

Комплекс ГОЛ-3

А.В.Бурдаков

от имени команды

Введение

Проект ГДМЛ

(Газодинамическая Многопробочная Ловушка)

Инфраструктурный комплекс разработки новых технологий удержания термоядерной плазмы

Проект ГДМЛ подразумевает развитие существующих и строительство новых установок

Проект ГДМЛ дал толчок развитию комплекса ГОЛ-3

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.***
- ❖ ***Исследования взаимодействия пучков и плазмы с поверхностью : ВЕТА, станция СИ «Плазма», мишенная станция ЛИУ.***
- ❖ ***Мощные электронные генераторы У-2 и У-3 и установки ГОЛ-ЗТ и ЭЛМИ***
Коллективное взаимодействие пучков с плазмой, генерация электромагнитного излучения

ИТЭР строится по графику



ИЯФ для ИТЭР

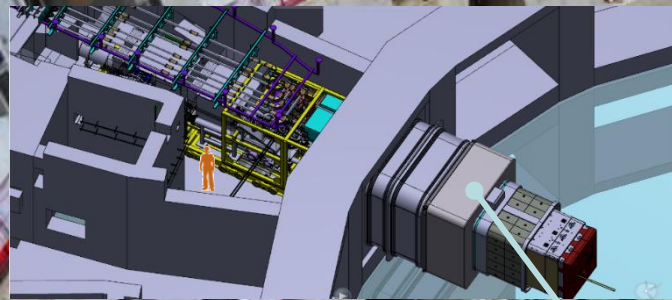
Первая плазма-2025 год



ИЯФ для ИТЭР

Первая плазма-2025 год

Верхние порты №02, 07,08 ИЯФ



Экваториальный порт-плаг №11: ИЯФ

Макет фронтальной части ДЗМ



ИЯФ для ИТЭР

Сборочная площадка порт-плаггов в ИЯФ

Январь 2018

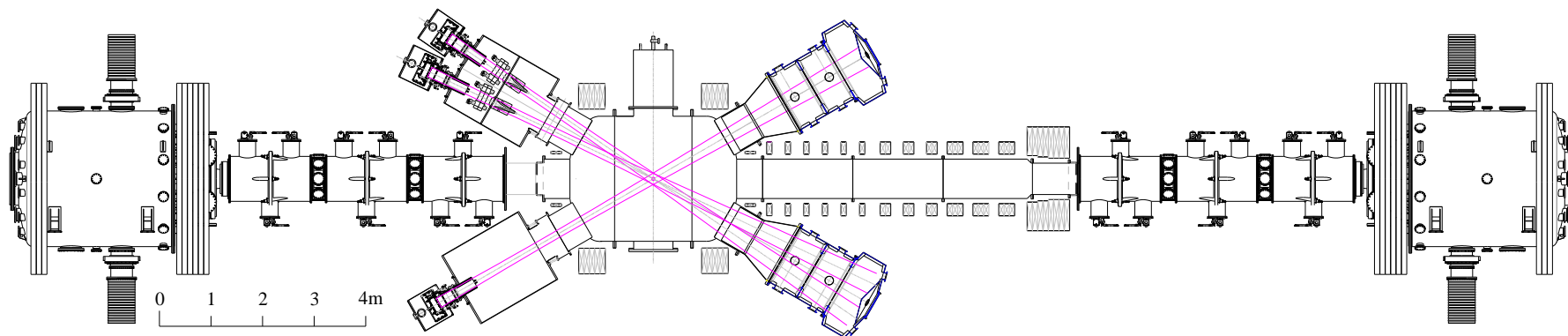


ИЯФ для ИТЭР

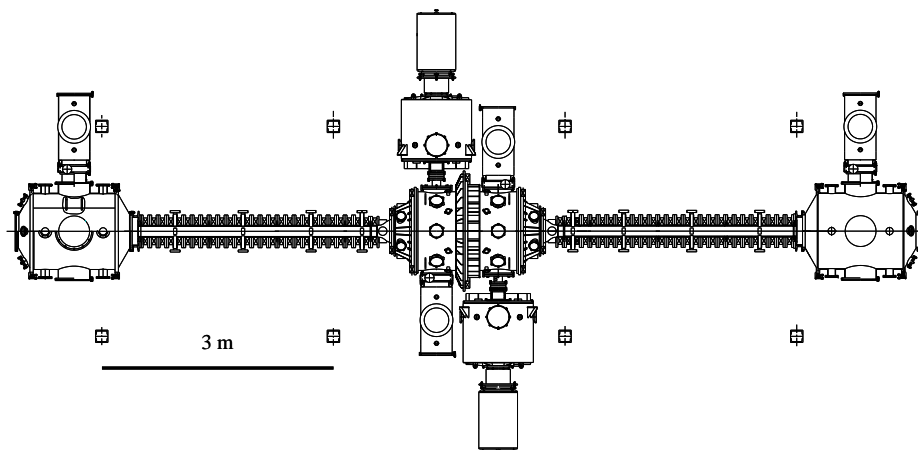
Январь 2019



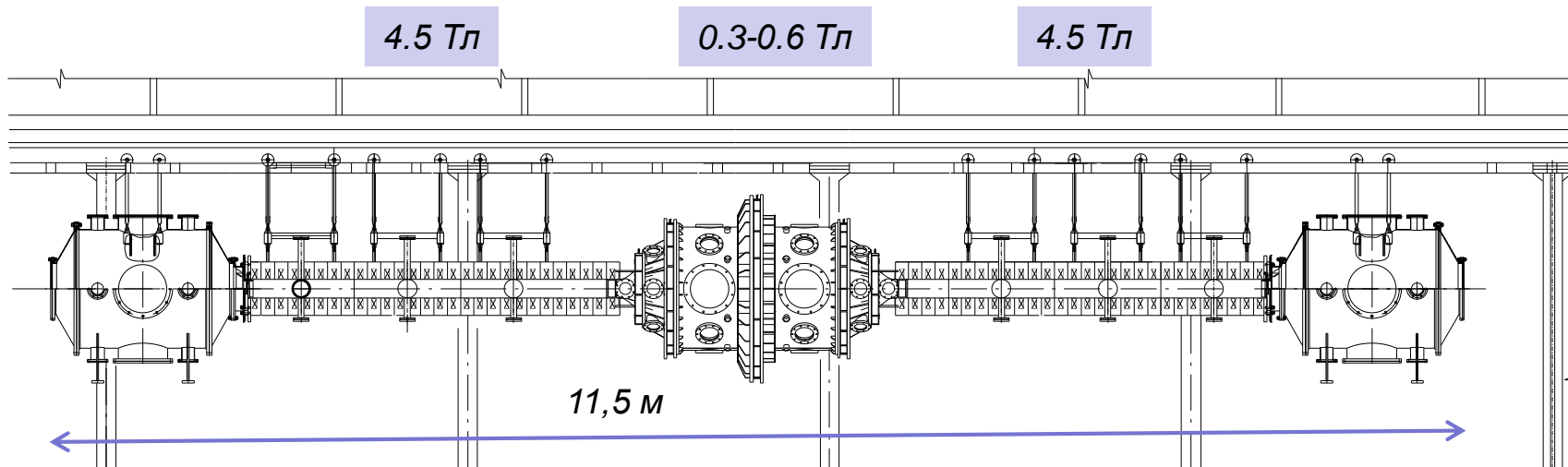
Проект ГДМЛ



Установка ГОЛ-NB-прообраз ГДМЛ



*В 3 раза короче,
импульсная*



Основная цель создания установки

Прямо и наглядно продемонстрировать, что качество удержания плазмы в установках типа ГДЛ и ГДМЛ может быть существенно улучшено (то есть получены более высокие параметры плазмы) при добавлении в магнитную структуру секций с многопробочным магнитным полем.

