

# ***Комплекс ГОЛ-3***

*А.В.Бурдаков*

*от имени команды*

# Введение

---

## *Работы лаборатории:*

- ❖ *Физика и технологии термоядерного реактора: Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.*
- ❖ *Создание импульсной модели ГДМЛ: установка ГОЛ-NB.*
- ❖ *Разработка новых методов удержания в открытых системах: спиральная многопробочная ловушка СМОЛА.*
- ❖ *Разработка мощных электронных пучков, изучение их взаимодействия с плазмой и поверхностью и генерации электромагнитного излучения.*

*Проекты : ГДМЛ, ИТЭР, ЛИУ, 6 РНФ+РФФИ*

# Введение

---

## Работы лаборатории:

- ❖ **Физика и технологии термоядерного реактора: Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.**
- ❖ *Создание импульсной модели ГДМЛ: установка ГОЛ-NB.*
- ❖ *Разработка новых методов удержания в открытых системах: спиральная многопробочная ловушка СМОЛА.*
- ❖ *Разработка мощных электронных пучков, изучение их взаимодействия с плазмой и поверхностью и генерации электромагнитного излучения.*

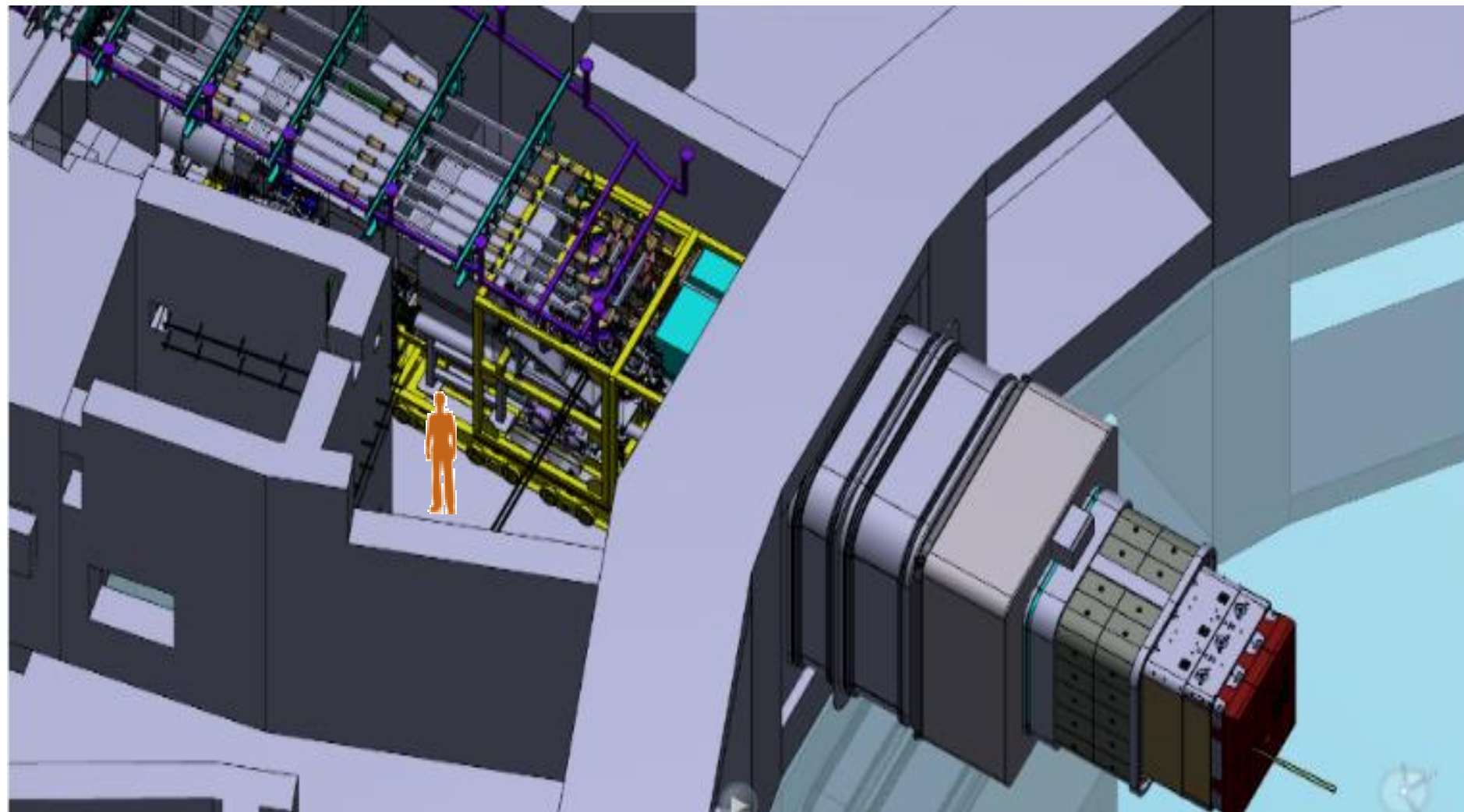
**Проекты : ГДМЛ, ИТЭР, ЛИУ, 6 РНФ+РФФИ**

*Первая плазма планируется в 2025 году*









**Экваториальный порт №11**

**ИЯФ – интегратор (более 20 организаций из 6 стран)**

# ИЯФ для ИТЭР



*ИЯФ делает порт-плаги для диагностики плазмы*



*ВП № 2, 7, 8*

*ЭП №11*



- UPP = 25 tons (like battle tank T-34/76)
  - EPP = 45 tons (like battle tank T-80)
- (but tanks have large tracks to spread load, PPs have only 4 small skids)

