

# Экспериментальная верификация эффективных методов удержания плазмы в существующих и перспективных линейных системах

Д. Яковлев от имени коллектива плазменных лабораторий  
Института ядерной физики им. Будкера СО РАН

# Введение

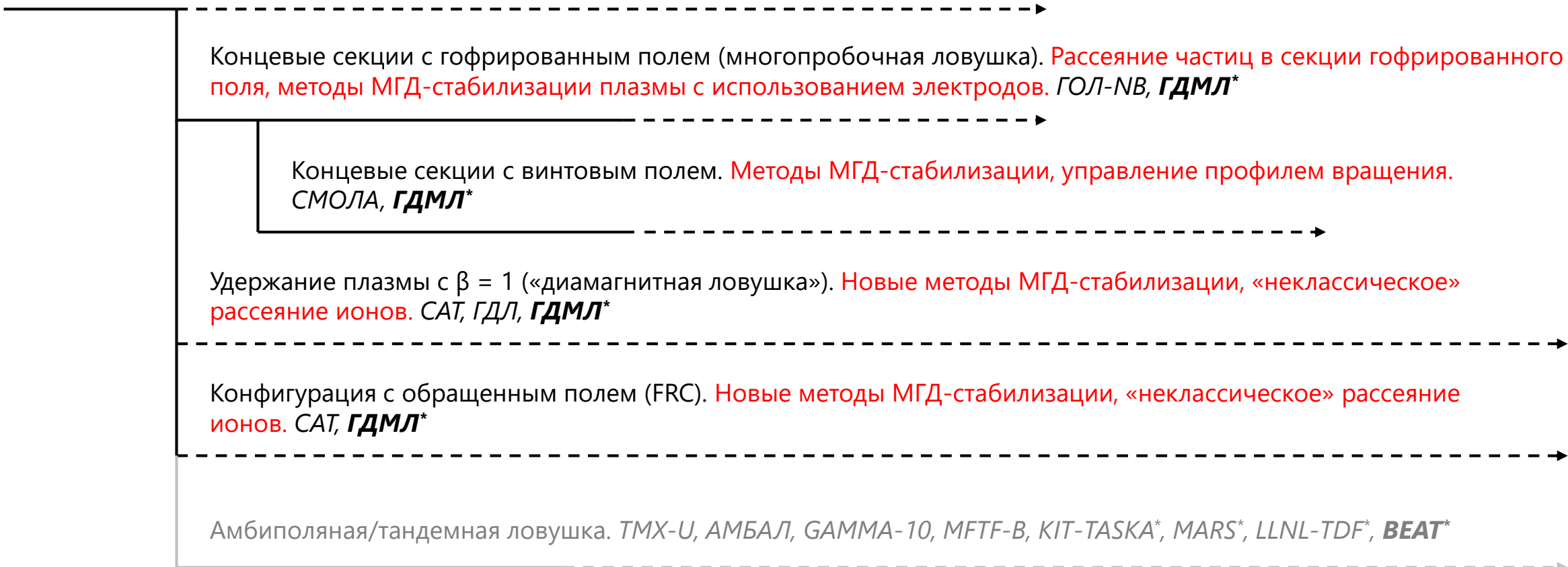
- В ИЯФ им. Будкера СО РАН активно развивается подход к УТС, основанный на удержании высокотемпературной плазмы в магнитной ловушке открытого типа (линейной системе).
- Целью исследований является создание энергетического реактора синтеза. Промежуточными результатами работы могут быть мощные источники нейтронов для различных применений.
- Особенности подхода являются осевая симметрия магнитного поля и «активные» методы контроля поперечных потерь, основанные на управлении профилем вращения плазмы при помощи электродов, а также удержание плазмы с предельно высоким относительным давлением ( $\beta$ ).
- Вместо активных методов подавления продольных потерь, таких как амбиполярная (тандемная) ловушка и термобарьерные секции, ставка делается на «пассивное» запираение потока плазмы при течении через концевые соленоиды сложной формы – многопробочные и винтовые секции.

# План доклада

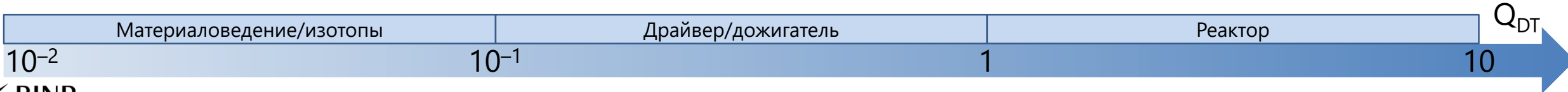
1. Введение
2. Действующие эксперименты:
  - 2.1 ГДЛ
  - 2.2 ГОЛ-NB
  - 2.3 СМОЛА
  - 2.4 САТ
3. Проект установки ГДМЛ
4. Заключение

# Перспективы компактных ( $L \sim 50$ м) установок

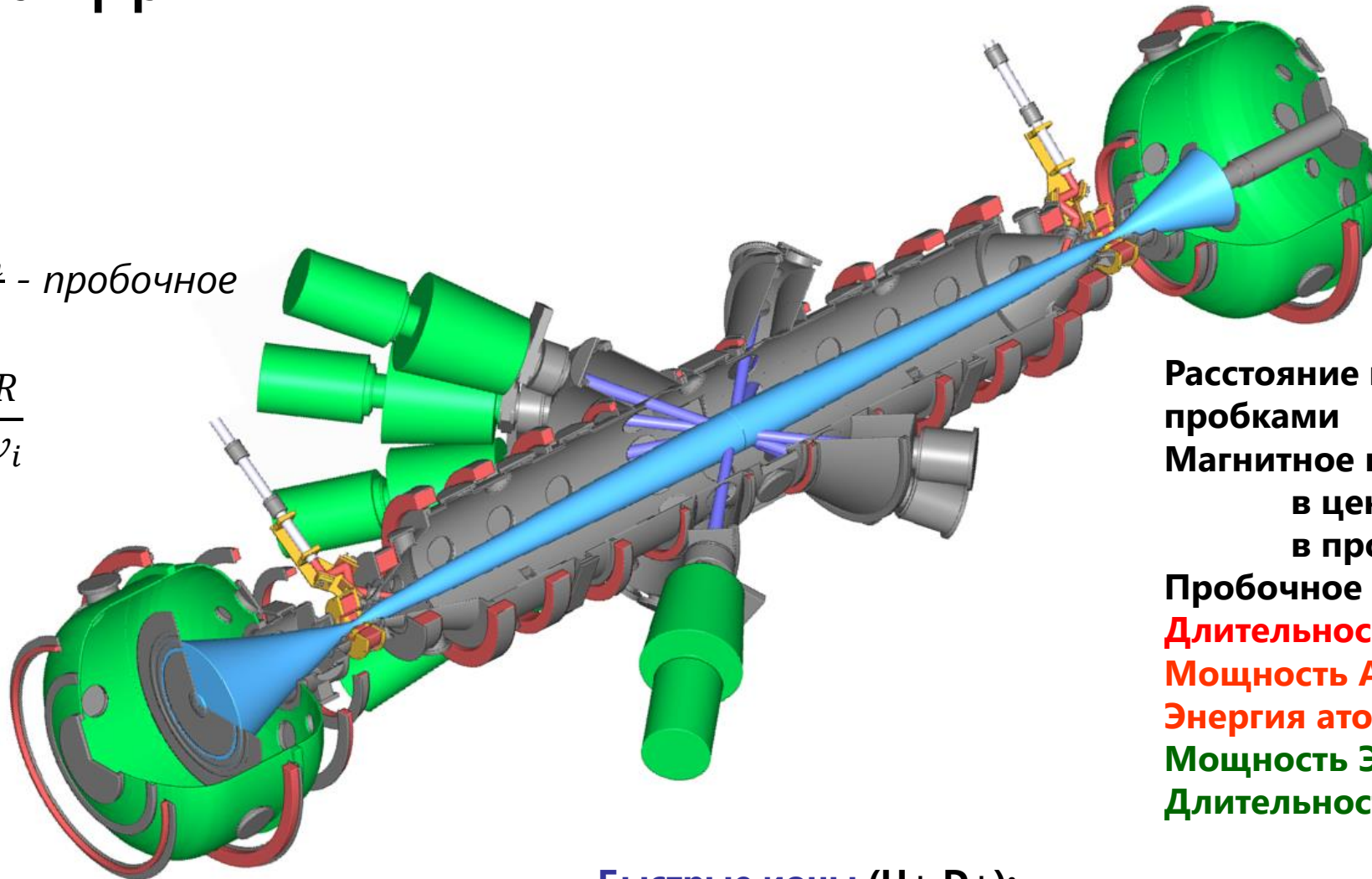
Осесимметричная ловушка с одиночными пробками и  $\beta < 0.5$ . **Кинетические неустойчивости анизотропной плазмы, продольная электронная теплопроводность, МГД-устойчивость плазмы.** *ГДЛ, САТ, ГОЛ-NB, ГДМЛ\**