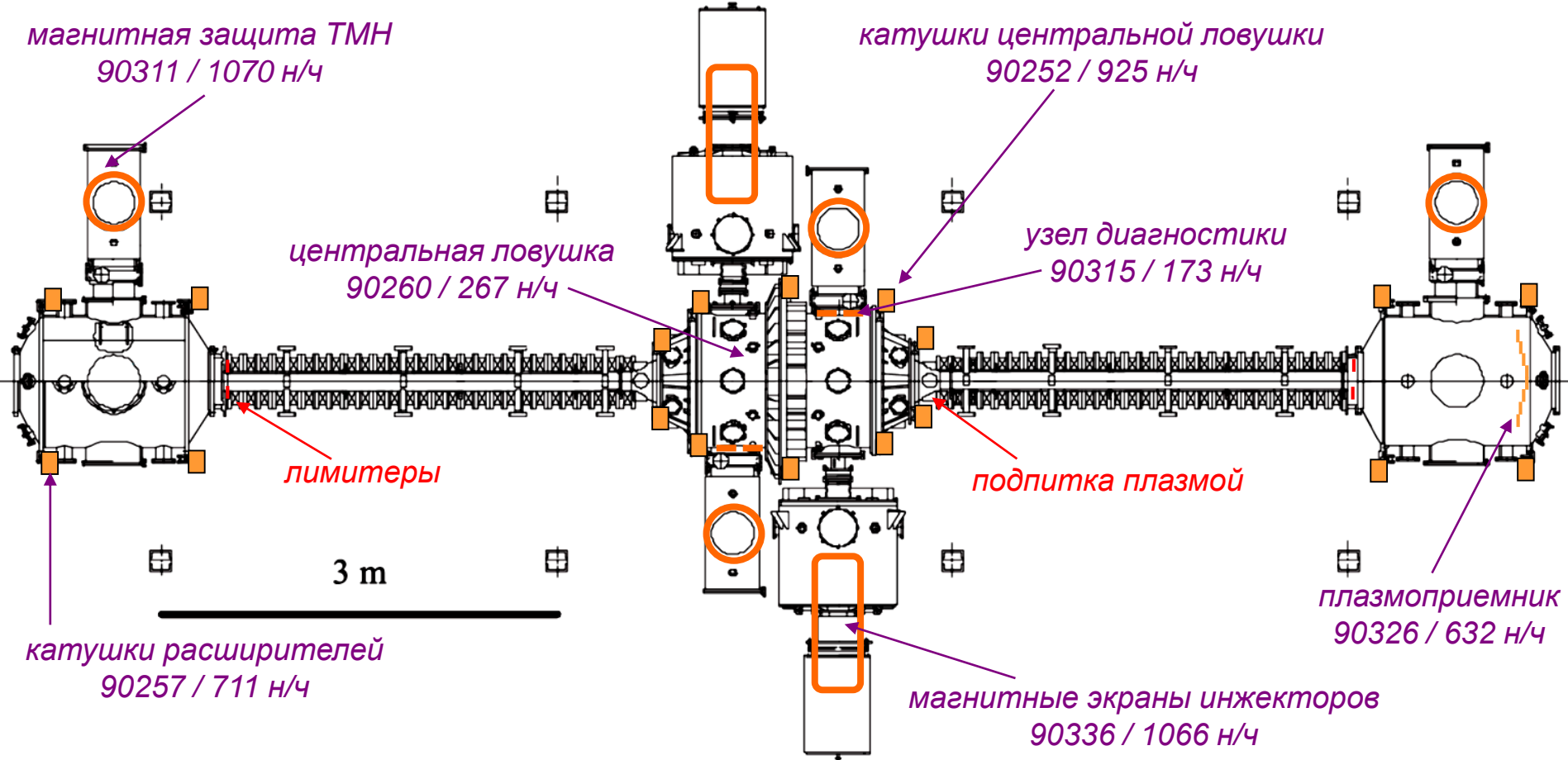
Нагрев плазмы: нейтральная инжекция $2 \times 0.75 \text{ МВт}$ при энергии 25 кэВ

Параметры плазмы (базовый сценарий): плотность $3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$

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

Начало проектирования: осень 2014 г.

ГОЛ-NB: состояние работ на 02.2019



Состояние дел (цвет):

в производстве ■

ожидает конструирования

Состояние дел (производство на 01.02.2019):

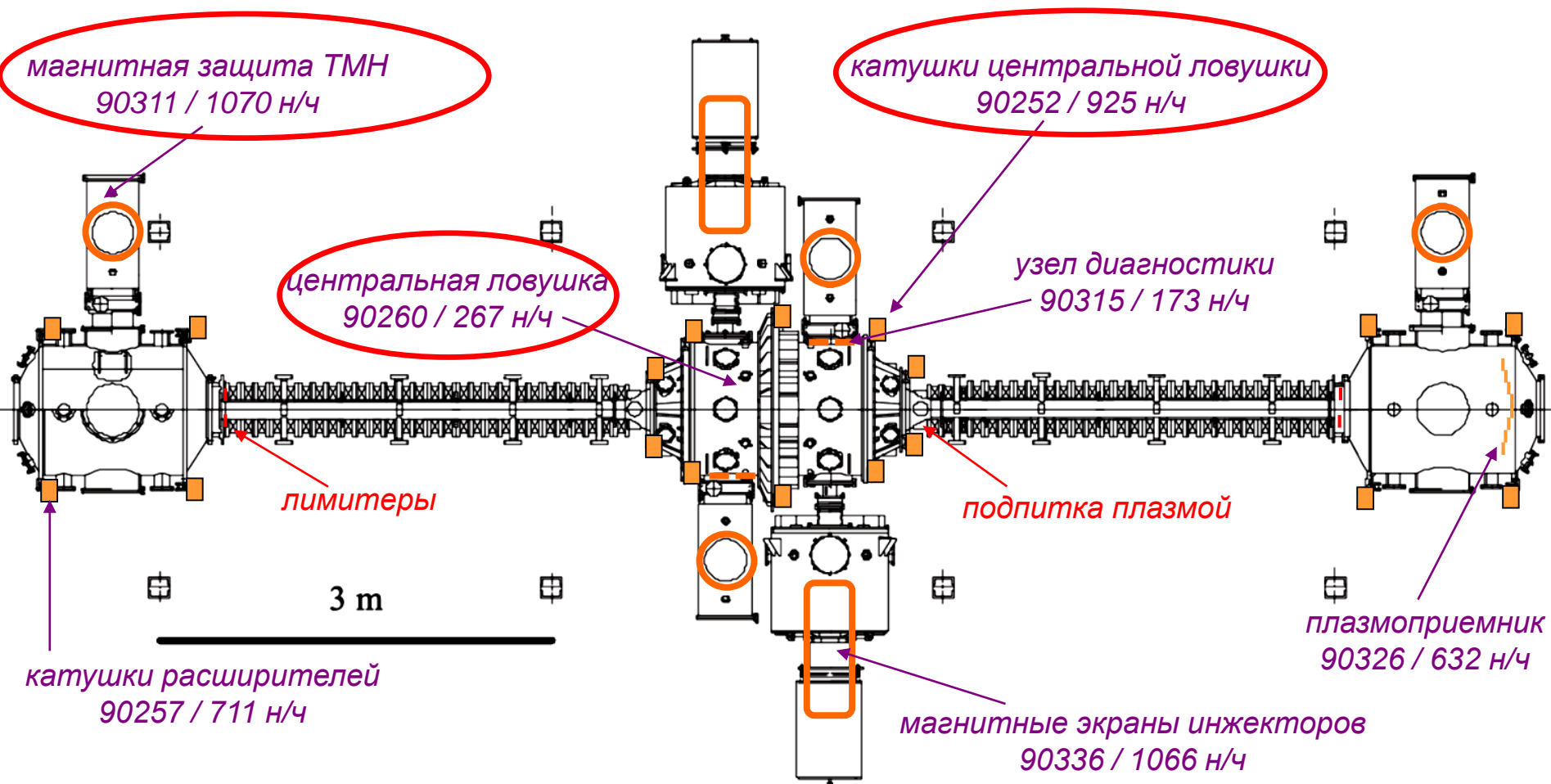
сдано заказов: 34 / 27,0 тыс. н/ч

- из них выполнено: 27 / 14,3 тыс. н/ч

- в производстве: 7 / 12,7 тыс. н/ч (остаток 4,8 тыс.)