*ЭП №11 должен стоять на ИТЭР к первой плазме, без него ИТЭР не заработает*



# ИЯФ для ИТЭР

Сборочная площадка порт-плаггов в ИЯФ

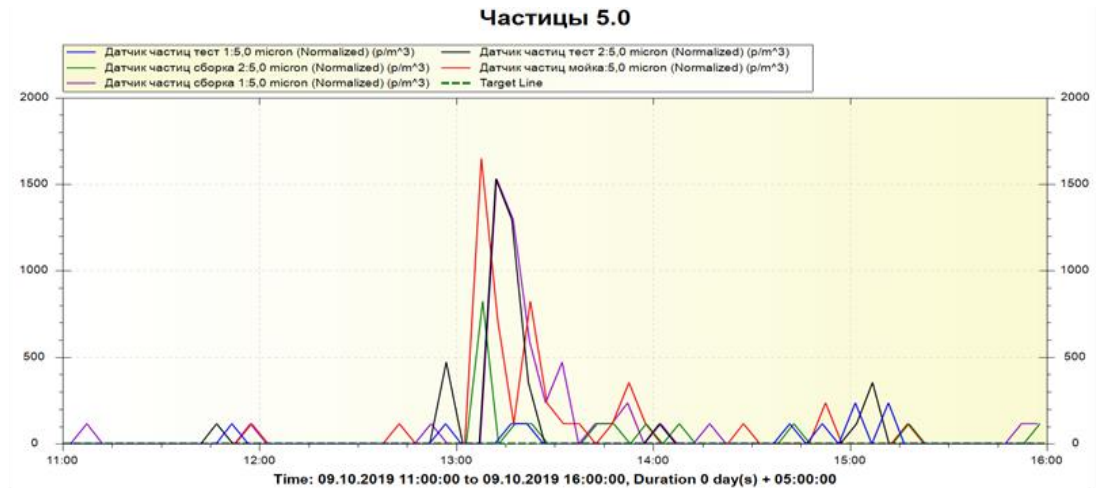
Январь 2018



# ИЯФ для ИТЭР



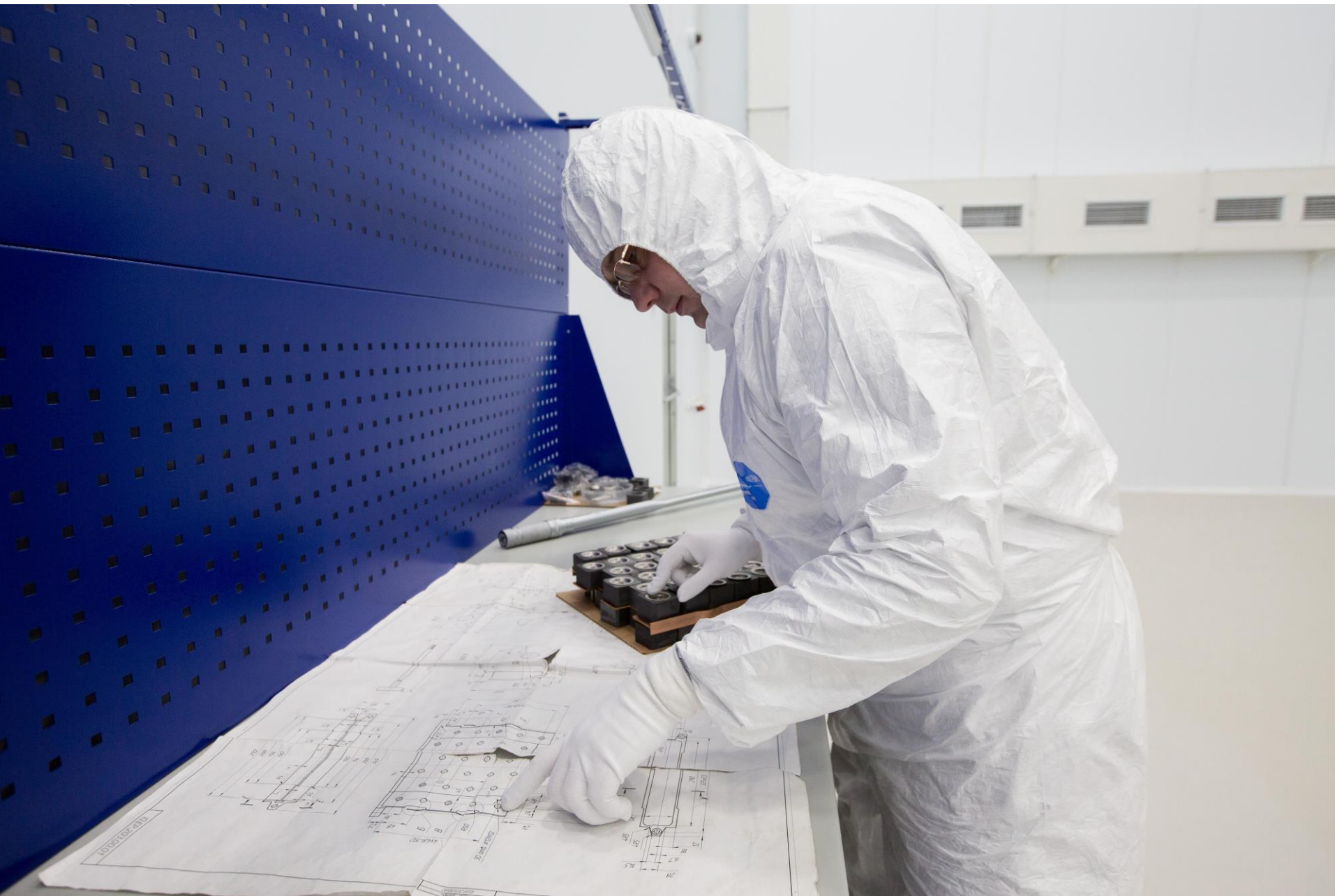
Для приема оборудования из многих стран мира, сборки, тестирования и монтажа диагностик создана интергационная площадка, способная работать с крупногабаритными, весом до 80 тонн, устройствами. Этот стенд удовлетворяет требованиям ядерного регулятора по чистоте воздуха и многим другим параметрам.



Зависимость числа частиц пыли в  $m^{-3}$  на интеграционной площадке от времени. В 13:00 бригада зашла в одно из помещений, затем в 13:20 - в другое. Во время нахождения людей концентрация пыли увеличивается, но не превышает предельного значения для заданного класса помещения ( $3000 \text{ частиц}/m^3$ )

ИЯФ СО РАН создан уникальный стенд для тестирования элементов термоядерного реактора, размером  $30 \times 40 \text{ м}^2$ , способный работать с высокотехнологичным оборудованием весом до 80 тонн при поддержании чистоты помещения не хуже 7 класса.