\*Проекты установок



# Установка ГДЛ



Тёплая плазма:

$$L \gg \lambda_{ii} \frac{\ln R}{R}, R = \frac{B_m}{B_0} - \text{пробочное}$$

отношение

$$\tau_{GDT} \sim \frac{nLS_0}{2nv_i S_m} = \frac{LR}{2v_i}$$

Быстрые ионы:

$$\tau_{adiab} \sim \tau_{ii} \ln R$$

Расстояние между пробками

7 м

Магнитное поле:

в центре

0,35 Т

в пробках

12 Т

Пробочное отношение

35

Длительность АИ

5 мс

Мощность АИ

~ 5 МВт

Энергия атомов

25 кэВ

Мощность ЭЦРН

0,8 МВт

Длительность ЭЦРН

5 мс

Теплая плазма:

Электроны:  $\approx 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , 250 (900) эВ;

Теплые ионы:  $\approx 0.2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$

Быстрые ионы (H+, D+):

до  $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,

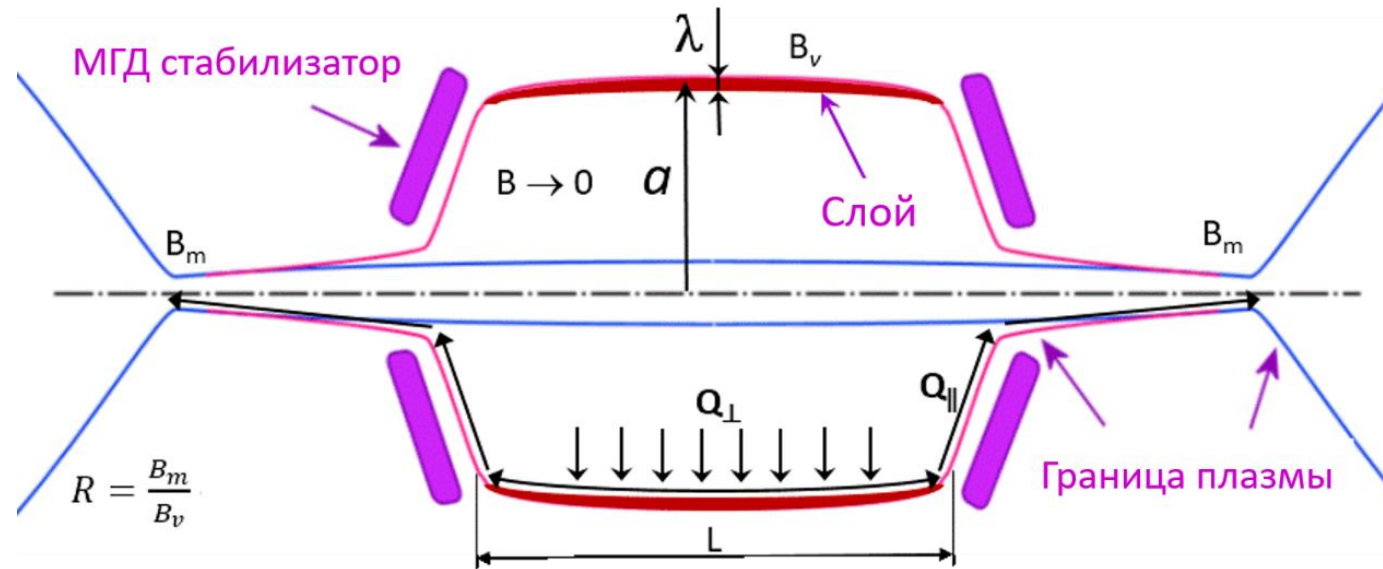
$\langle E \rangle \approx 10 \text{ кэВ}$ ,  $\beta \approx 0.5$

# ГДЛ: программа исследований

- Устойчивость анизотропной компоненты плазмы: минимальная степень заполнения конуса потерь, зависимость от изотопного состава.
- Продольные потери энергии по электронному каналу: взаимодействие с нейтральным газом в расширительной секции и его предельная концентрация, влияние формы торцевого электрода.
- МГД-устойчивость плазмы: влияние продольной проводимости в расширительной секции на оптимальное распределение потенциала, поперечные потери энергии на радиально лимитере.
- Эксперименты с высоким  $\beta$ : попытка превысить ранее достигнутое значение  $\beta = 0.6$ , исследование устойчивости, эксперименты с проводящими МГД-стабилизаторами, ввод в эксплуатацию и измерения при помощи диагностики MSE-LIF.

# Удержание плазмы с $\beta \rightarrow 1$

A. Beklemishev,  
Phys. Plasmas 23, 082506 (2016)



$$\sqrt{\tau_{\perp} \cdot \tau_{\parallel}} = \sqrt{\frac{4\pi\sigma a^2}{c^2} \cdot \tau_{\parallel}}$$

$\sigma$  - поперечная  
проводимость  
плазмы

$$\tau_{\parallel gdt} = \frac{RL}{2v_i}$$

$$\tau_{\parallel adiab} = \tau_{ii} \cdot \ln R$$

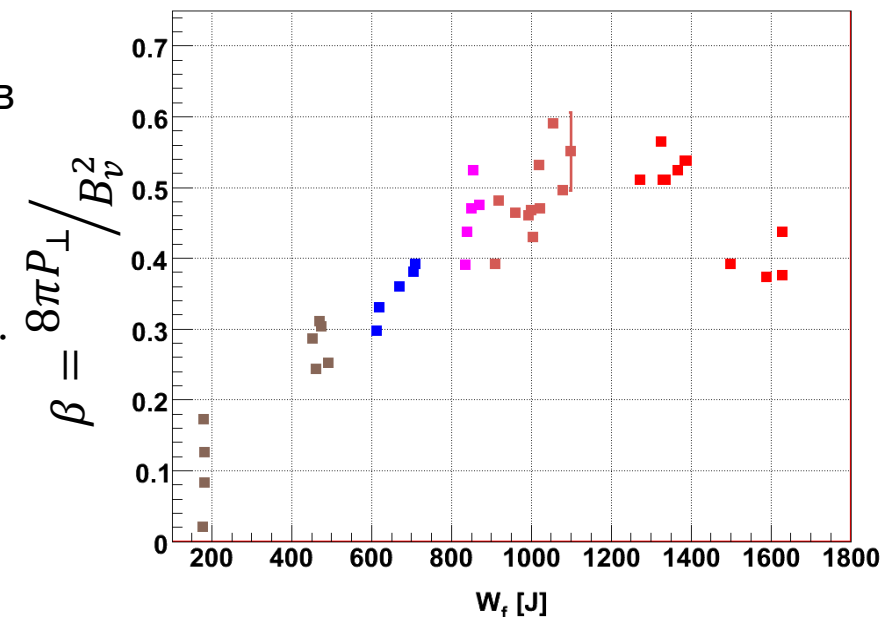
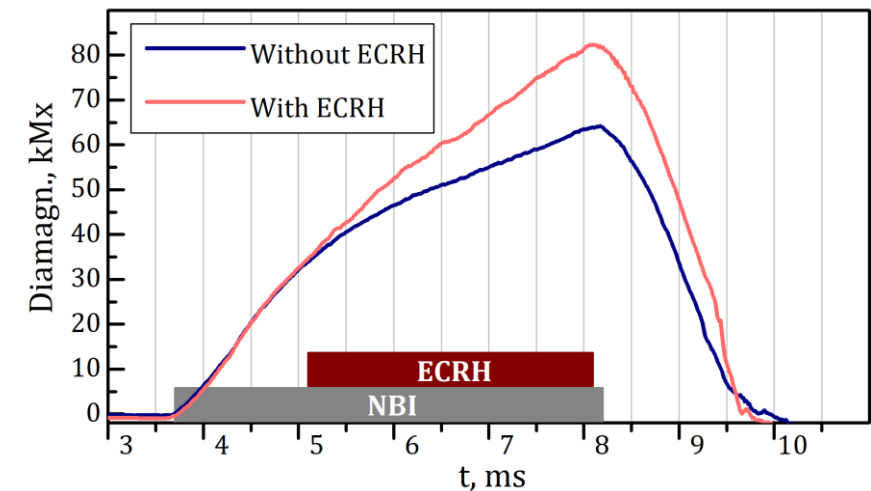
**Идея:** равновесие с предельным  $\beta \approx 1$

- Требуется квазиоднородное поле в центре;
- Формально, при  $\beta \rightarrow 1$  пробочное отношение стремится к бесконечности (но на самом деле удержание в этом пределе определяется «шкуркой»:  $\tau_E \propto \sqrt{\tau_{\perp} \tau_{\parallel}}$ );
- При классических поперечных и газодинамических продольных потерях этот скейлинг удержания **достаточен для выполнения критерия Лоусона в ловушке длиной 30 м, радиусом 1 м при поле 10 Тл с запасом на порядок;**

# ГДЛ: эксперименты с высоким $\beta$

Цель экспериментов – достижение значения  $\beta = 0.8$  в ГДЛ. Для увеличения  $\beta$  в ГДЛ (по сравнению с  $\beta = 0.6$  в экспериментах 2010 года) есть несколько путей:

1. Использование дополнительного ЭЦР-нагрева мощностью до 1.2 МВт: сейчас работает один гиротрон мощностью 450 кВт, завершается монтаж второй линии на 800 кВт.
2. Модернизация системы нейтральной инжекции ГДЛ: увеличение длительности импульса до 10 мс, переработка узлов ввода пучка инжекторов.
3. «Сжатие» области плазмы, занятой быстрыми ионами за счет изменения конфигурации соленоида: эксперимент подготовлен.