очередь на конструирование: 25 работ

ГОЛ-NB: состояние работ на 02.2019



Состояние дел (цвет):

в производстве ■

ожидает конструирования

Состояние дел (производство на 01.02.2019):

сдано заказов: 34 / 27,0 тыс. н/ч

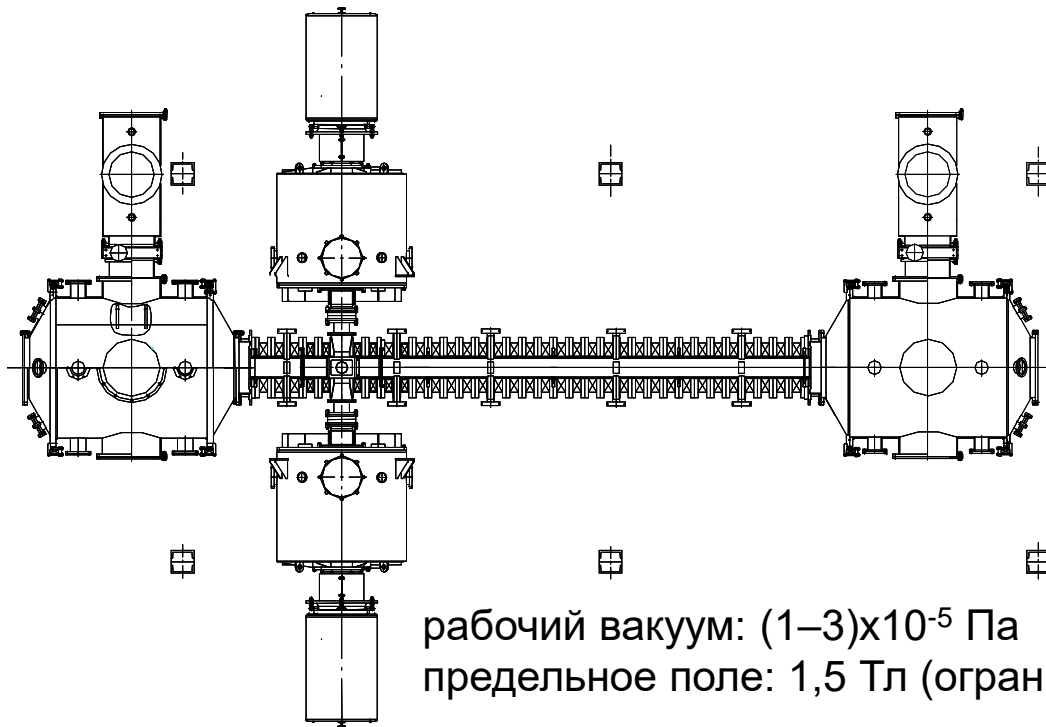
- из них выполнено: 27 / 14,3 тыс. н/ч

- в производстве: 7 / 12,7 тыс. н/ч (остаток 4,8 тыс.)

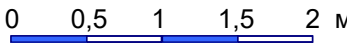
очередь на конструирование: 25 работ

Стартовая конфигурация ГОЛ-НВ

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



0 0,5 1 1,5 2 м



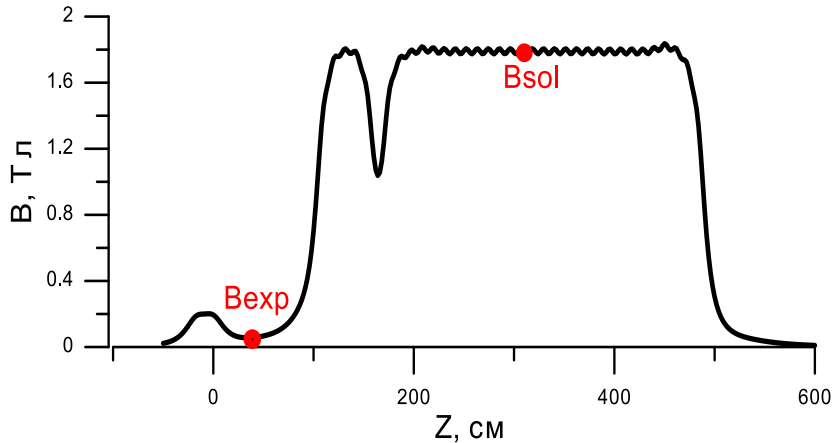

рабочий вакуум: $(1-3) \times 10^{-5}$ Па
 предельное поле: 1,5 Тл (ограничение по насосам)



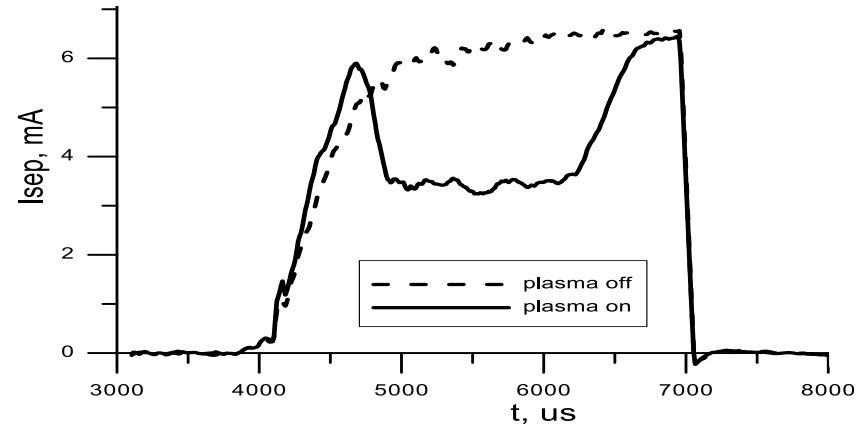
Первая плазма (2018)

- измерение плотности по ослаблению атомарного пучка (25 кэВ, 30 А)

