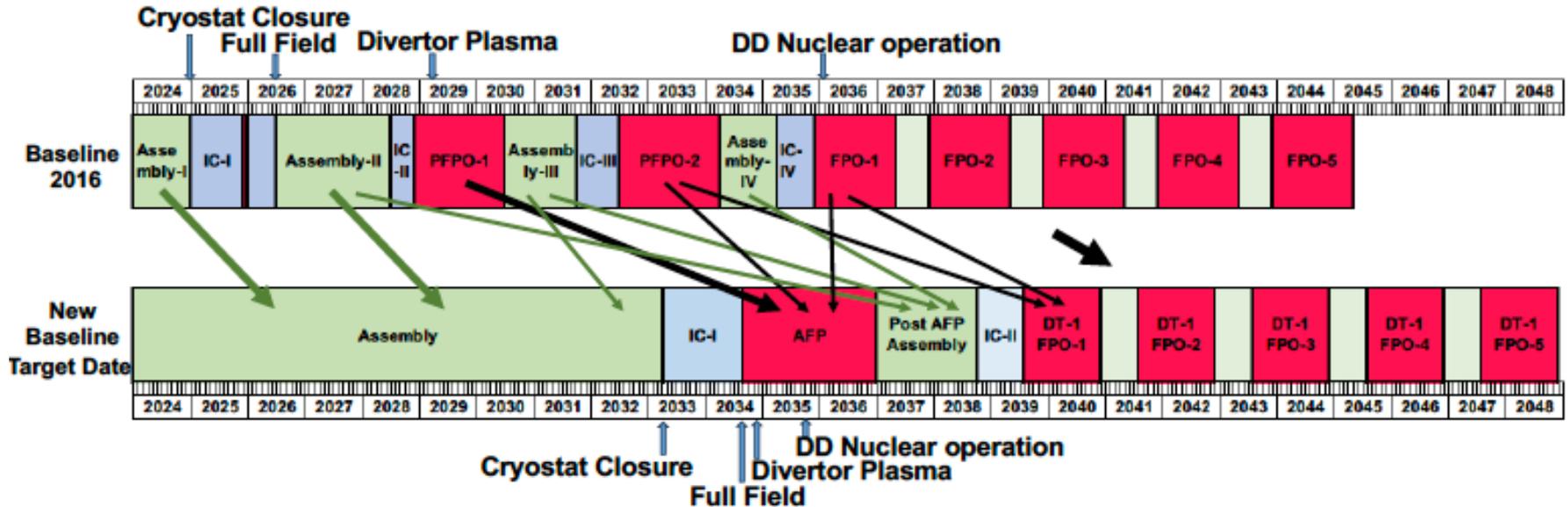
В 2023 году Россия полностью выполнила свои обязательства



10 февраля 2023 г. Российская сверхпроводящая катушка полоидального поля PF1 прибыла к месту сооружения первого в мире международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР.

Работы по проекту ИТЭР

Новый план сооружения ИТЭР

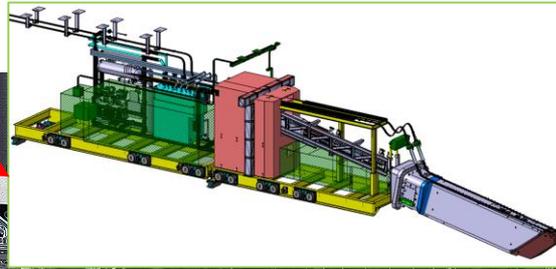


- В плане работ исключена «первая плазма», а сразу собирается конфигурация, пригодная для проведения DD экспериментов.
- DT программа практически не сдвигается.
- Планируется переход на вольфрамовую первую стенку (с покрытием?).