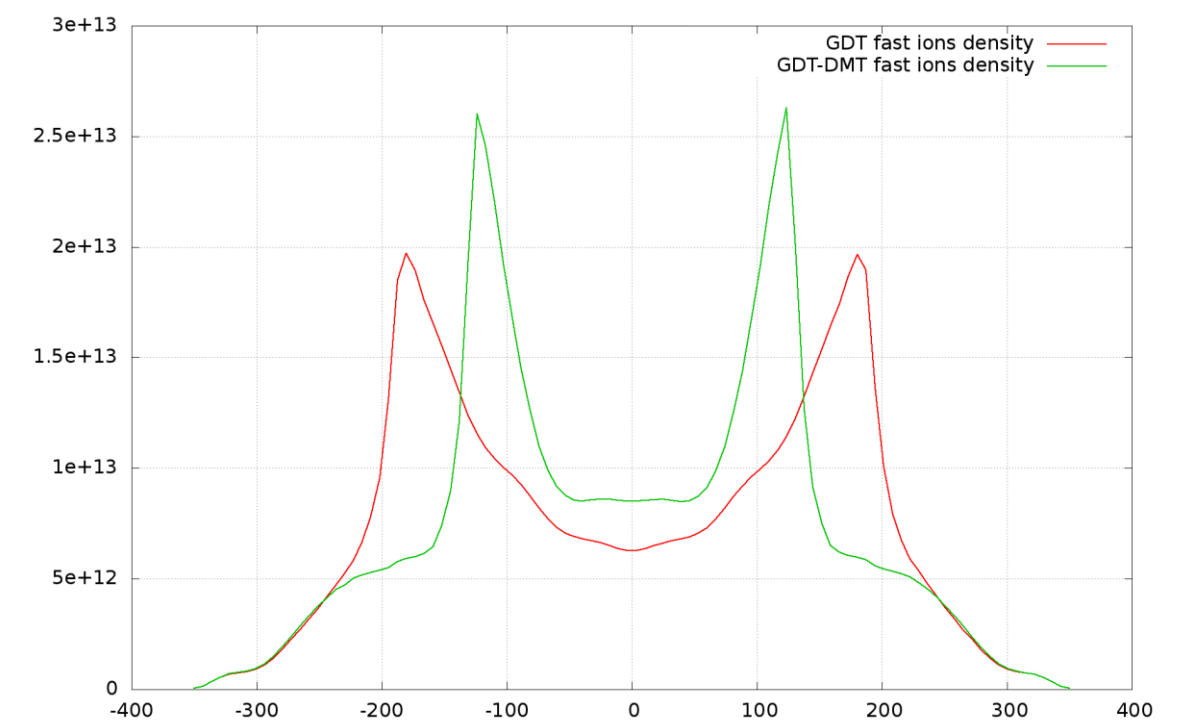
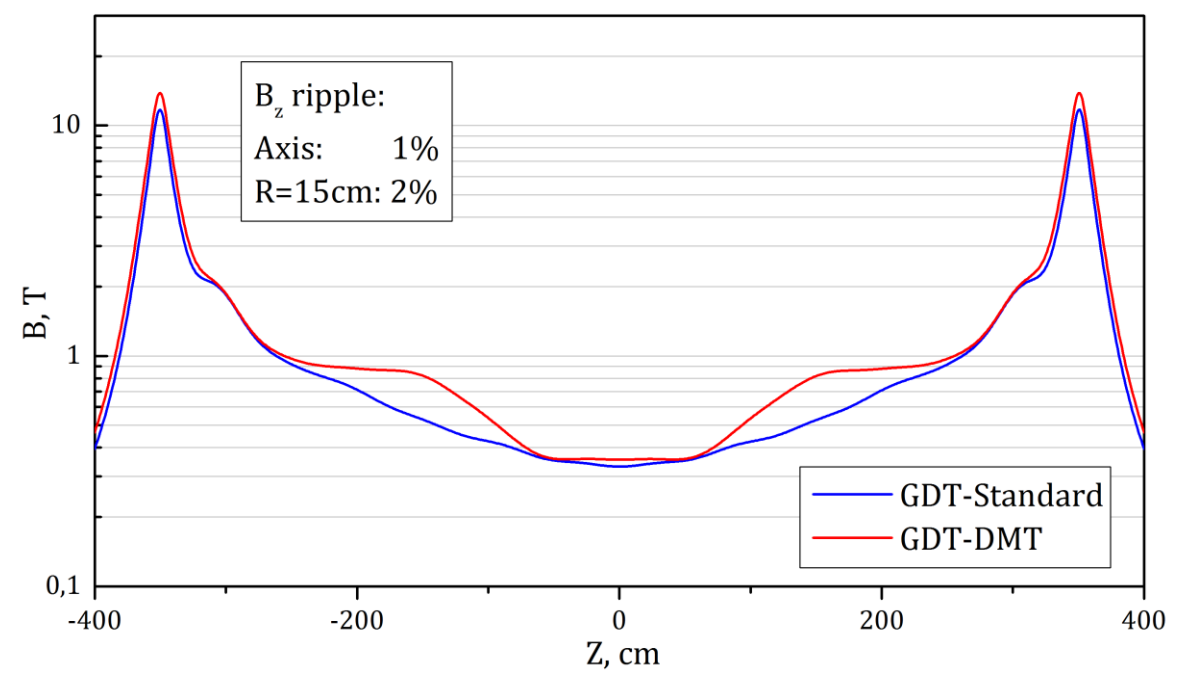
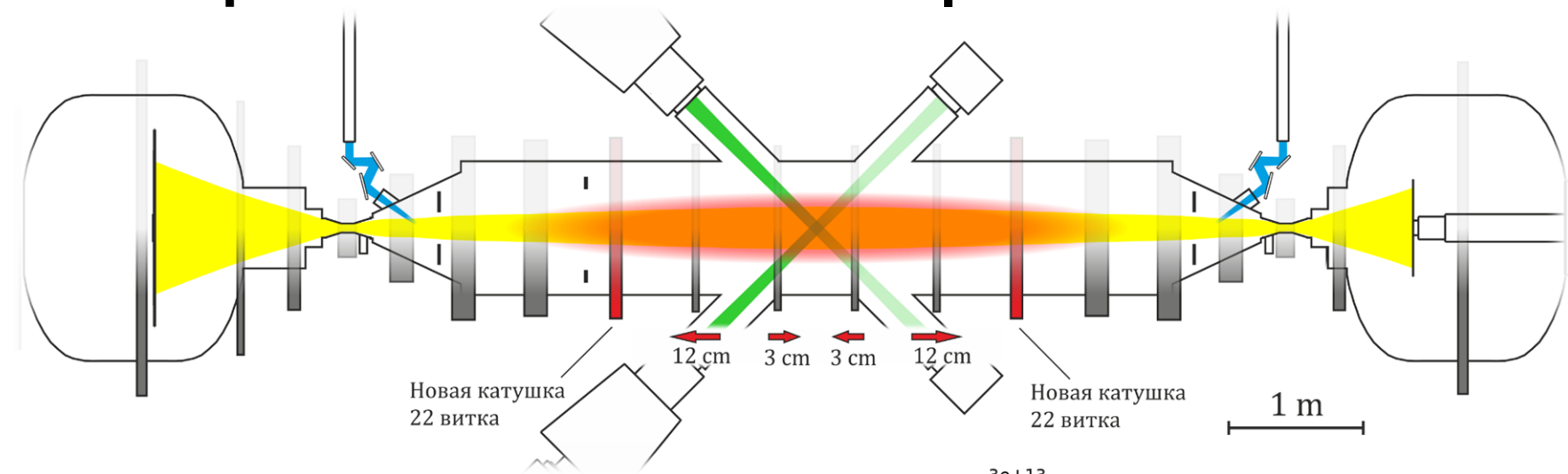
P. A. Bagryansky, A. V. Anikeev, A. D. Beklemishev et al Confinement of Hot Ion Plasma with  $\beta = 0.6$  in the Gas Dynamic Trap 2011 Fusion Science and Technology 59:1T 31-35

DOI: 10.13182/FST11-A11568

Зависимость  $\beta$  от полной энергии горячих ионов (измерено при помощи MSE диагностики в области остановки горячих ионов в центре плазменного столба)



# ГДЛ: эксперименты с высоким $\beta$



# Установка САТ

## Габариты установки:

Длина – 6 м.