# ИЯФ для ИТЭР



# Введение

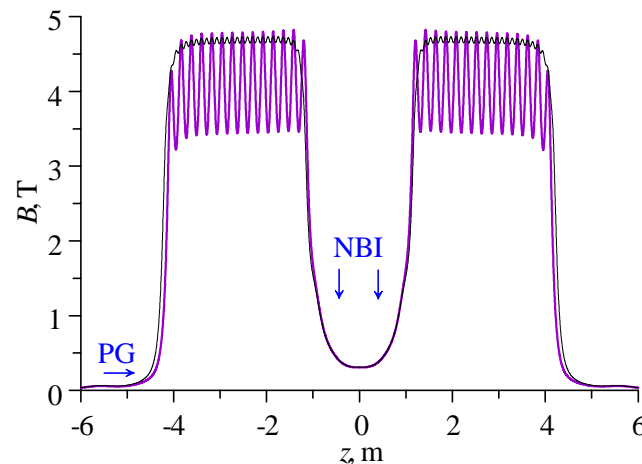
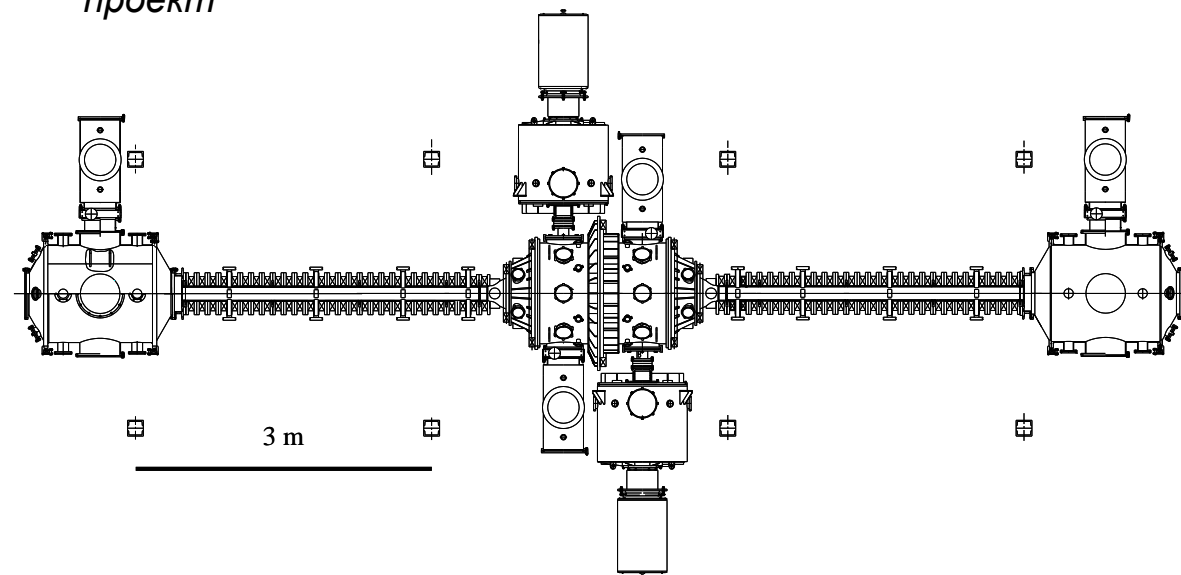
---

## Работы лаборатории:

- ❖ *Физика и технологии термоядерного реактора: Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.*
- ❖ **Создание импульсной модели ГДМЛ: установка ГОЛ-НВ.**
- ❖ *Разработка новых методов удержания в открытых системах: спиральная многопробочная ловушка СМОЛА.*
- ❖ *Разработка мощных электронных пучков, изучение их взаимодействия с плазмой и поверхностью и генерации электромагнитного излучения.*

**Проекты : ГДМЛ, ИТЭР, ЛИУ, 6 РНФ+РФФИ**

проект



## Основная цель создания установки

создание технологии подавления продольных потерь частиц и энергии из открытых ловушек с плазмой реакторного класса.

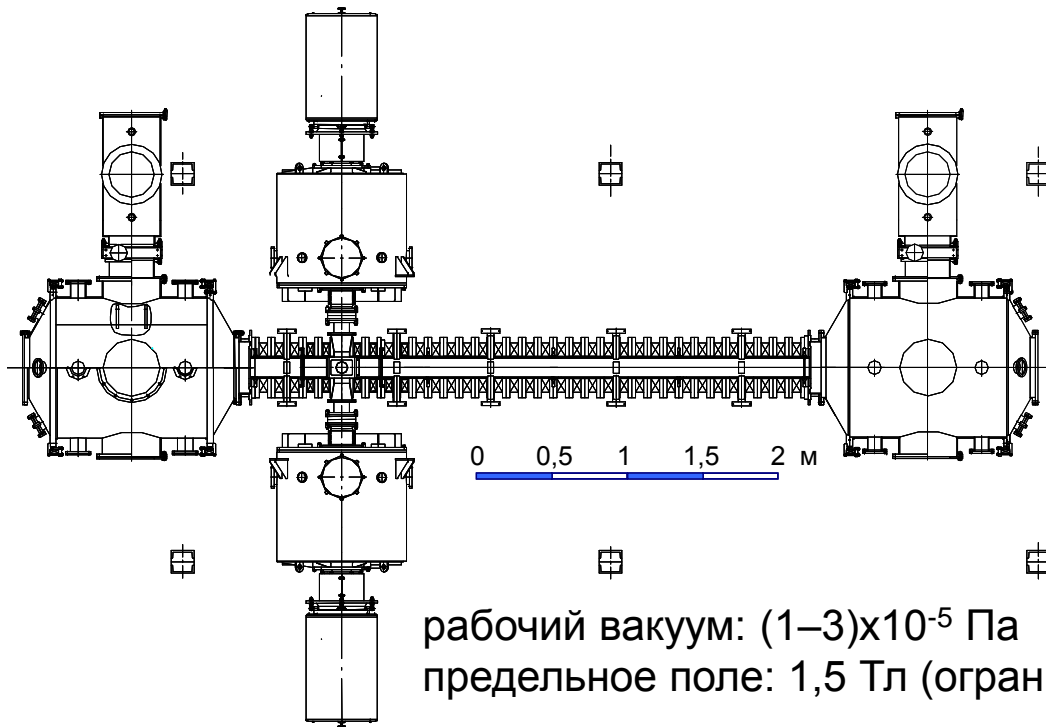
**Нагрев плазмы:** нейтральная инжекция  $2 \times 0.75$  МВт при энергии 25 кэВ

**Параметры плазмы (базовый сценарий):** плотность  $3 \times 10^{19}$  м<sup>-3</sup>

температура от **30** эВ (режим ГДЛ) до **100** эВ (при многопробочном удержании)

**Начало проектирования:** осень 2014 г.

# Стартовая конфигурация



без центральной ловушки  
 половина магнитной системы  
 временные катушки расширителей  
 минимальный набор диагностик  
 временное электропитание



рабочий вакуум:  $(1-3) \times 10^{-5}$  Па  
 предельное поле: 1,5 Тл (ограничение по насосам)

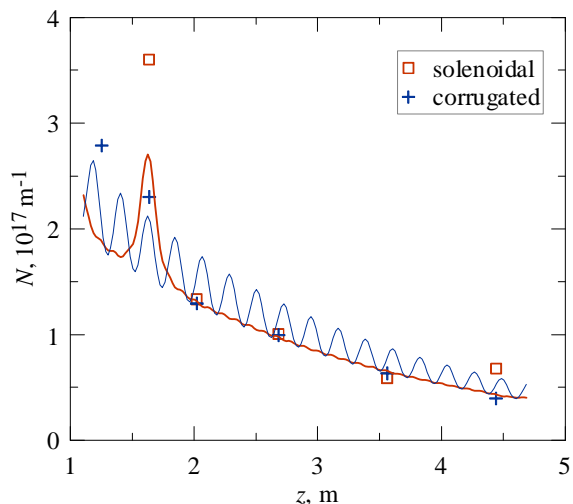


20.07.2017

- основная техническая задача: отладка различных систем установки
- основные физические задачи:
  - транспортировка стартовой плазмы через секцию сильного поля;
  - оптимизация конфигурации потенциалов на внутрикамерных электродах;
  - сравнение течения столкновительной плазмы в однородном и гофрированном магнитном поле (впервые проверено предсказание 1972 г);
  - «холодные» эксперименты по вводу электромагнитной волны 2,45 ГГц.