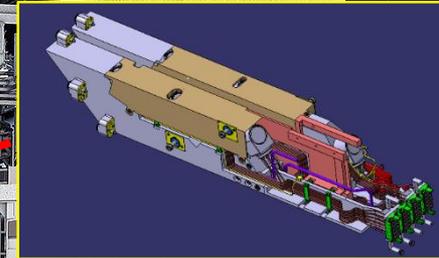
Работы по проекту ИТЭР

ИЯФ СО РАН ведет следующие работы по проекту ИТЭР:

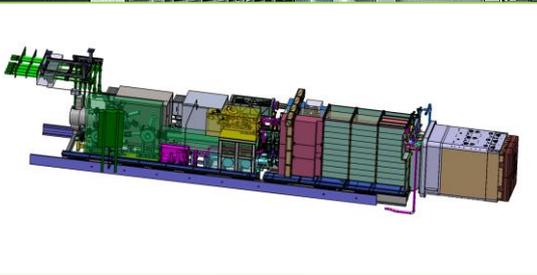
Верхний
диагностический порт – 3
шт



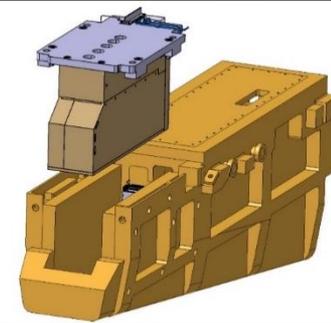
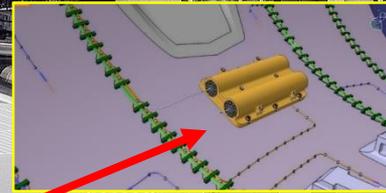
Вертикальная
нейтронная камера – 1
шт (две части)



Экваториальный
диагностический порт – 1 шт



Диверторный монитор
нейтронного потока – 3 шт



china eu india japan korea russia usa



Работы по проекту ИТЭР

Анализатор частиц перезарядки

Внутри вакуумная часть (внутри ДЗМ):

- коллиматор (центральная секция на фото), 5 шт. – **95%** готовности;
- защита коллиматора (по бокам на фото, 10 шт. – **100%** готовности.



коллиматоры

защита

хранение в чистом помещении

Работы по проекту ИТЭР

Диагностический экваториальный порт №11

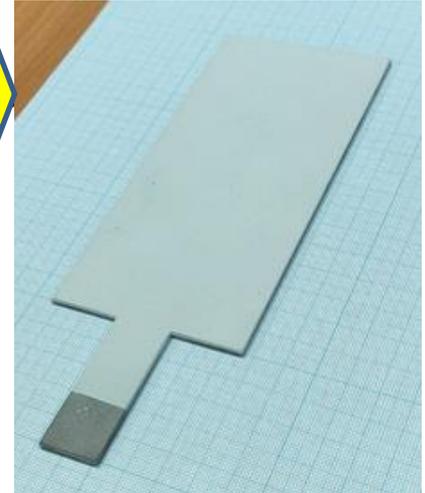
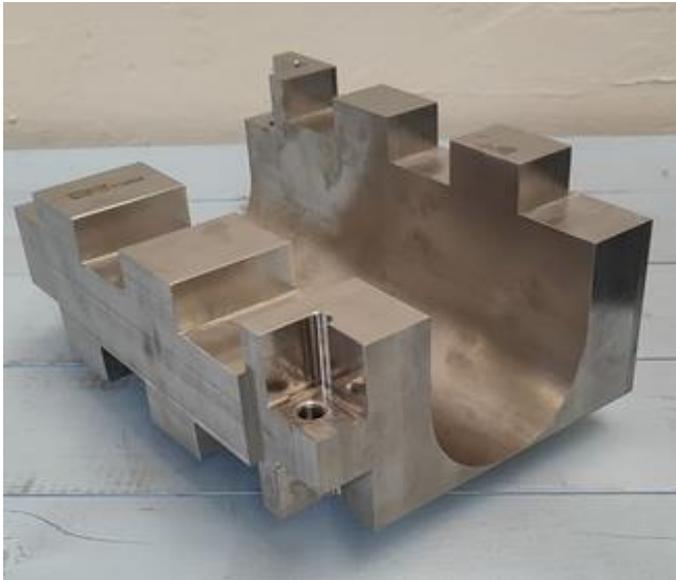
- выполнено основное глубокое сверление в диагностическом защитном модуле №2;
- выполнен макет нейтронной защиты со сложным внутренним отверстием;



Работы по проекту ИТЭР

Диагностический экваториальный порт №11

- выполнен НИР по изучению возможности нанесения защитных покрытий на нейтронную защиту и изучения их механических и вакуумных свойств (изучение уровня поглощения излучения будет проводиться в этом году);
- изготовлена нейтронная защита, 2 шт. – **100%** готовности;