Высота - 5 м.

Диаметр камеры – 1 м.

Межпробочное расстояние – 0.6 м.

$B_0$  – 2 кГс.

Пробочное отношение – 2.

## Мишенная плазма:

$r_0=10$  см,  $n_0=3 \times 10^{13}$  см<sup>-3</sup>,  $T_e=30-50$  эВ.

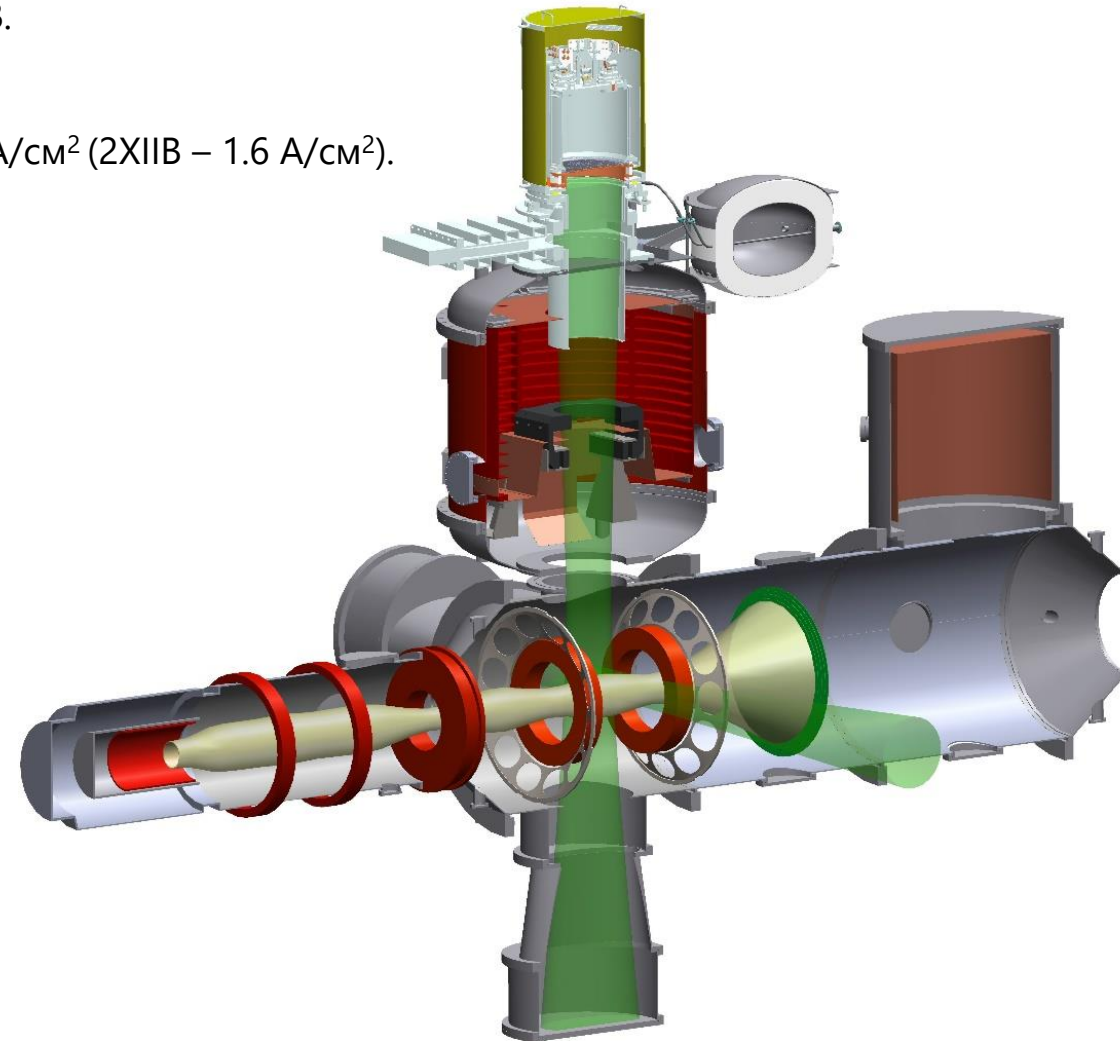
## Система атомарной инъекции:

2 инжектора на энергию 15 кэВ.

Мощность – 2x2 МВт.

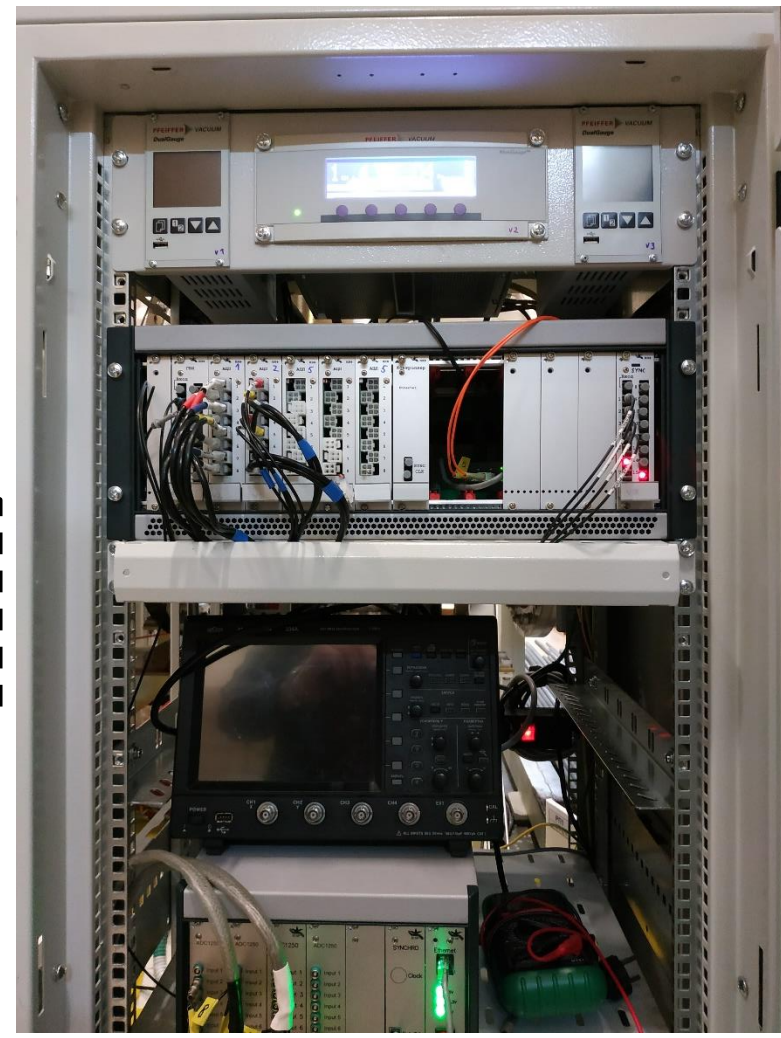
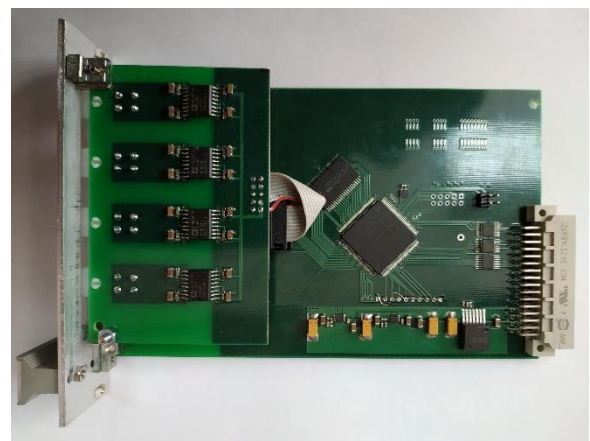
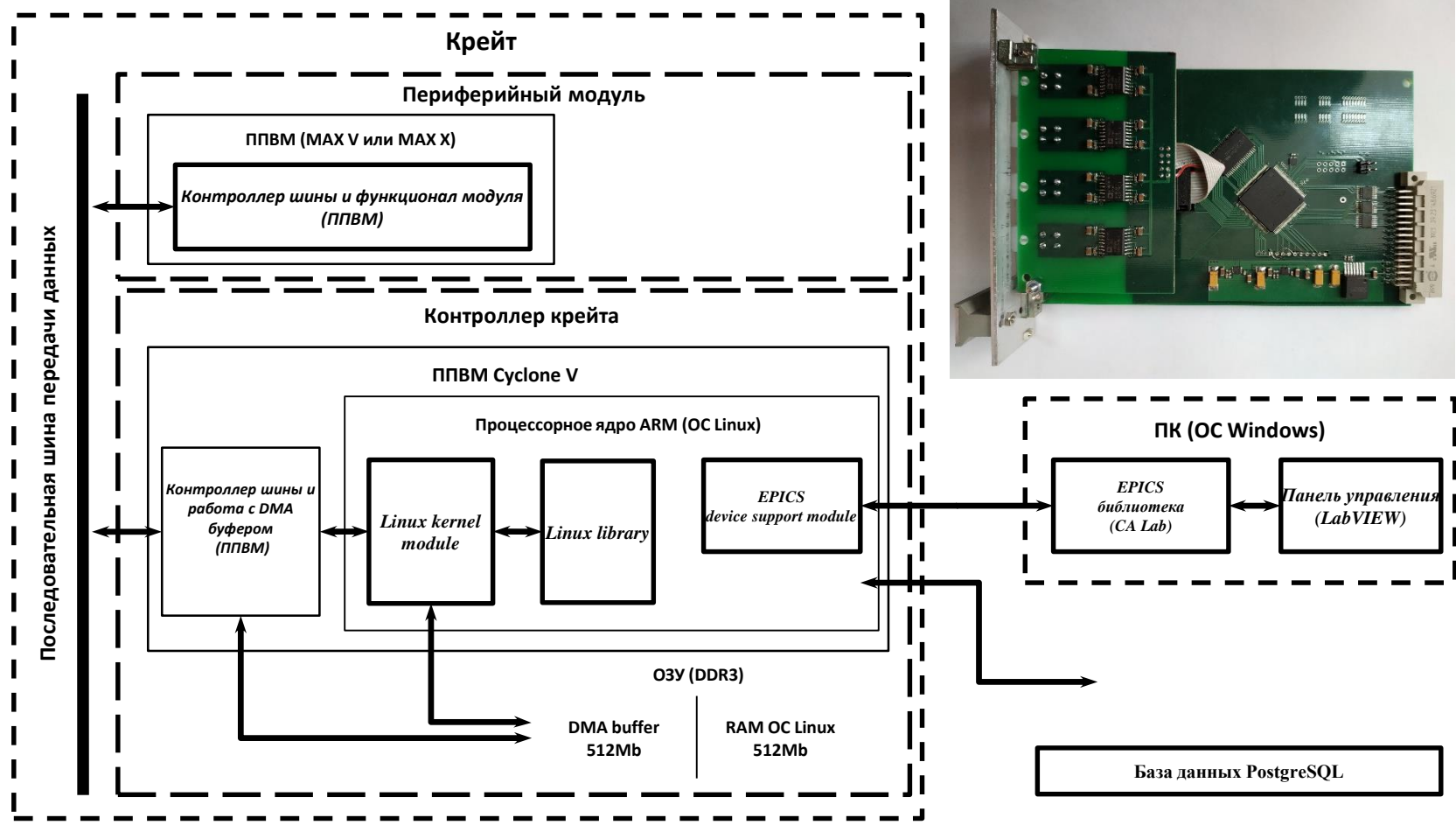
Ток – 2x160 А.