## Сравнение

соленоидальной и многопролочной конфигураций



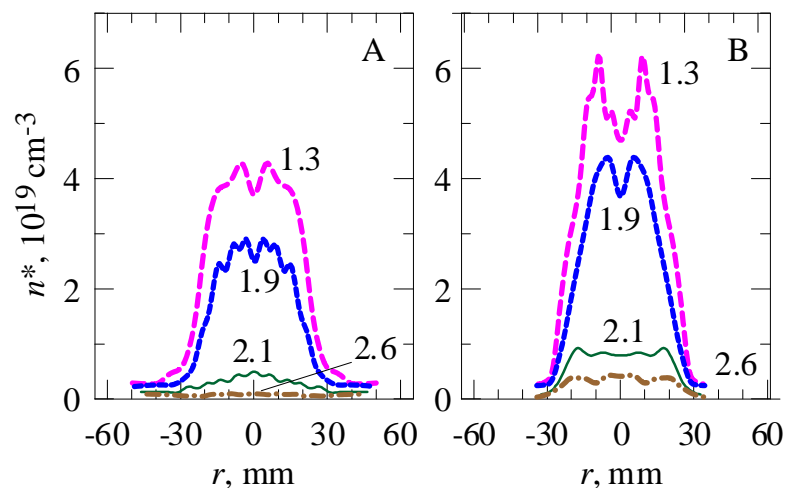
линии: течение несжимаемой жидкости

## Радиальные профили плотности

потенциал плазмодриемника:

плавающий

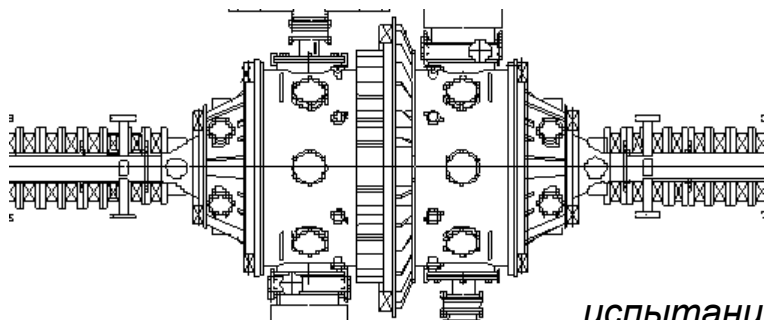
-46 В



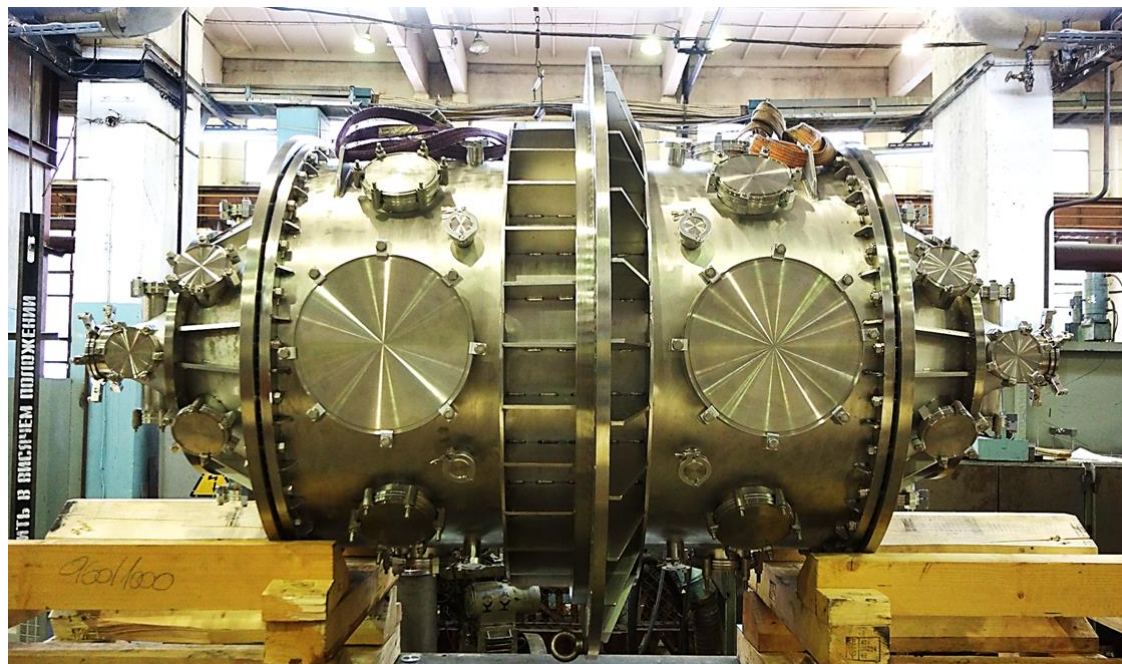
цифры: время в мс



- Все критически важные элементы установки готовы либо почти готовы.
- Сборка установки требует переноса эксперимента ВЕТА в КО-7 ДОЛ.