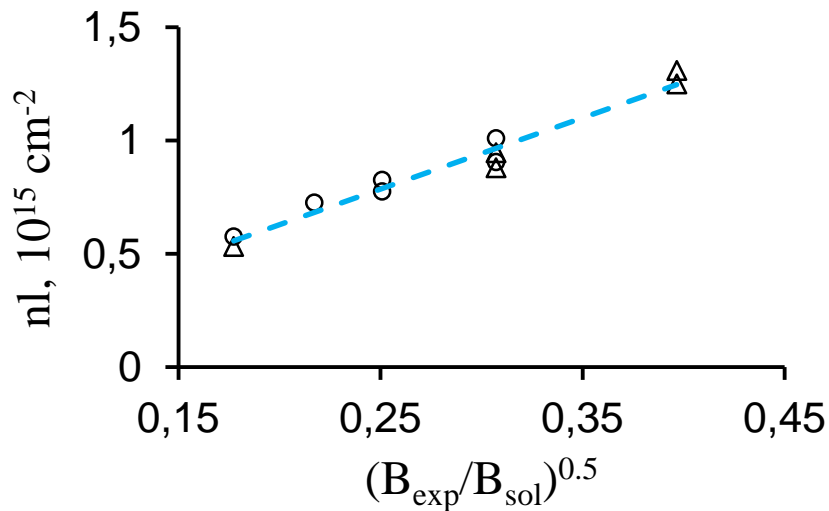
Профиль магнитного поля по длине



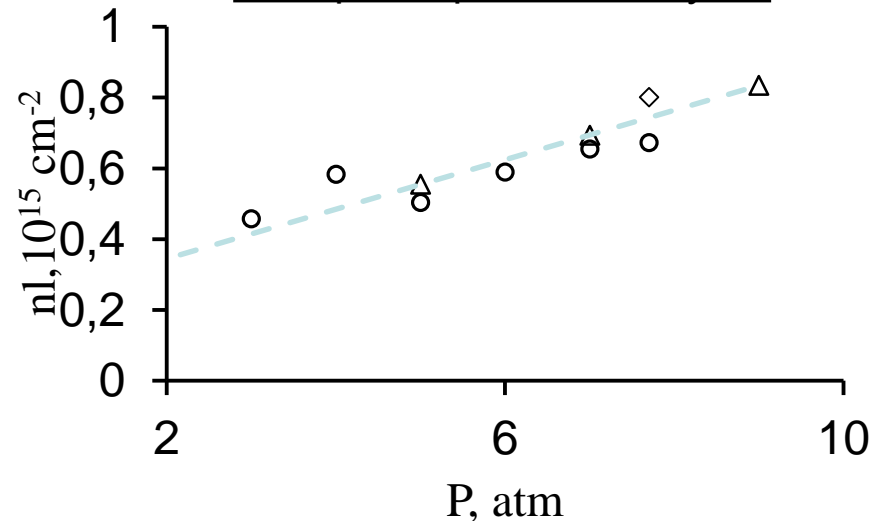
Сигнал датчика с плазмой и без



Зависимость концентрации плазмы от соотношения магнитных полей



Зависимость концентрации плазмы от параметров газонапуска

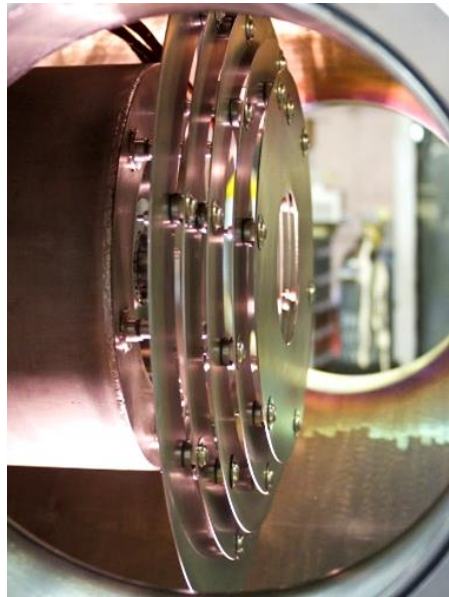


Отработка технологий (2018)

- секционированные плазмодриемники: управление радиальным электрическим полем в плазме и формирование потока стартовой плазмы

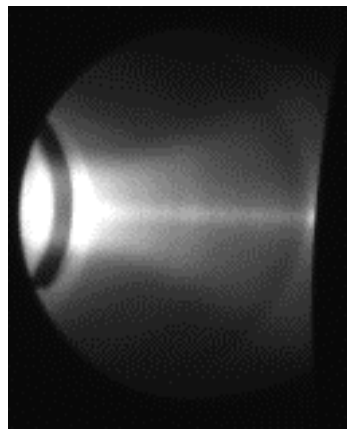
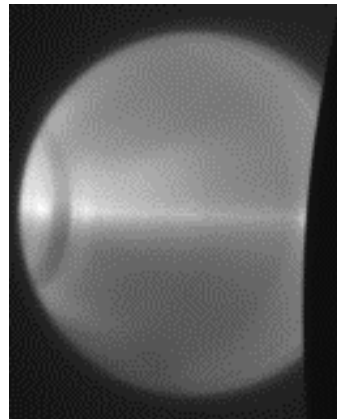
Электроды на дуговом источнике

Было:

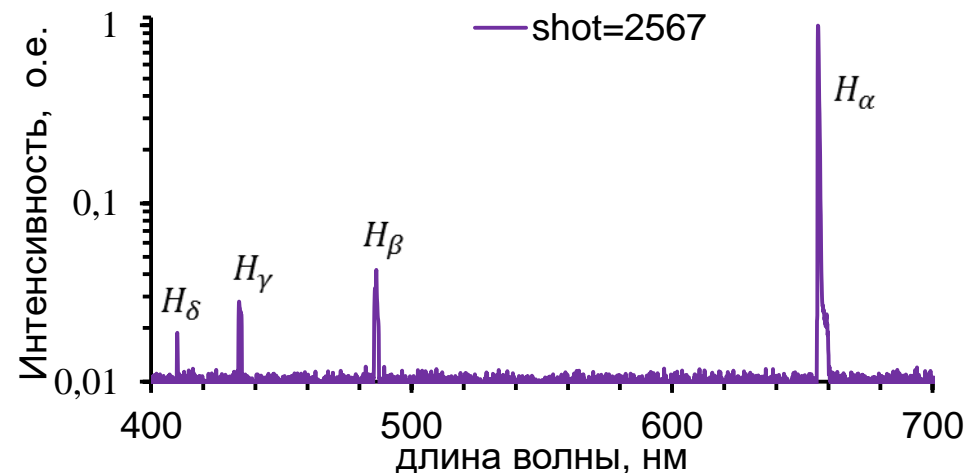
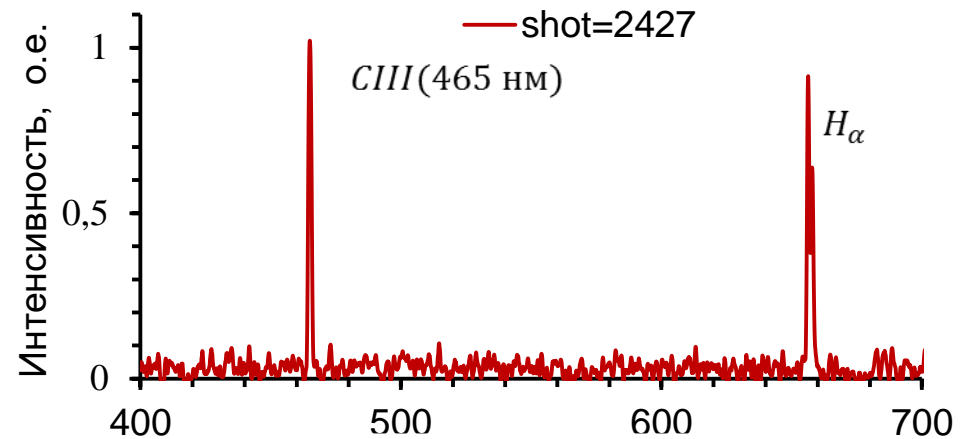


Стало:

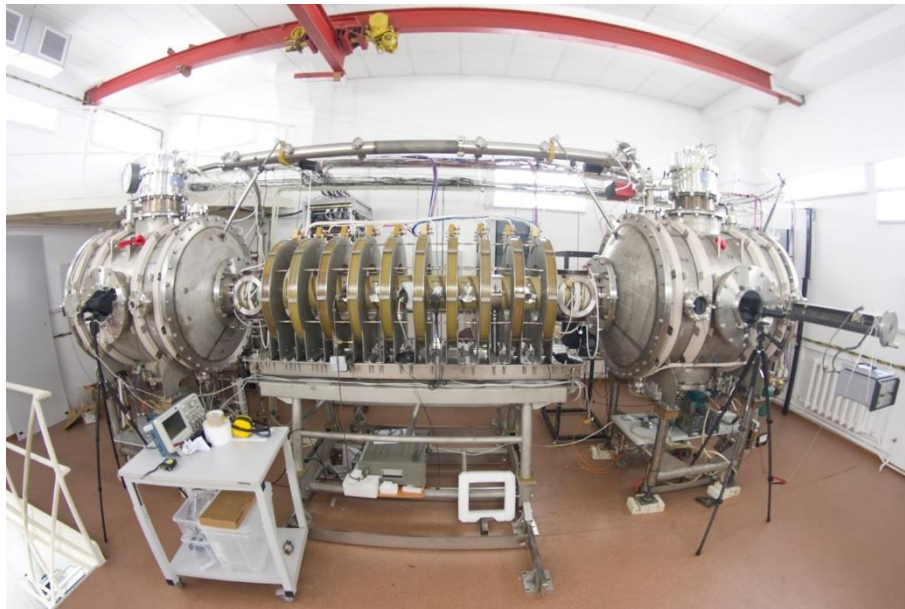
Фото на выходе



Спектр в видимом диапазоне



Динамическое многопробочное удержание. Установка «СМОЛА»

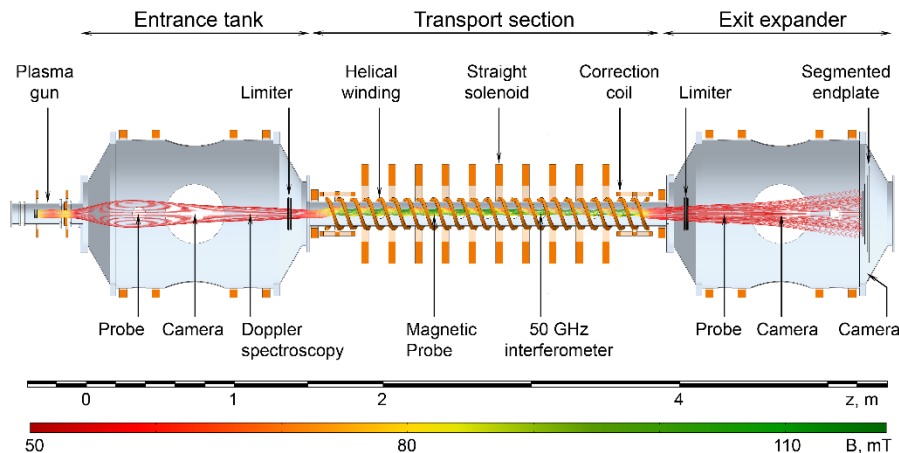


Установка «СМОЛА» создана в рамках «репутационного» гранта РФФИ. Физический запуск — конец 2017 года.