Плотность тока в плазме – 3.5 А/см<sup>2</sup> (2XIIВ – 1.6 А/см<sup>2</sup>).



# CAT: автоматизация

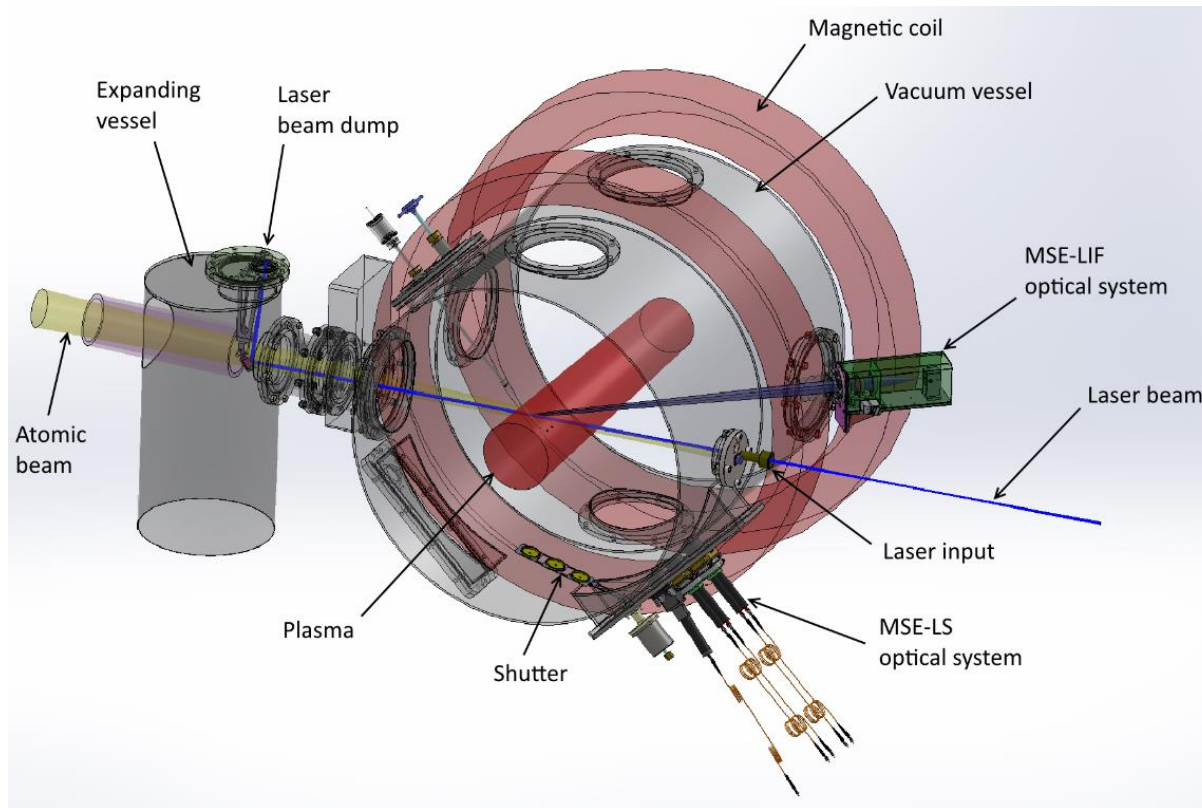
В рамках НИР разрабатывается модульная система автоматизации и измерений, которая может быть масштабирована и применена на других установках.



# ГДЛ и САТ: диагностика плазмы с высоким $\beta$ (MSE-LIF)

**Измерение магнитного поля  $\sim 0.01$  Т в плазме по анализу излучения диагностического пучка дейтерия**

- Базовый метод: динамический эффект Штарка (расщепление линии D- $\alpha$ ) используется для измерений  $|B|$  в ГДЛ
- + лазер-индуцированная флуоресценция (LIF): резонансное возбуждение оптических переходов лазерным излучением. Разрешение определяется шириной линии генерации лазера.



Проект диагностики MSE-LIF на ГДЛ в точке остановки быстрых ионов (максимум давления). Используется существующий диагностический пучок DINA-5M 50 кэВ, 4 А.

## Методика реализации:

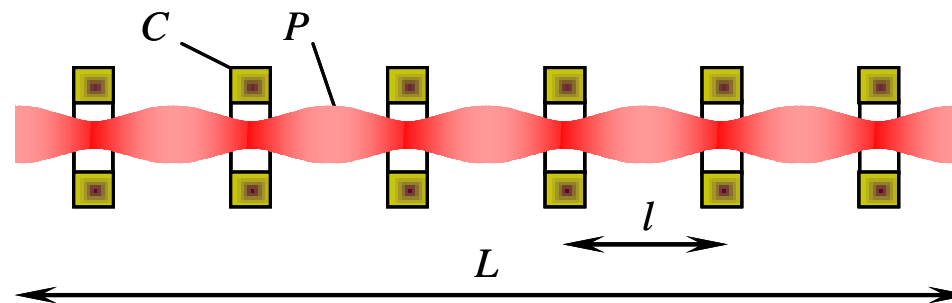
- стабилизация продольной скорости атомарного пучка (уменьшение доплеровского уширения);
- сканирование длины волны лазера по штарковскому спектру атомов пучка  $\Rightarrow$  индукция маг. поля  $|B|$ . Разрешение по времени определяется периодом сканирования.
- сканирование поляризации лазера  $\Rightarrow$  направление вектора  $B$ . Разрешение по времени определяется периодом модуляции.

## Задачи:

- ❖ измерение профиля (по 8-ми точкам) величины и направления вектора магнитного поля в плазме в эксперименте на ГДЛ и САТ.