испытания в ЭП-1, 27.01.2020



в зале А зд. 20, 27.01.2020



# Введение

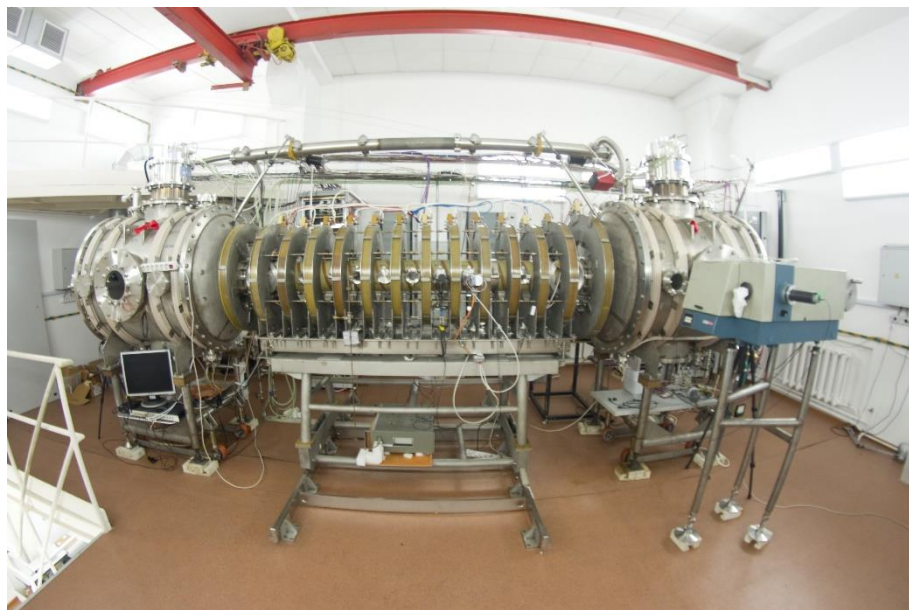
---

## Работы лаборатории:

- ❖ *Физика и технологии термоядерного реактора: Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.*
- ❖ *Создание импульсной модели ГДМЛ: установка ГОЛ-НВ.*
- ❖ **Разработка новых методов удержания в открытых системах: спиральная многопробочная ловушка СМОЛА.**
- ❖ *Разработка мощных электронных пучков, изучение их взаимодействия с плазмой и поверхностью и генерации электромагнитного излучения.*

**Проекты : ГДМЛ, ИТЭР, ЛИУ, 6 РНФ+РФФИ**

# Динамическое многопробочное удержание. Установка «СМОЛА»



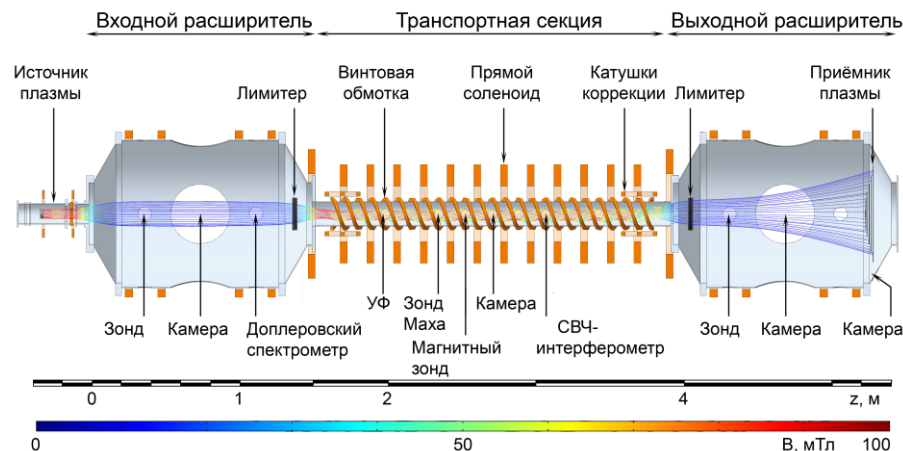
Установка «СМОЛА» создана в рамках «репутационного» гранта РФ. Физический запуск — конец 2017 года.

В 2019 году установка доведена до проектной конфигурации

Задача: проверка подавления потока вращающейся плазмы в винтовом магнитном поле.

**Апгрейды на текущий момент:**

- смонтирован весь прямой соленоид. Однородность поля в транспортной секции улучшена до 1–2%, рабочий диапазон по магнитному полю расширен вдвое (до 160 мТ),
- увеличена до 1.3 с длительность разряда.
- повышена газовая эффективность источника плазмы. Расширен диапазон рабочих плотностей, скорость вращения повышена до  $9 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$ .



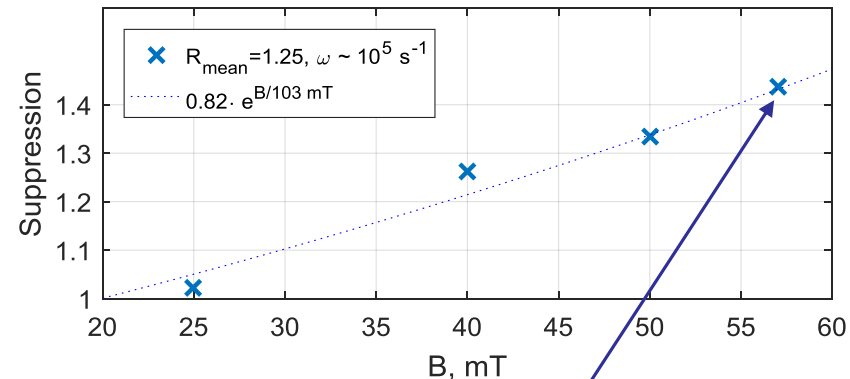
Диапазон всех экспериментальных параметров расширен.

# Динамическое многопробочное удержание. Результаты 2019 года.

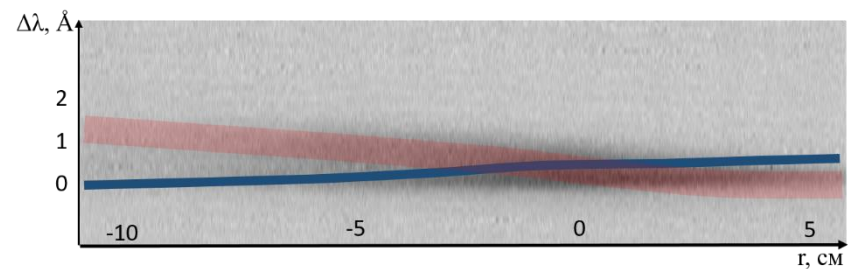
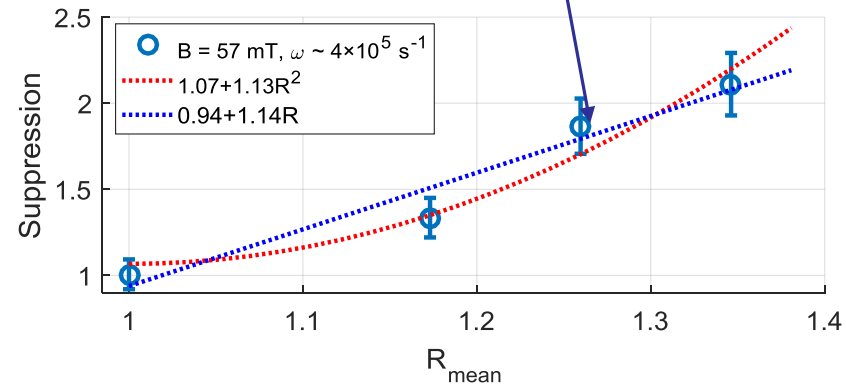
Длительность импульса 1,3 сек

Показан рост эффективности винтового удержания плазмы при независимом повышении среднего пробочного отношения, скорости вращения и ведущего магнитного поля.

- (а) Зависимость эффективности подавления от величины магнитного поля.
- (б) Зависимость эффективности подавления от пробочного отношения.
- (в) Одновременное наблюдение смещённой (вращающаяся плазма) и несмещённой (нейтральный фон) линий  $\text{H}\alpha$ .