Задача: проверка подавления потока вращающейся плазмы в винтовом магнитном поле (динамическое многопробочное удержание).

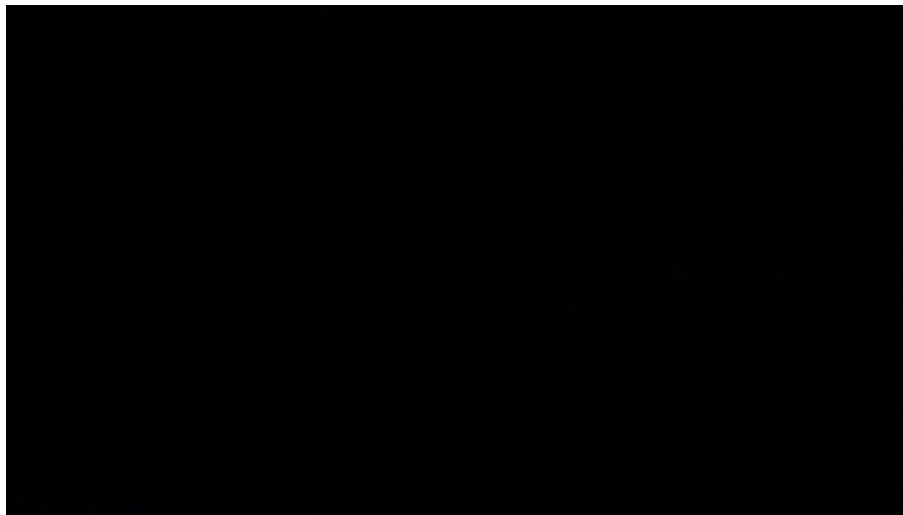
Апгрейды на текущий момент:

- блоки лимитеров и плазмоприёмник для управления профилем вращения,
- 10/14 основных катушек прямого соленоида для повышения однородности и амплитуды поля,
- увеличена до 0.6 с длительность разряда. Емкость батареи доведена до 180 Ф при 100 В. Есть вращение в течение полной длительности.



Это даёт возможность искать зависимости эффекта от поля, в том числе при многократном переключении из прямого поля в винтовое в одном разряде.

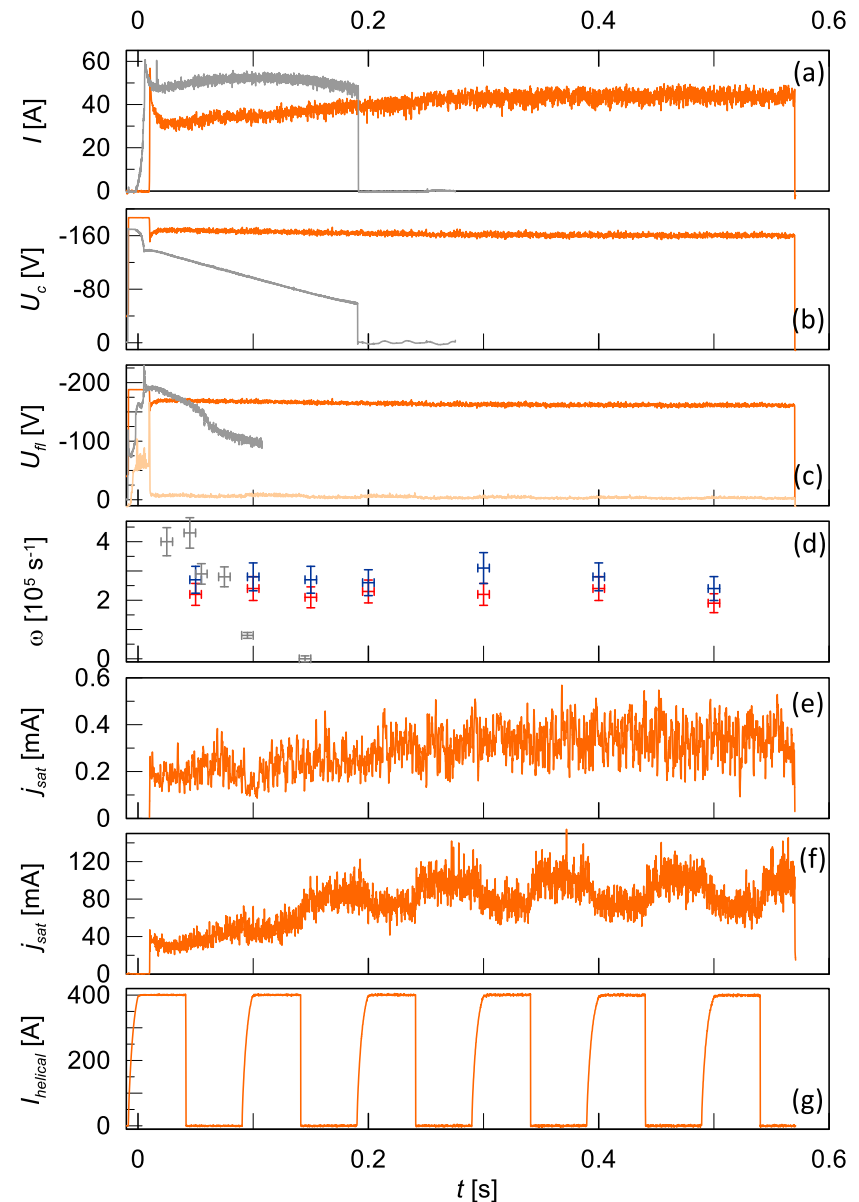
Динамическое многопробочное удержание. Результаты 2018 года.



Периодическое включение винтового поля приводит к значимому снижению потока плазмы, проходящего через винтовую секцию.

Оранжевый и синий — январь 2019, серый — июнь 2018.

Приведены (a) ток плазмы, (b) потенциал катода, (c) потенциал центра плазмоприёмника, (d) скорость вращения плазмы, ток насыщения в (e) входном и (f) выходном расширителе, (g) ток винтовой обмотки



Динамическое многопробочное удержание. Идущие и предлагаемые проекты.