# Гофрированное магнитное поле

Б. Б. Кадомцев. *Магнитные ловушки с «гофрированным» полем / Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, под ред. М. А. Леонтовича, М.: Изд. АН СССР, Том III, с. 285, 1958.*



пространственные масштабы:

$l$  – период гофрировки

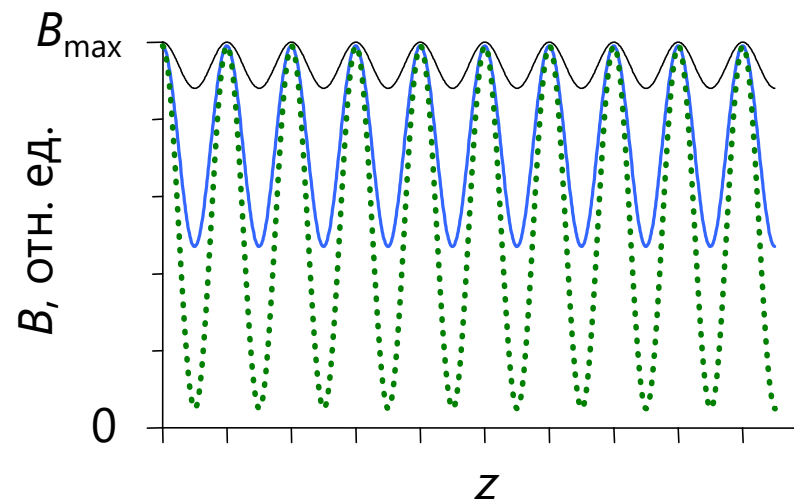
$L$  – длина многопробочной секции

$N = L/l \gg 1$  – количество периодов

$\lambda$  – длина свободного пробега ионов

глубина гофрировки:

$$R_m = B_{\max}/B_{\min}$$



$R_m^{-1} \ll 1$

$R_m^{-1} \sim 1$

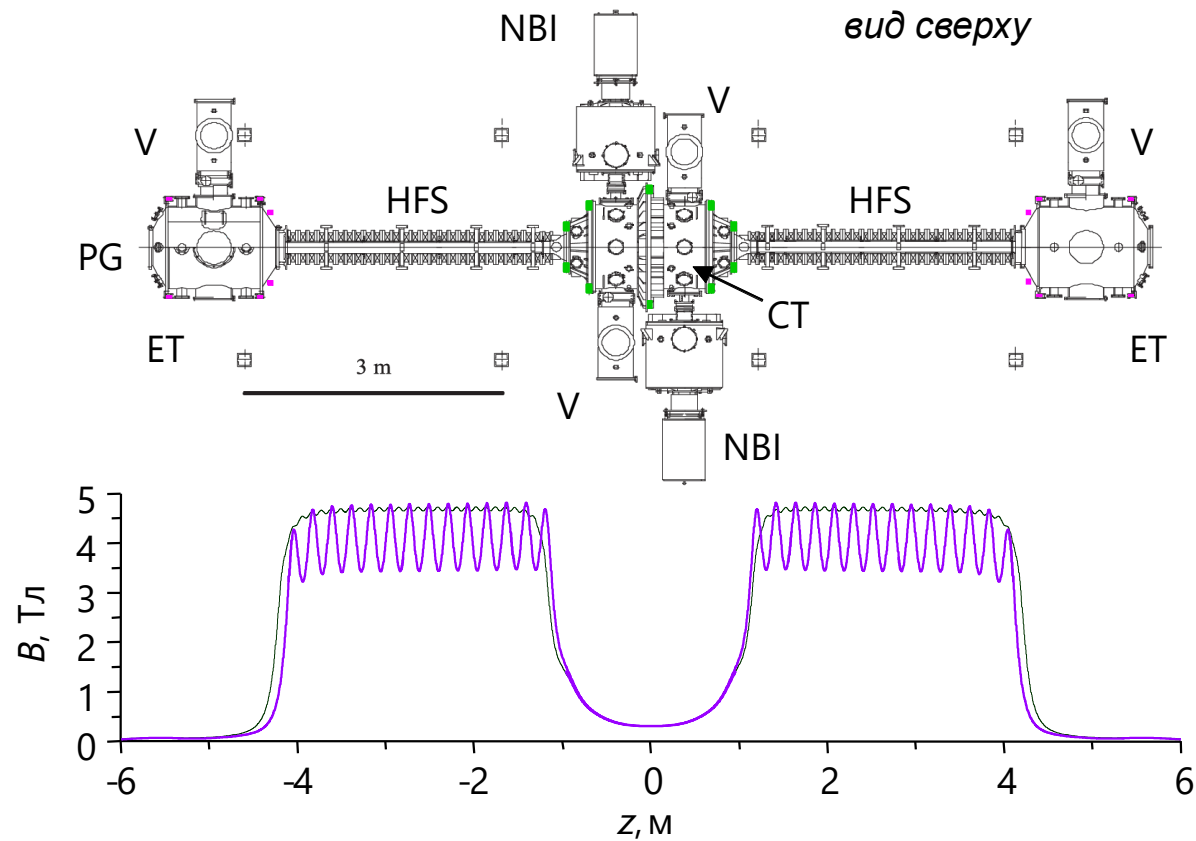
$R_m \gg 1$

$$R_{m,\text{eff}} = \frac{B_{\max}}{l} \int \frac{ds}{B(s)}$$

в формулы входит эффективная  
глубина гофрировки

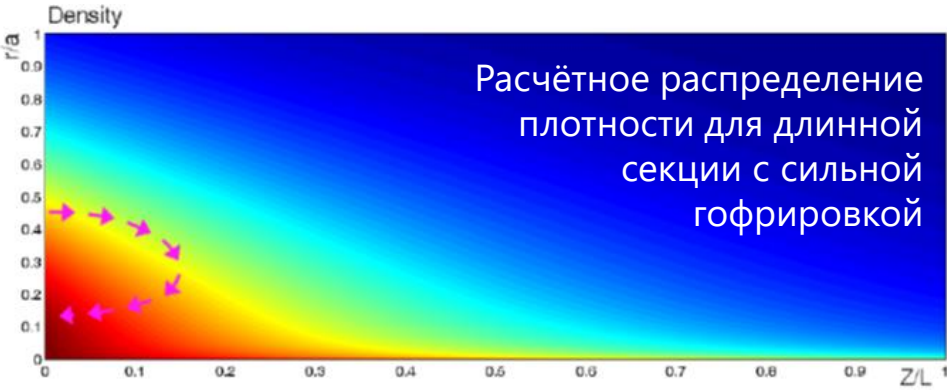
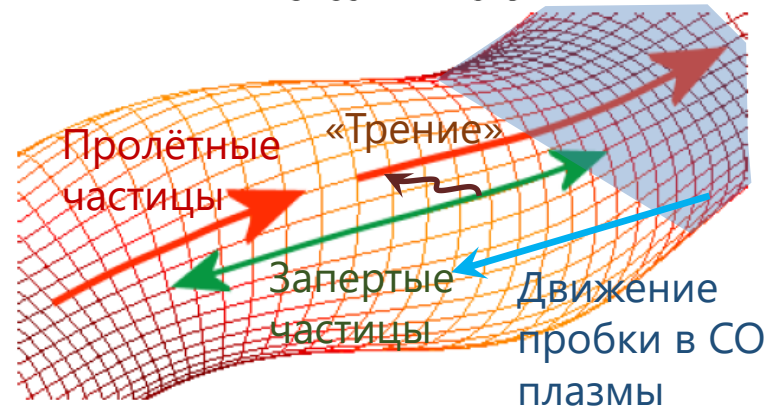
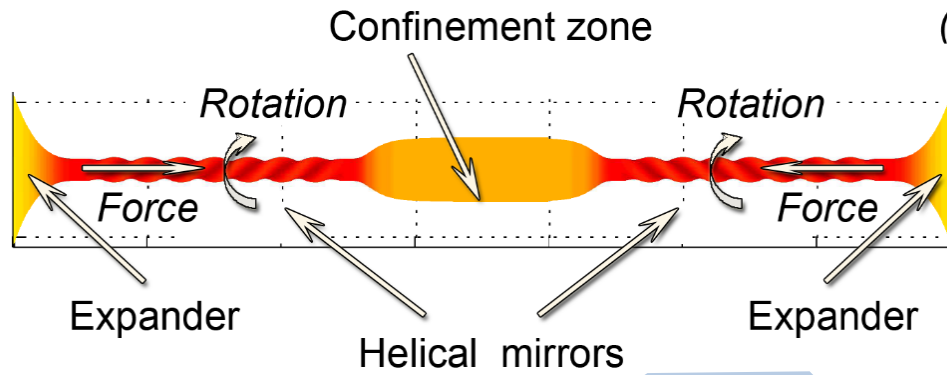
ГОЛ-3, ГОЛ-NB:  $R_m = 1,4$

# Установка ГОЛ-NB



- Инжекция водородных пучков (25 кэВ, 0.75 МВт, 5 мс) ведётся поперёк плазмы.
- В настоящее время работы ведутся при однородном поле в соленоидах.
- Установка имеет модульную конструкцию → возможность изменения конфигурации; первые эксперименты через 2 мес. после начала проекта.