Одинаковые параметры,  
разная скорость



# Введение

---

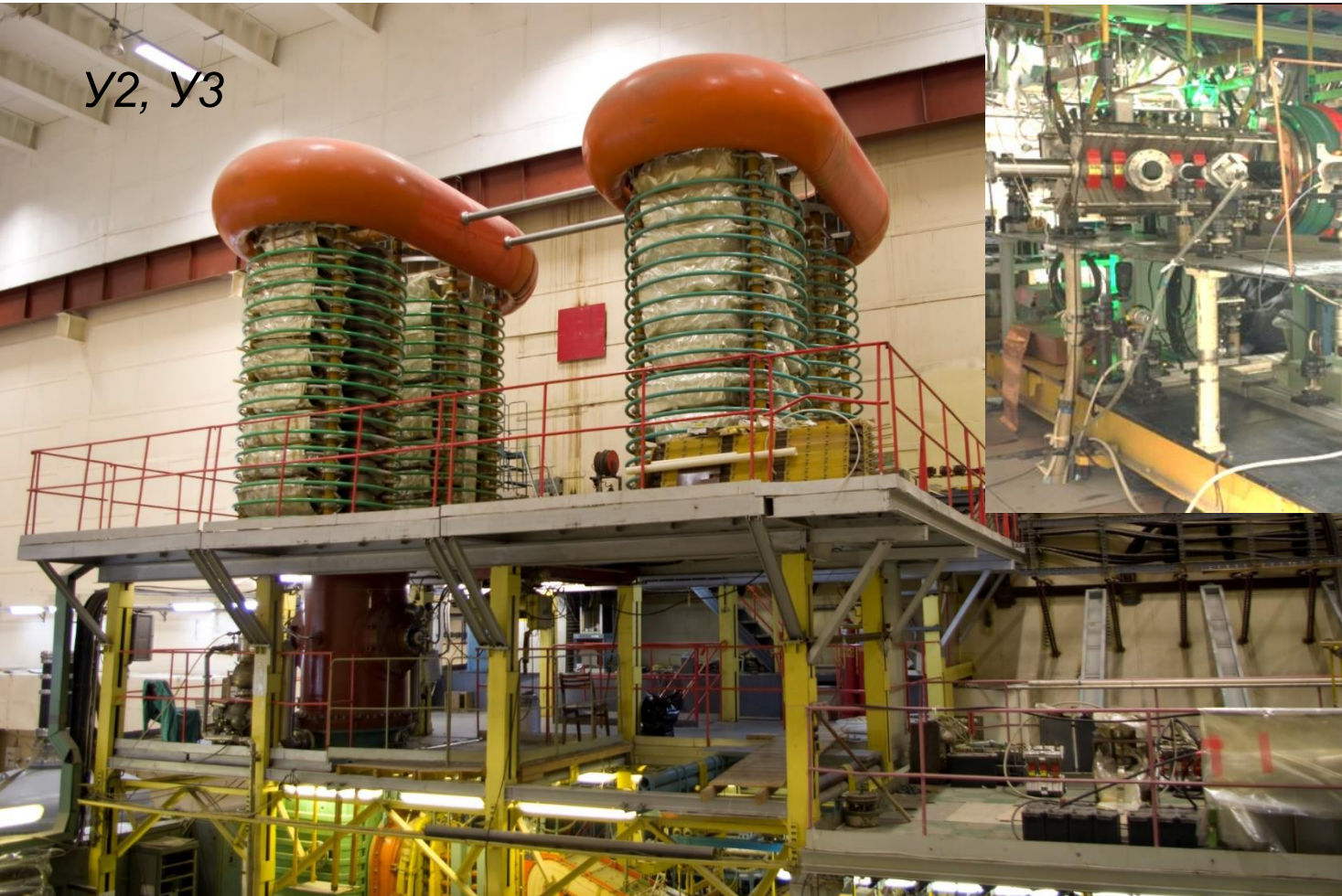
## Работы лаборатории:

- ❖ *Физика и технологии термоядерного реактора: Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.*
- ❖ *Создание импульсной модели ГДМЛ: установка ГОЛ-NB.*
- ❖ *Разработка новых методов удержания в открытых системах: спиральная многопробочная ловушка СМОЛА.*
- ❖ **Разработка мощных электронных пучков, изучение их взаимодействия с плазмой и поверхностью и генерации электромагнитного излучения.**