<p>Ускорение потока ионов винтовой секцией с переменным шагом (2019–июнь 2020) Инжекция ускоренного потока ионов навстречу истекающей плазменной струе. Раскачка неустойчивости для управления столкновительностью (2020–июнь 2021)</p>	<p>РНФ 18-72-10080 (Малые группы)</p>	<p>Поддержана</p>
<p>Повышение эффективности источника плазмы (2019). Изучение МГД-колебаний (2020). Изучение методов стабилизации (2021)</p>	<p>Госзадание 14.1.3</p>	<p>Поддержана</p>
<p>Улучшенное удержание в секциях с постоянным и переменным шагом (2019–2020) Модель винтовой пробки для ГДЛ/ГДМЛ (2021–2022)</p>	<p>РНФ 19-72-30007 (Лаборатории)</p>	<p>Рассматривается</p>
<p>Ускорение плазмы для плазменного космического двигателя (2019–∞)</p>	<p>Сотрудничество с ОКБ «Факел»</p>	<p>Поиск источников</p>
<p></p>	<p>Совместная программа исследований РАН и Роскосмоса</p>	<p>Рассматривается</p>
<p>Исследование радиального транспорта</p>	<p>РНФ (Молодые, инициативные)</p>	<p>Готовится заявка</p>

Исследования взаимодействия пучков и плазмы с поверхностью

Стенд БЕТА для испытания материалов

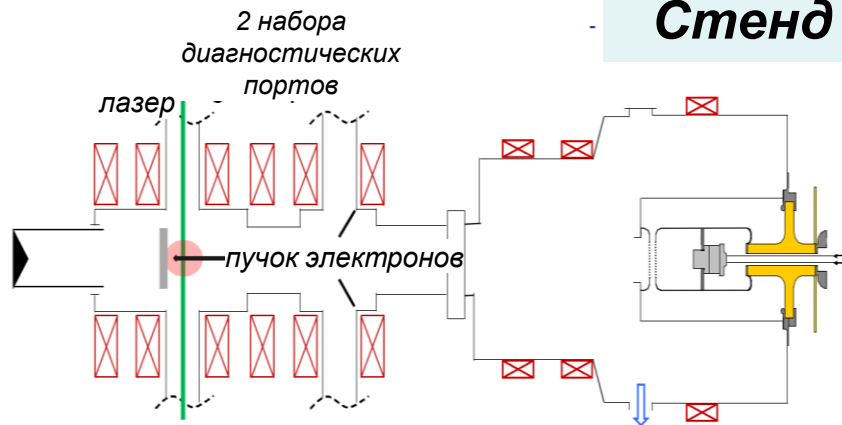
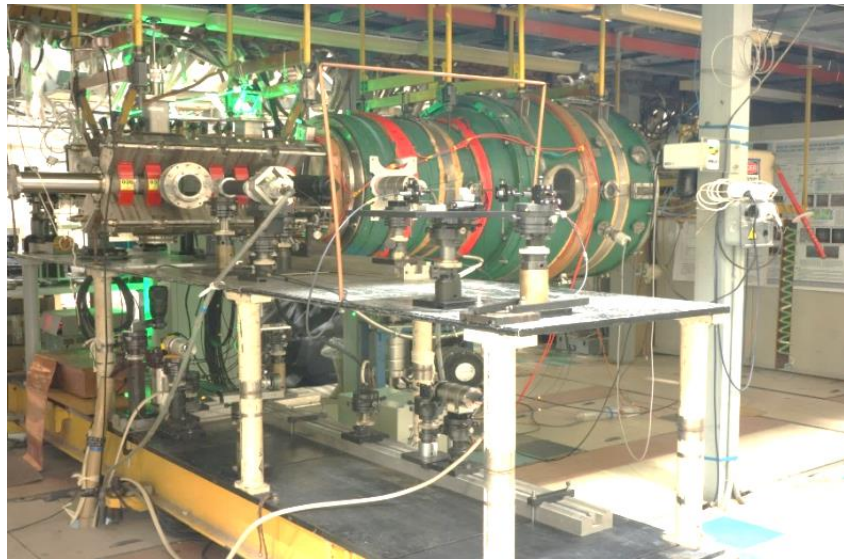


Схема стенда



Фотография стенда

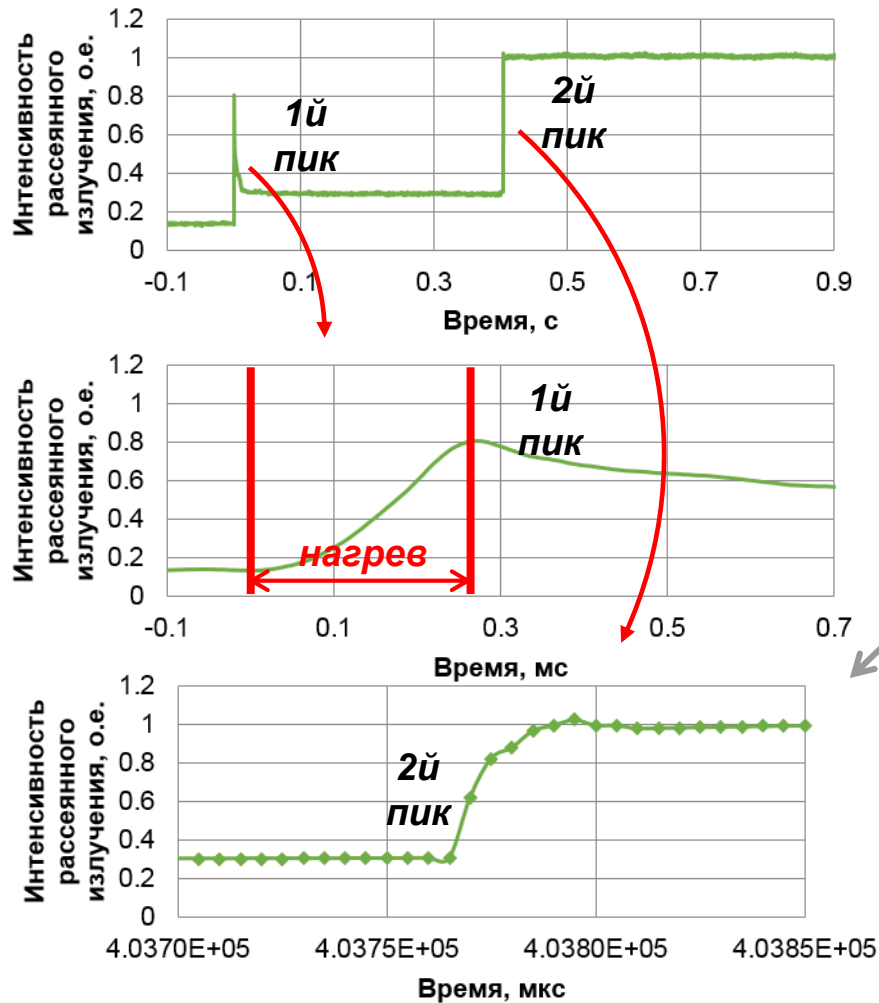
BETA – Beam of Electrons for material Test Applications

Отличительные особенности стенда БЕТА

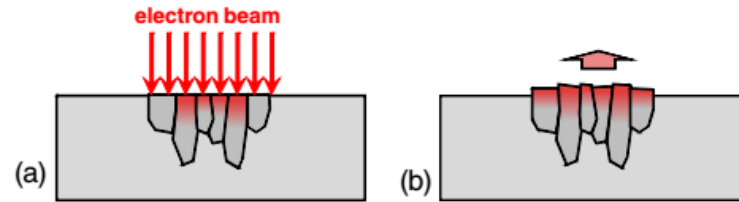
- возможность наблюдения в реальном времени процессов разрушения материалов импульсными тепловыми нагрузками, характерными для экспериментальных термоядерных реакторов с магнитным удержанием
- Мощный импульсный нагрев, удобная геометрия наблюдения и наличие уникального набора оптических диагностик

Исследования взаимодействия пучков и плазмы с поверхностью

Динамика эрозии поверхностью вольфрама при воздействии на неё импульсного нагрева исследуется по рассеянию лазерного излучения



1й пик интенсивности рассеяния связан с увеличением шероховатости при нагревании тонкого слоя