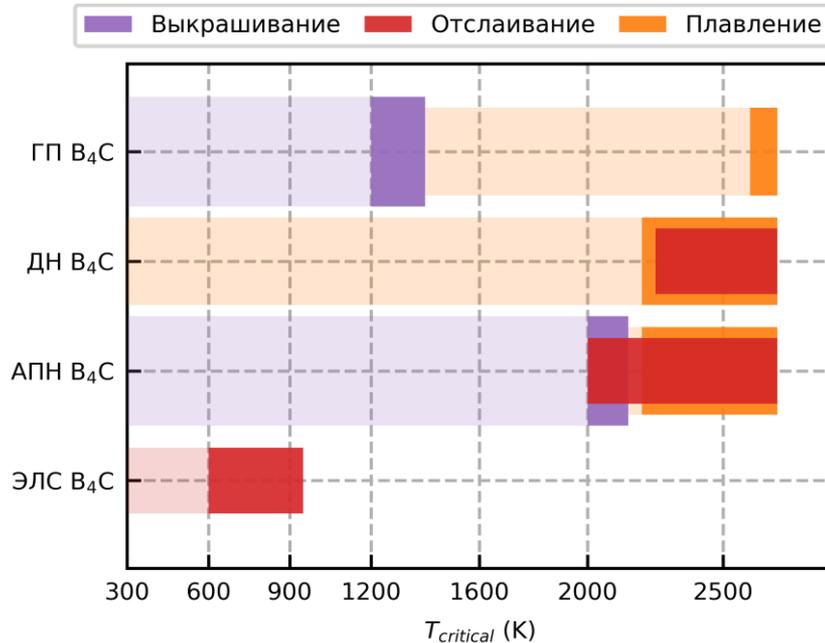
Работы по УТС в лаборатории 10:

- ❖ Развитие физики многопробочного удержания.
 - ❖ Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ.
 - ❖ Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка.
- ❖ Физика и технологии термоядерного реактора:
 - ❖ Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.
 - ❖ **Взаимодействие плазмы с поверхностью.**

Взаимодействие плазмы с поверхностью

На установке БЭТА изучаются свойства новых материалов – керамика и керамические покрытия – в качестве материалов первой стенки реактора (мотивация – ГДМЛ, ТРТ и возможно ИТЭР).

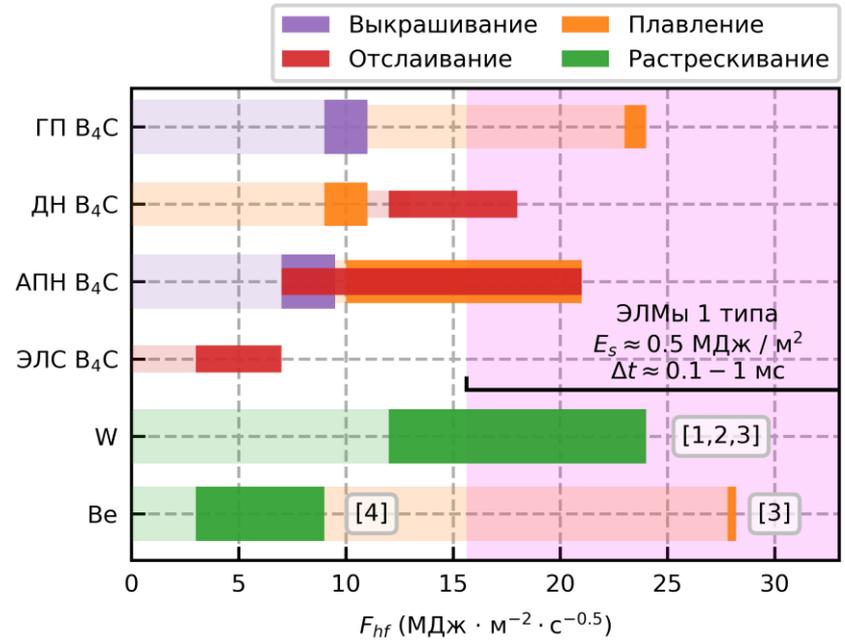
Критическая температура



- ГП - Горячее прессование
- ДН - Детонационное напыление
- АПН - Атмосферное плазменное напыление
- ЭЛС - Электронно-лучевой синтез

- Результаты, полученные во время испытаний покрытий из В₄С в ИЯФ СО РАН, ТРИНИТИ и НИИЭФА, продемонстрировали перспективность продолжения исследований возможности применения керамик в качестве обращенных к плазме материалов токамаков. Вольфрамовые образцы с покрытиями, нанесенными методом детонационного напыления, будут испытаны в токамаках EAST и K-STAR.