**Проекты : ГДМЛ, ИТЭР, ЛИУ, 6 РНФ+РФФИ**

# Мощные электронные пучки

У2, У3

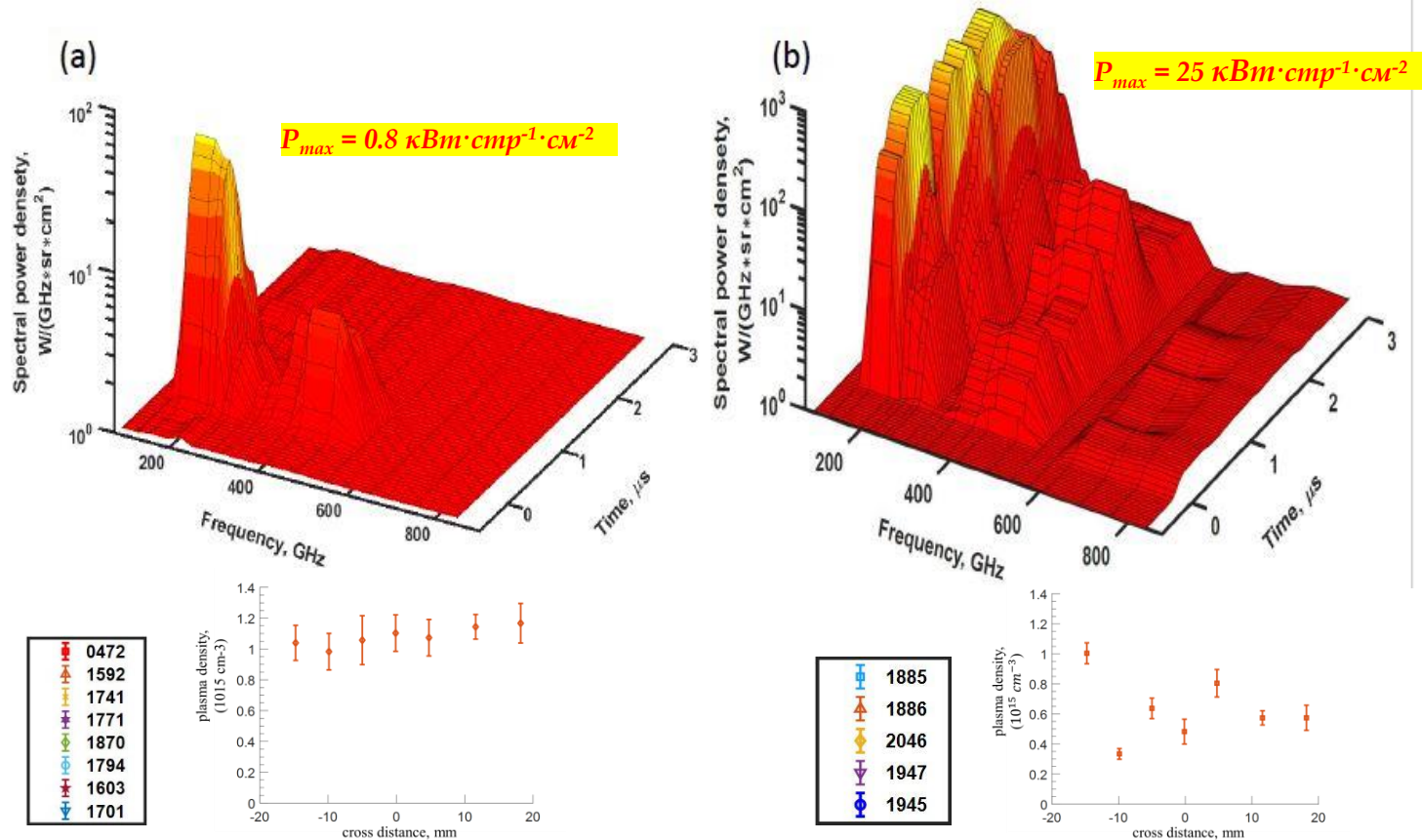


*Коллективное взаимодействие пучков с плазмой, генерация электромагнитного излучения  
Взаимодействие пучков с веществом, испытание материалов  
Использование накопленных знаний для ЛИУ*

# Генерация субмм излучения (У-2)

Повышение радиальных градиентов плотности плазмы даёт рост спектральной плотности субмм излучения более чем в 30-ть раз (эксперименты ГОЛ-ПЭТ)

Ток пучка - 10 кА, энергия электронов - 0.6÷0.8 МэВ, длительность – 5 мкс, магнитное поле - 4 Т, плотность плазмы – 0.7÷1.5х 10<sup>15</sup> см<sup>-3</sup>



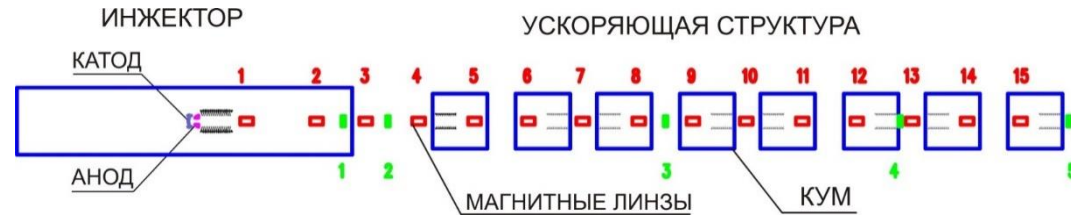
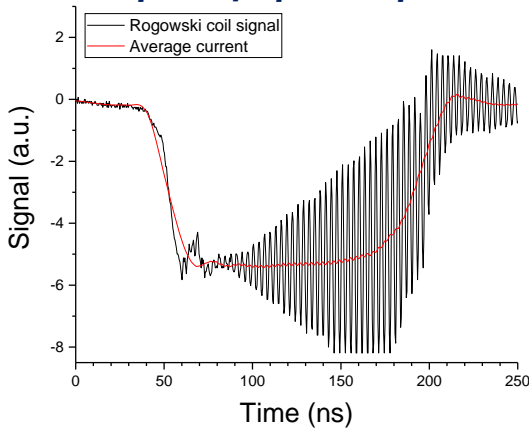
**Публикации:** Arzhannikov A. V., Burmasov V.S., Ivanov I.A., et al. 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). – IEEE, 2019, A.V. Arzhannikov, I.A. Ivanov, A.A. Kasatov, et al., In Plasma Phys. Control. Fusion (2019).

# Поперечная неустойчивость пучка в ЛИУ

- Создан пакет программ, позволяющий рассчитывать возбуждение неустойчивости в реальной геометрии ускорителя ЛИУ
- Проведены «холодные» измерения собственных мод ускоряющего модуля

ЛИУ-5

Осциллограмма сигнала с трансформатора тока



Задачи исследования:

1. Каков механизм развития неустойчивости пучка при ускорении в ЛИУ?
2. Как подавить эти колебания?

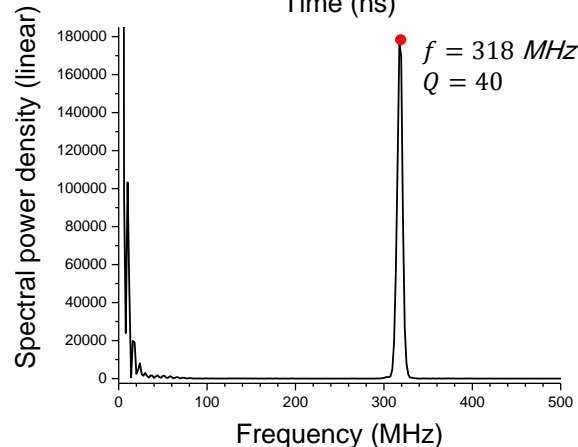
**Поперечная неустойчивость пучка (Beam Break Up Instability)\***

- Механизм возбуждения данной неустойчивости обусловлен взаимодействием пучка с дипольными модами ускорительных модулей. Под действием полей этих мод пучок колеблется как целое относительно оси.
- Неустойчивость имеет конвективный характер, то есть амплитуда колебаний пучка нарастает экспоненциальным образом вдоль ускорителя.

**Смещение пучка в ЛИУ в результате развития BBU неустойчивости:**

$$\xi(z) = \xi_0 \left[ \frac{\gamma_0}{\gamma(z)} \right]^{1/2} \exp \left[ \frac{I_b [kA] N_g Z_{\perp} [\Omega / m]}{3 \cdot 10^4 \langle B [kG] \rangle} \right], \quad Z_{\perp} = \frac{Q \left( \int B_{\perp} dz \right)^2}{\omega 2U}$$

\*V. K. Neil, L. S. Hall and R. K. Cooper "Further theoretical Studies of the Beam Breakup Instability", Particle Accelerators, 1979, Vol. 9, pp. 213-222.