# Винтовое удержание



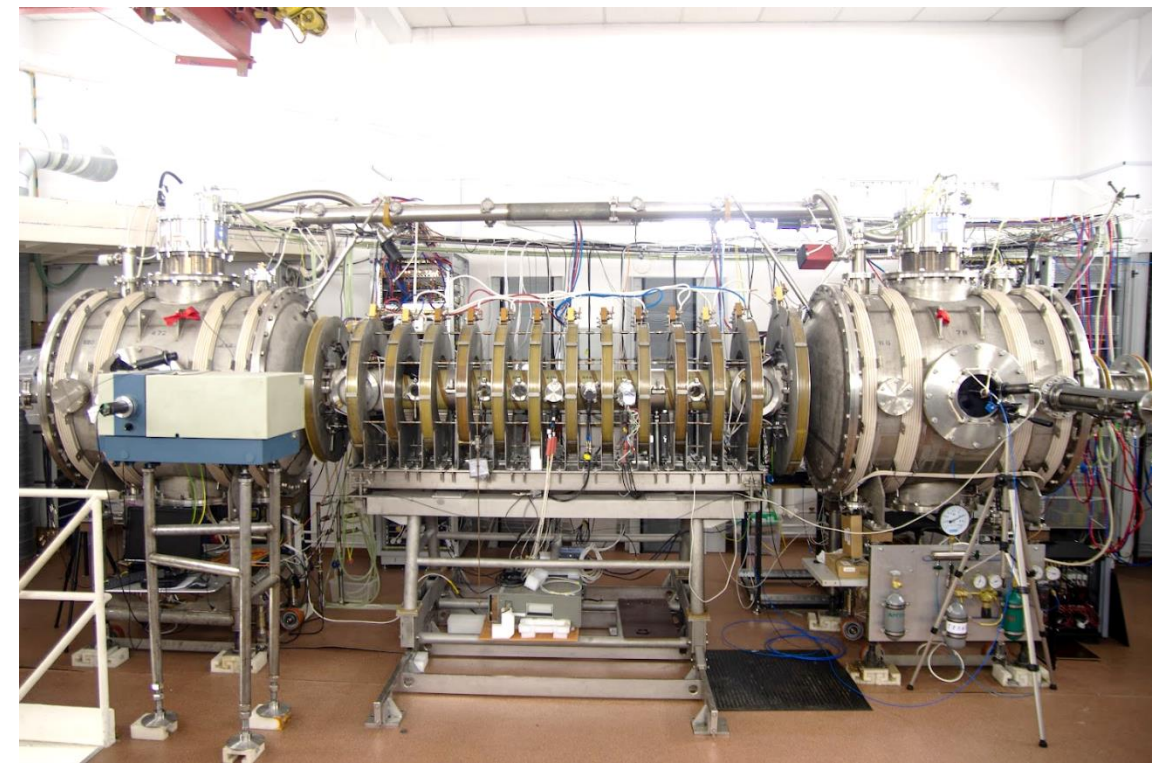
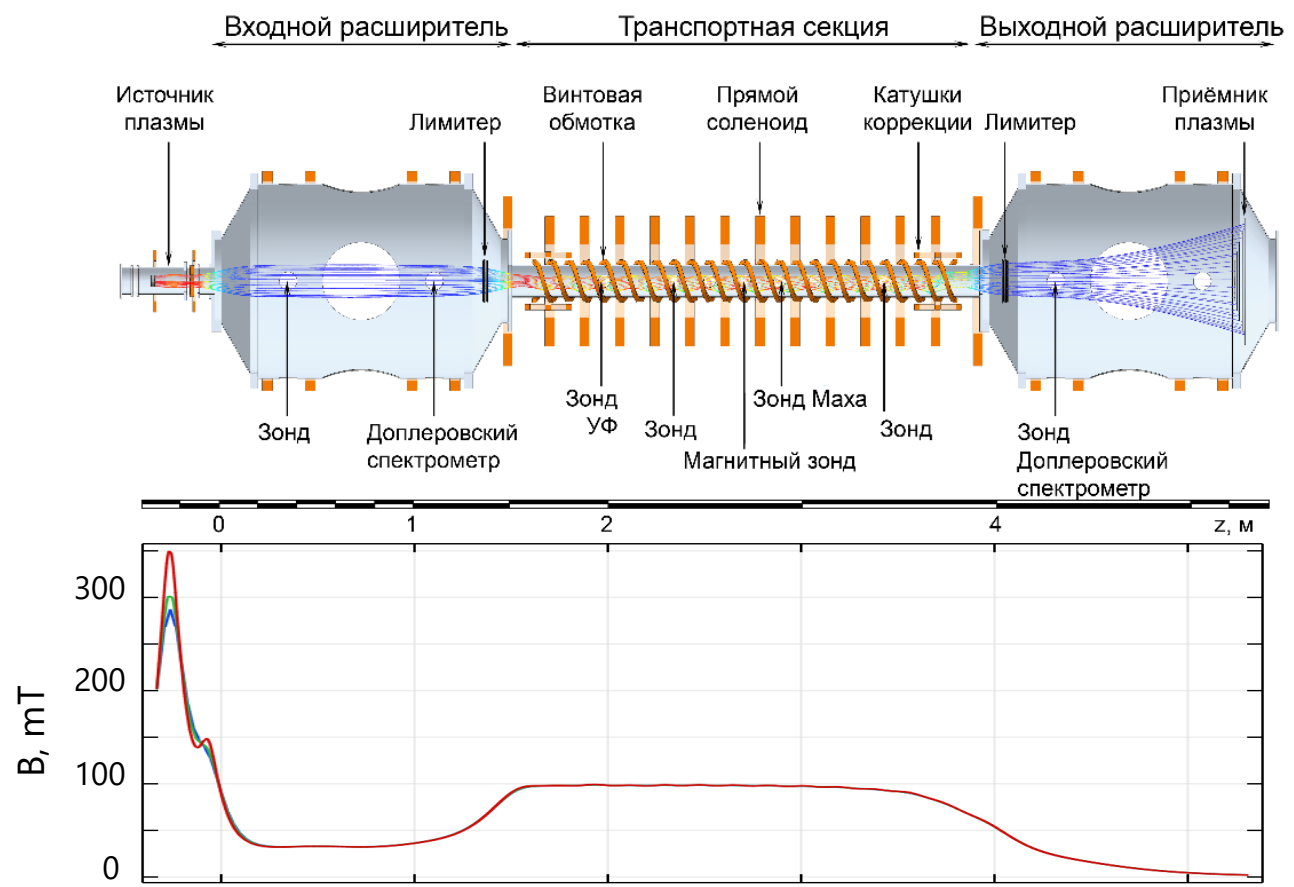
- (a) • Магнитное поле с винтовой симметрией. Продольная и радиальная компоненты сравнимы
- Есть гофрировка вдоль каждой силовой линии
- Пробка движется в системе отсчёта вращающейся плазмы
- Передача импульса: пробка → запертые частицы → пролётные частицы
- Удержание:  $v_z \uparrow \nabla n$  Плотность  $n \sim \exp(-L/z_0(r))$
- Ускорение:  $v_z \updownarrow \nabla n$
- + ГДМЛ с винтовыми пробками может быть эффективнее многопробочного
- + Возможно радиальное сжатие плазмы
- + Возможно коллективное рассеяние при сверхзвуковой скорости потока
- Сложная магнитная система
- Плохое удержание вблизи оси

При неизменной температуре соотношение полного потока вещества через выходное сечение винтовой пробки составляет:

$$R = \frac{\int n(r, z = 0) \exp\left(-\frac{L}{z_0(r)}\right) \cdot 2\pi r dr}{\int n(r, z = 0) \cdot 2\pi r dr}$$

A. D. Beklemishev, AIP CP **1771** (2016) 040006. DOI: 10.1063/1.4964191

# Установка СМОЛА



	$h$ [cm]	$N$ [1]	$r$ [cm]	$B_z$ [mT]	$R_{mean}$ [1]	$n_i$ [ $10^{18} \text{ m}^{-3}$ ]	$T_i$ [эВ]	$T_e$ [эВ]	$\omega$ [ $\text{s}^{-1}$ ]	$\lambda/h$ [1]
Удержание	18	12	5	40-100	1 – 1.7	0.8–4	~5	~30	$(8-11) \times 10^5$	1–8
Ускорение				70	1 – 1.5	3-4				$(8-11) \times 10^5$