Критический параметр потока тепла F_{hf}



1. A. Huber et al., Physica Scripta, v.2014, n. T159 (2014), 014005
2. L. N. Vyacheslavov et al. Journal of Nuclear Materials, v. 544 (2021), 152669
3. G. Pintsuk et al., Fusion Engineering and Design, v. 82, n. 15 (2007), 1720-1729
4. B. Spilker et al., Nuclear Materials and Energy, v. 12 (2017), 1184-1188

Результаты испытаний покрытий из карбида бора термическими ударами, ожидаемыми в диверторной зоне токамака ИТЭР

Расширение возможностей эксперимента

Импульсно-периодический электронный пучок:
изучение усталостной стойкости тугоплавких материалов при количестве импульсов $\geq 10^7$ (совместно с 5 лабораторией).

Лазерный нагрев :

- импульсный лазер;
- волоконный лазер (непрерывный, импульсный и импульсно-периодический режимы).

Плазменная нагрузка:
готовятся эксперименты на геликонном источнике (лаборатория 9-0)

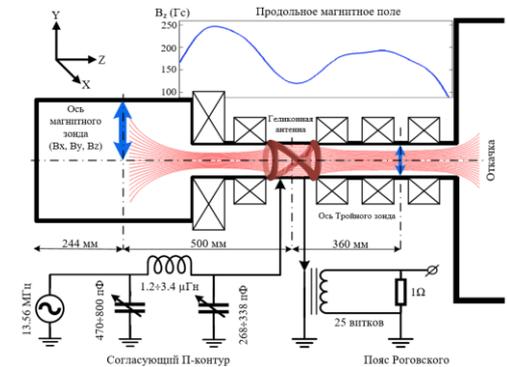
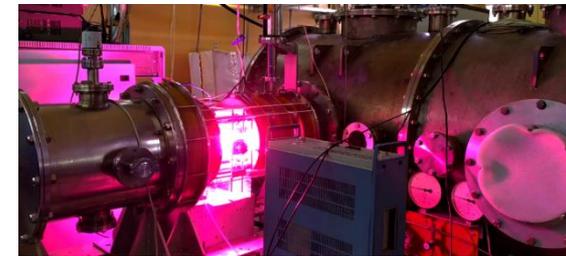
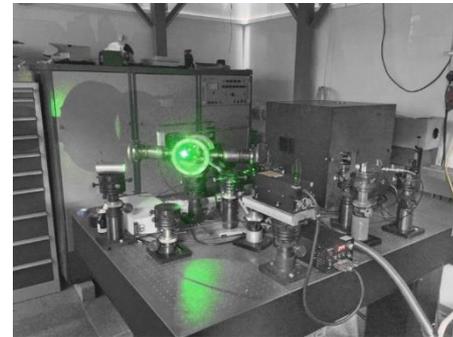


Схема геликонного источника



Геликонный разряд при 25 кВт входной мощности



Параметры пучка:

- Энергия до 20 кВ;
- Ток до 10 А;
- Длительность от 10 мкс до 20 мс;
- Частота до 20 Гц.

Также начато исследование новых керамических материалов для первой стенки на станциях СИ на ВЭПП-3 и ВЭПП-4.

Заключение

Работы по УТС в лаборатории 10:

- ❖ Развитие физики многопробочного удержания.
 - ❖ Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ. В 2023 году переведена в многопробочную конфигурацию. Цель 2024 года – улучшенное удержание плазмы.
 - ❖ Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка. Ведется детальное изучение удержания плазмы спиральной многопробочной системой. Начаты работы по апгрейду установки.
- ❖ Физика и технологии термоядерного реактора:
 - ❖ Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР. Стадия производства.
 - ❖ Взаимодействие плазмы с поверхностью. На установке БЕТА показана перспективность керамических материалов в качестве материалов первой стенки реактора. Расширяются экспериментальные возможности – эксперименты с лазерным нагревом, новый электронный пучок, геликонный источник плазмы.

Спасибо за внимание!