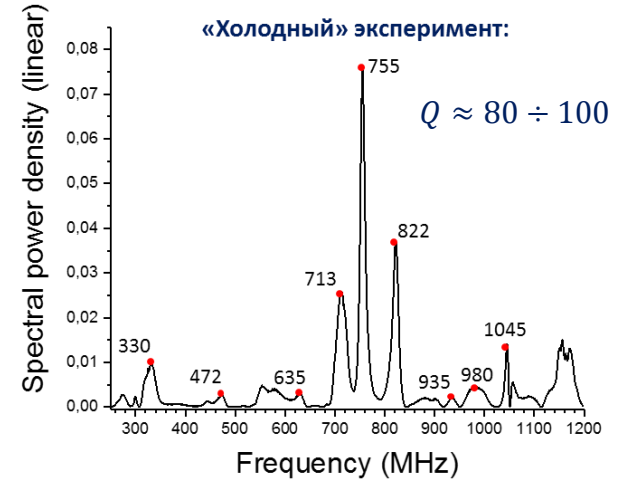
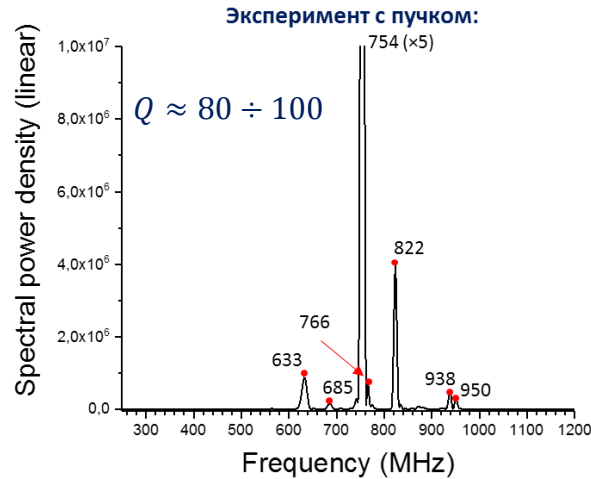
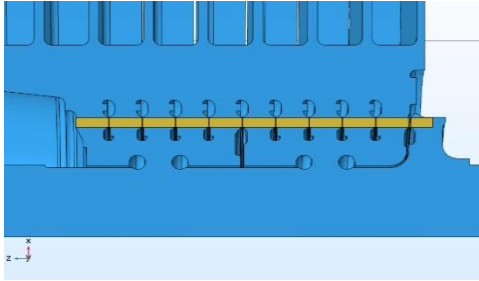




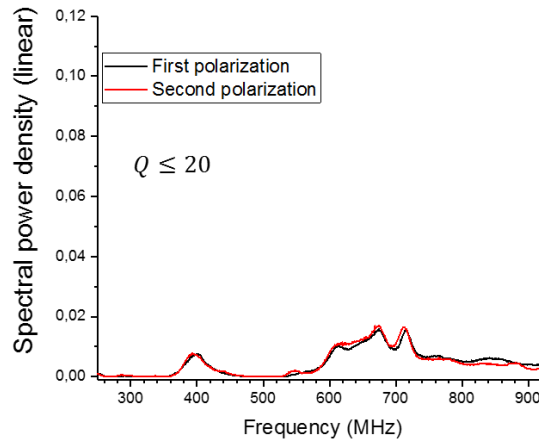
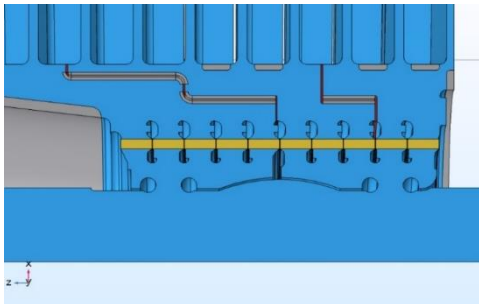
# Поперечная неустойчивость пучка в ЛИУ

## Методы подавления неустойчивости

### 1. Применение экранирующих электродов для уменьшения коэффициента связи колебаний с пучком



### 2. Применение поглотителей полей дипольных мод для снижения их добротностей



- Достигнуто уменьшение добротностей основных дипольных мод до уровня  $Q \leq 20$

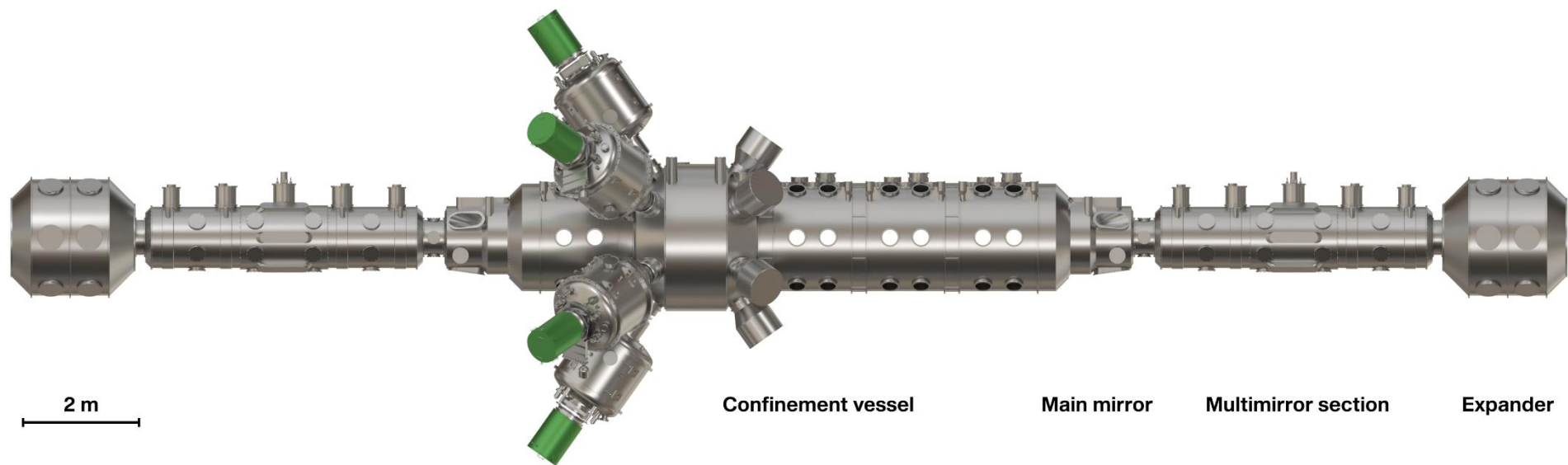
На ЛИУ-5 ВВУ подавлена, на ЛИУ-20 будет подавлена

## Заключение

---

- ИТЕР – ИЯФ развивается.
- ГОЛ-NB: Задачи работ в стартовой конфигурации полностью выполнены. Сборка установки в проектной конфигурации потребует несколько месяцев, затем-получение плазмы и начало экспериментов.
- Спиральная ловушка СМОЛА работает на набор результатов.
- Увлекательные результаты получены на установках с электронными пучками.

# *все и всё на ГДМЛ!*



*Спасибо за внимание*

**ИТЭР строится по графику**