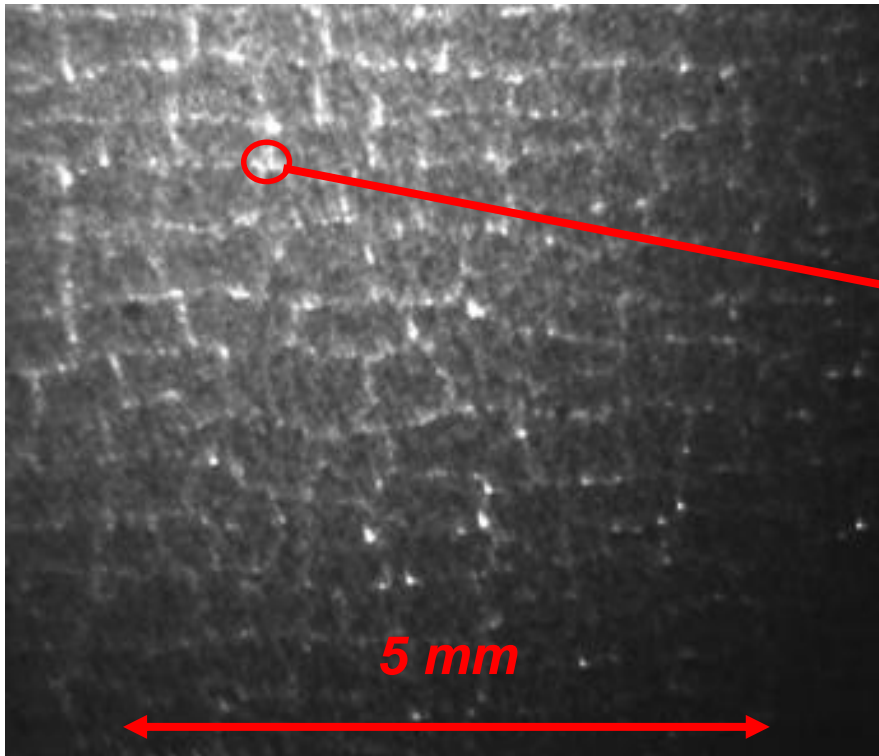
2й пик интенсивности рассеяния вызван образованием трещин

Обнаружена неожиданно большая задержка растрескивания после теплового удара, на 3-4 порядка превосходящая время перехода вольфрама в хрупкое состояние

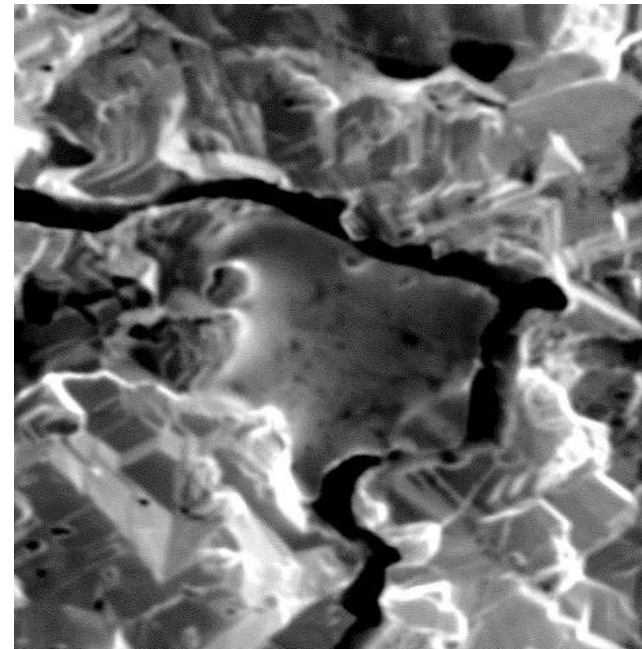
Исследования взаимодействия пучков и плазмы с поверхностью

Растрескивание поверхности ведёт к её локальному перегреву и усиленной эрозии материала

Тепловое изображение поверхности вольфрама, сертифицированного для использования в токамаке ИТЭР, при импульсном нагреве после растрескивания демонстрирует участки локального перегрева вблизи трещин

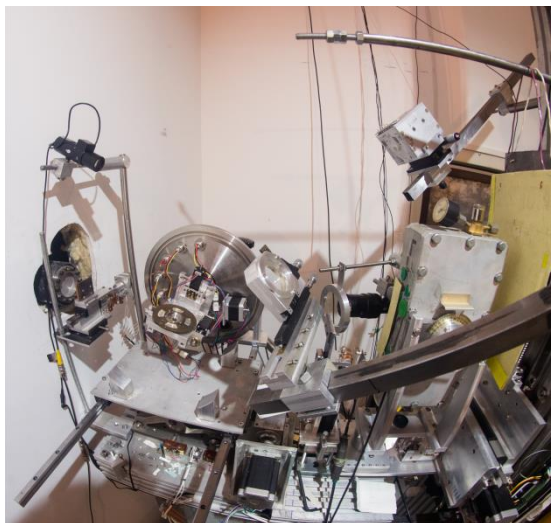


Изображение выбранного перегретого участка поверхности, полученное с использованием электронного микроскопа, показывает локальное плавление, при средней тепловой нагрузке существенно ниже порога плавления

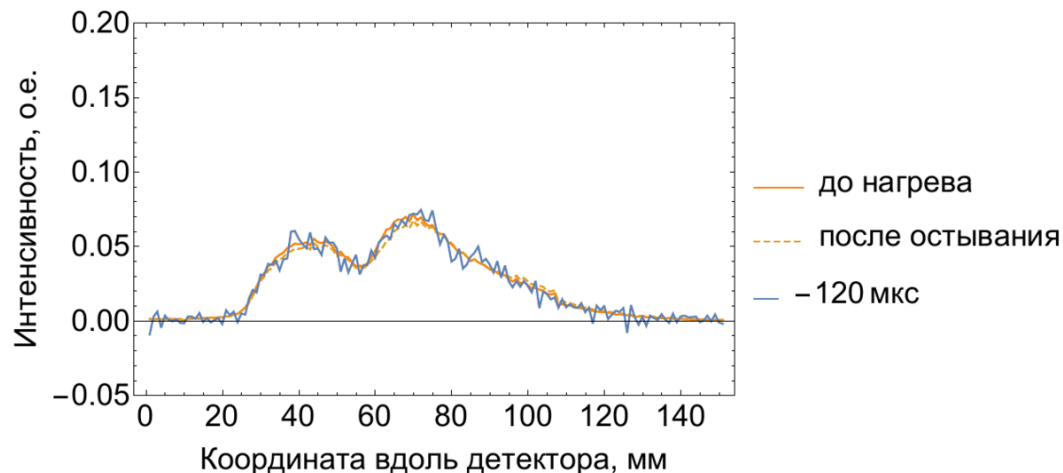


10 мкм

Станция рассеяния “Плазма”



Станция рассеяния “Плазма”



Наблюдение схождения сторон трещины при импульсном нагреве

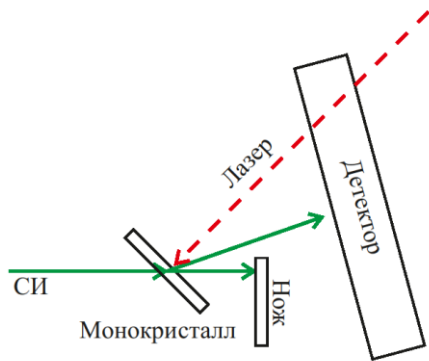


Схема дифракции

- Станция “Плазма” разрабатывалась для измерения динамики распределения деформаций и напряжений в материале при импульсном нагреве, характерном для термоядерного реактора.
- Продемонстрированы измерения динамики дифракции.
- Станция готова к новому сезону с новым детектором (на основе DIMEX с кремниевым сенсором).

Заключение

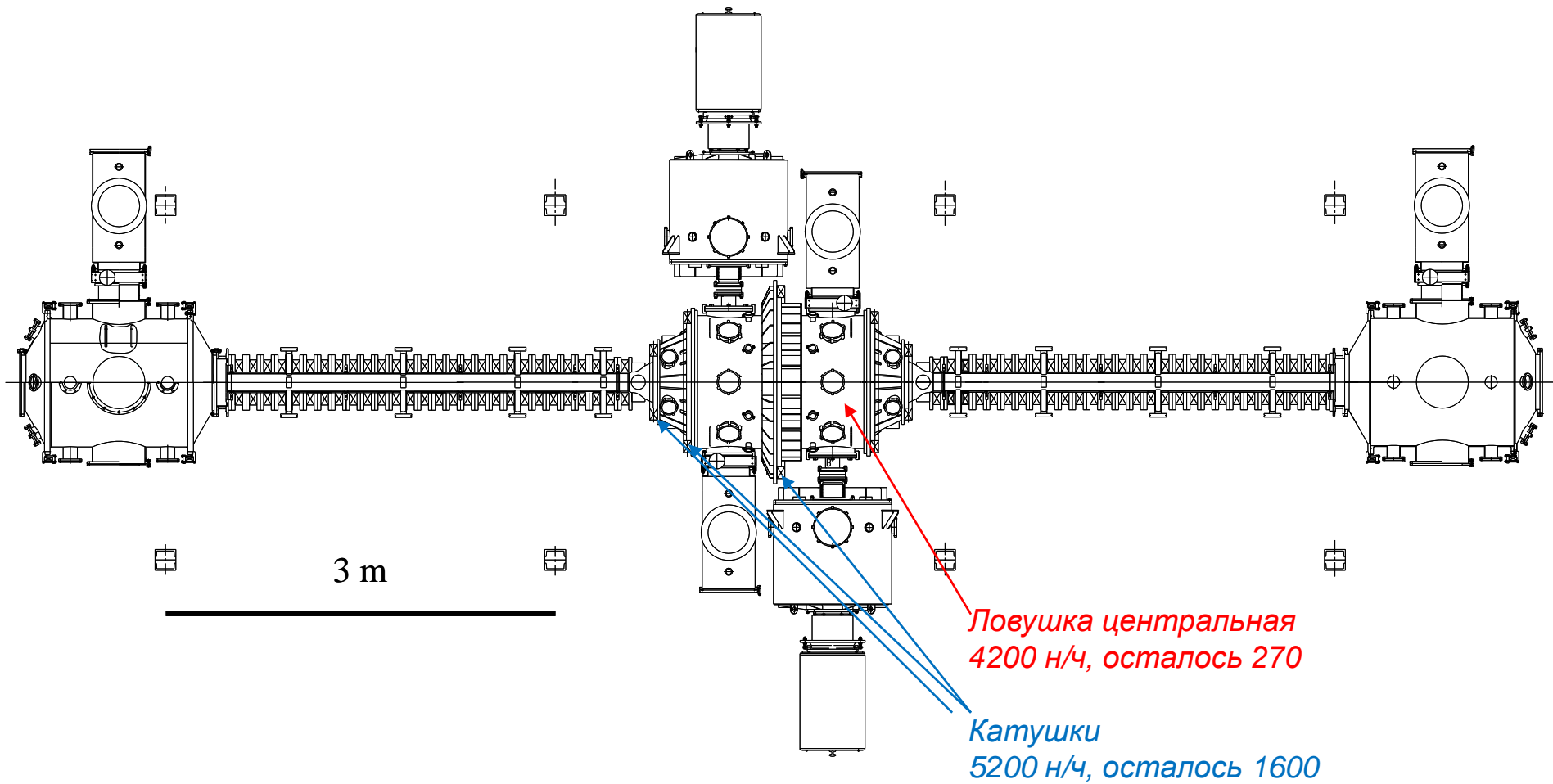
- *ИТЕР – ИЯФ развивается*
- *Установка ГОЛ-NB – пусковой объект 2019*
- *Спиральная ловушка СМОЛА работает*
- *Увлекательные результаты получены на установках плазма-поверхность*

Спасибо за внимание

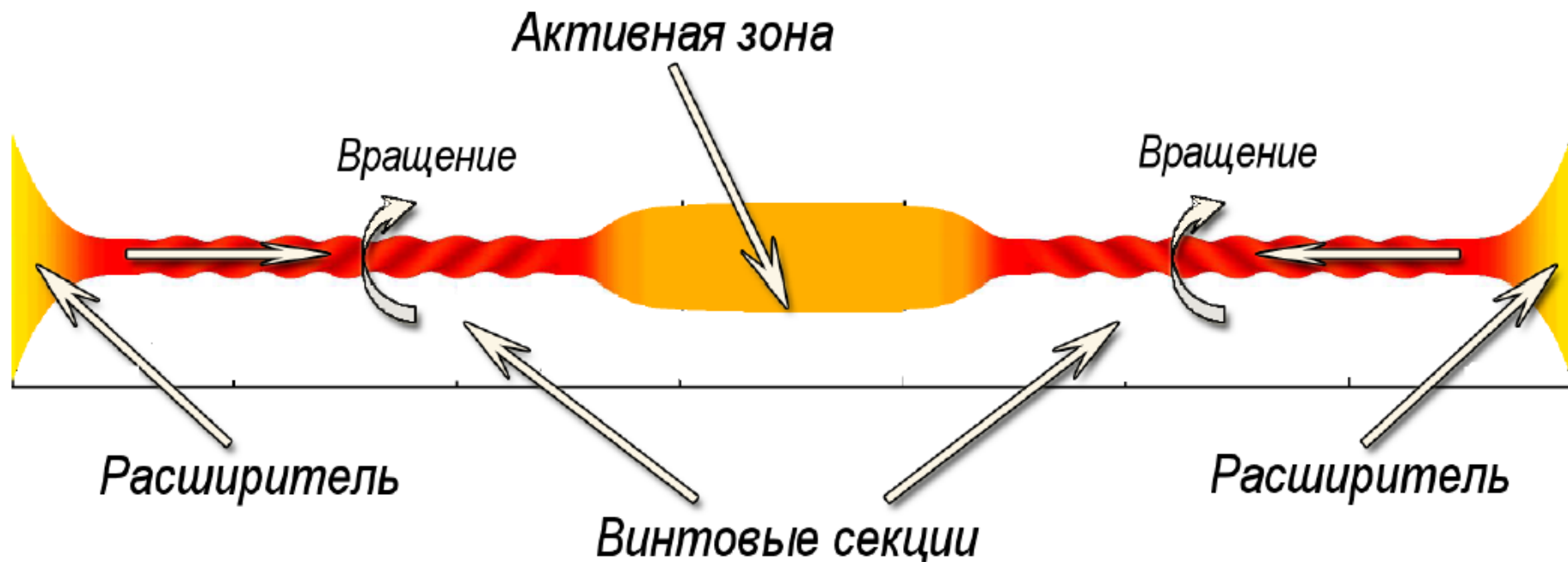


Внешний вид установки

Первоочередные потребности ГОЛ-НВ



Винтовая ловушка



Идея: шнековый насос

“Перистальтическое” перекачивание плазмы создаётся за счёт её вращения в магнитном поле с винтовой гофрировкой (которая во вращающейся системе отсчёта выглядит как бегущая.)

A. D. Beklemishev. [Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps](#) // Fusion Science and Technology, V.63, N.1T, May 2013. P.355

А. Д. Беклемишев. Семинары от 29.11.2016, 05.12.2016

Программа работ на ГОЛ-НВ

- **Обязательства ИЯФ: запуск в полной конфигурации в 2019 г.**
- Изготовление всей ловушки требует 5% от месячного объёма производства ЭП.
- Сборка всей установки требует расчистки площадки (откладывается с 2014 г.).
- Исследования по программе ГОЛ-НВ внесены в проект Термоядерной программы России в качестве эксперимента, развивающего физику и технологию для открытой ловушки реакторного класса:
 - демонстрация подавления потерь частиц и энергии из ловушки при включении секций с многопробочным магнитным полем;
 - независимое подтверждение физических и технических идей программы ГДЛ;
 - развитие методов дополнительного нагрева плазмы для достижения более высоких параметров;
 - поиск способов управления длиной свободного пробега частиц для увеличения эффективности удержания в области высоких температур;
 - исследование новых магнитных конфигураций многопробочных секций.
- Конечная цель работ: создание технологии подавления продольных потерь частиц и энергии из открытых ловушек с плазмой реакторного класса.
- Финансирование: более 4 млн. долларов за 2014-2019 (госзадание и УНУ ДОЛ).



Программа работ на ГОЛ-НВ

- Запуск стартовой конфигурации и первая плазма в 2018 г.
- Исследования по программе ГОЛ-НВ внесены в проект Термоядерной программы России в качестве эксперимента, развивающего физику и технологию для открытой ловушки реакторного класса:
 - демонстрация подавления потерь частиц и энергии из ловушки при включении секций с многопробочным магнитным полем;
 - независимое подтверждение физических и технических идей программы ГДЛ;
 - развитие методов дополнительного нагрева плазмы для достижения более высоких параметров;
 - поиск способов управления длиной свободного пробега частиц для увеличения эффективности удержания в области высоких температур;
 - исследование новых магнитных конфигураций многопробочных секций.
- Конечная цель работ: создание технологии подавления продольных потерь частиц и энергии из открытых ловушек с плазмой реакторного класса.