# Проект ГДМЛ

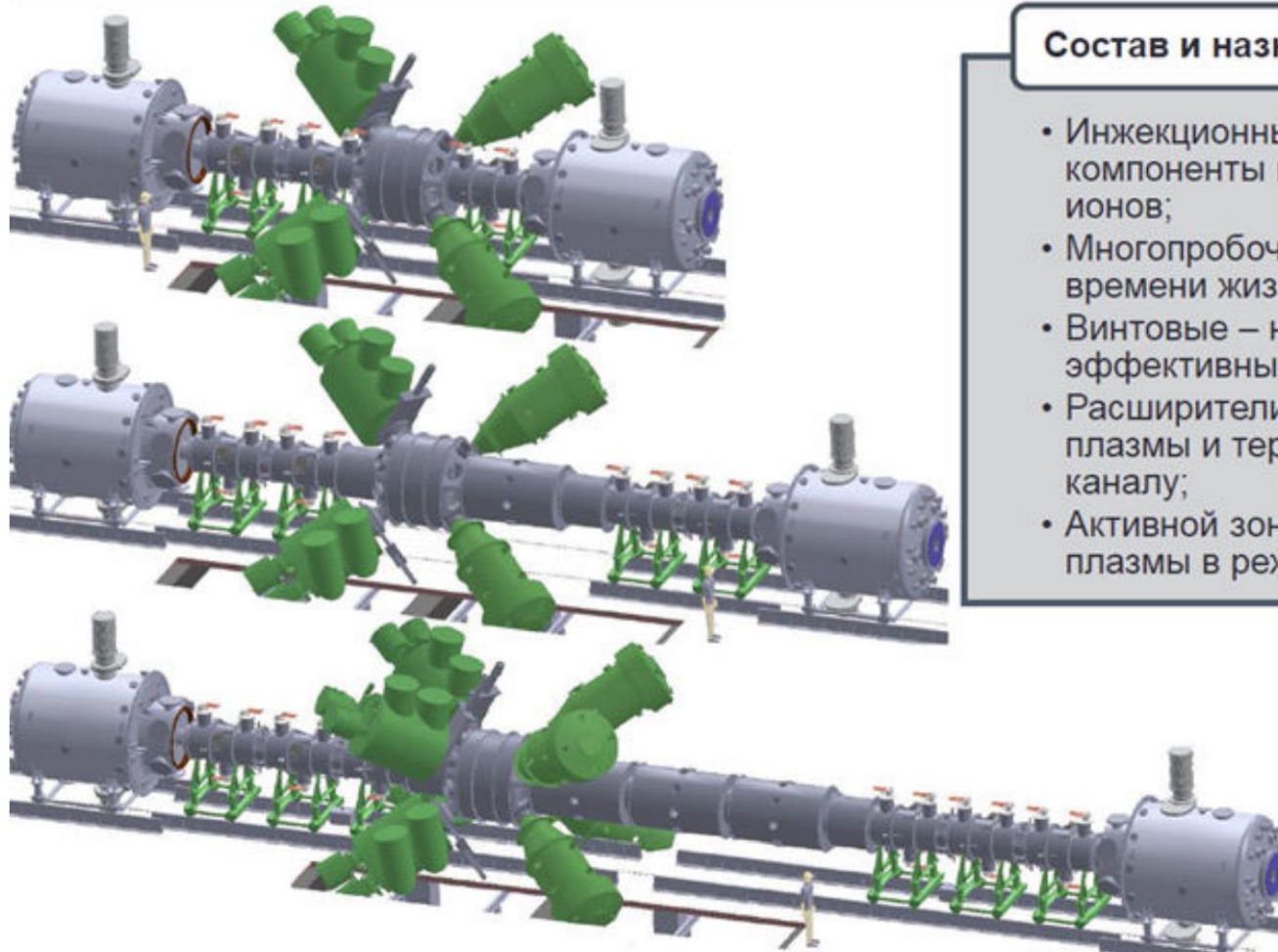
Целью проекта газодинамическая многопробочная ловушка (ГДМЛ) является экспериментальная проверка и изучение вопросов нагрева и удержания горячей плазмы в осесимметричных магнитных ловушках открытого типа:

- Проверка предложенных ранее и разработка новых подходов к удержанию плазмы в осесимметричных ловушках открытого типа в условиях квазистационарного разряда ( $\sim 1$  с).
- Достижение расчетных параметров и построение экспериментальных скейлингов компактного источника нейтронов на основе газодинамической ловушки с анизотропной плазмой.
- Построение экспериментальной базы данных для определения облика термоядерного реактора на основе ловушки открытого типа и конструирования его прототипа.
- Отработка ключевых неядерных технологий и конструктивных решений, которые лягут в основу прототипа реактора.

# Проект ГДМЛ (2014)

## Модульная конструкция из крупных блоков

- придаёт гибкость и надёжность системе;
- позволяет решать задачи с разными составом и конфигурацией установки.



## Состав и назначение модулей

- Инжекционные – для нагрева ионной компоненты плазмы и создания плещущихся ионов;
- Многопробочные – для повышения продольного времени жизни частиц в плазме;
- Винтовые – новый, потенциально более эффективный вариант многопробочных;
- Расширители – для приёма истекающей плазмы и термоизоляции по электронному каналу;
- Активной зоны – для накопления горячей плазмы в режиме диамагнитного удержания.

## Параметры

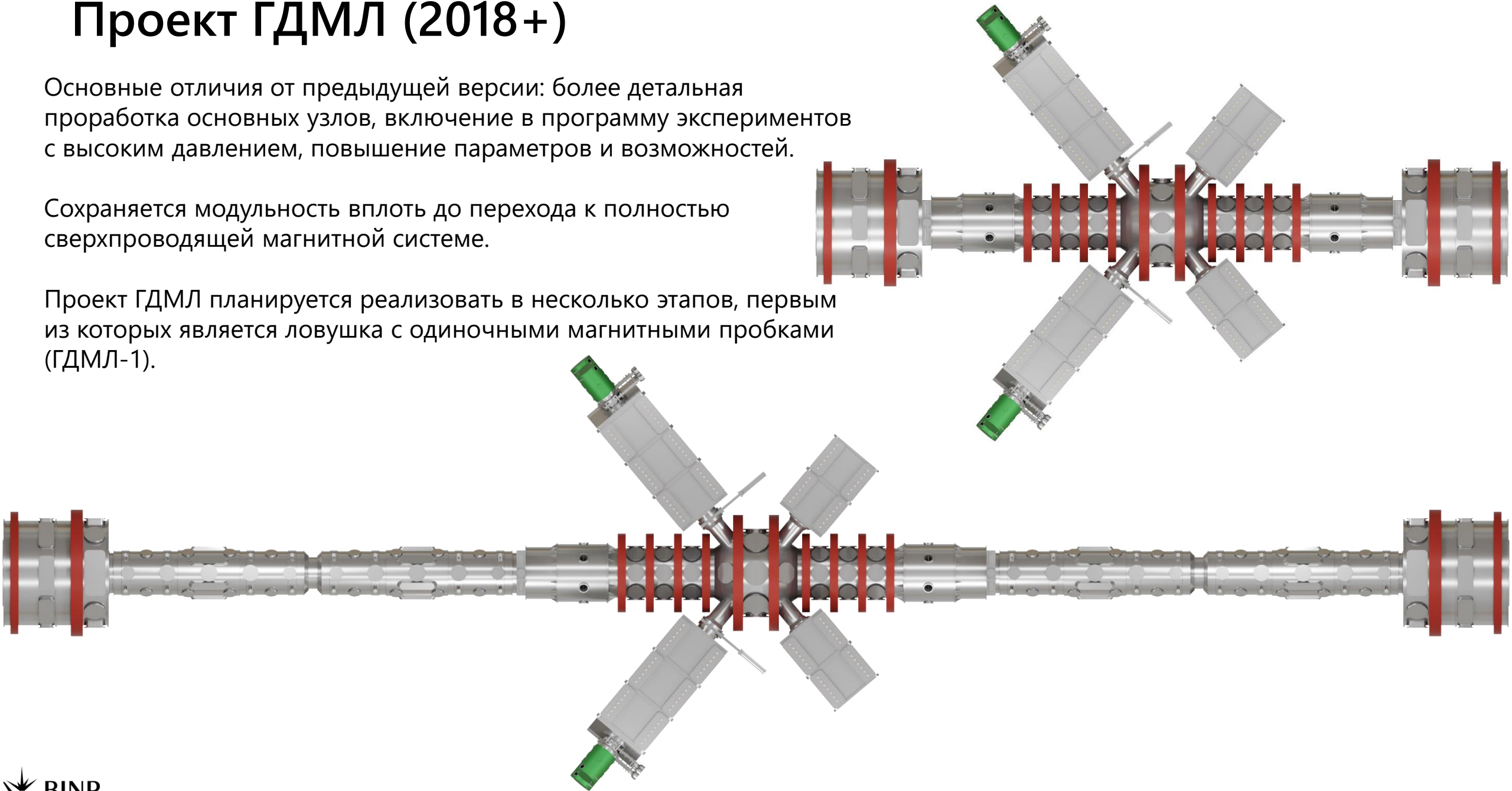
- Длина – до 30 м;
- Сверхпроводящая магнитная система, на поле от 3 -13Тл;
- Мощность до 30МВт в импульсах 1с и более.

# Проект ГДМЛ (2018+)

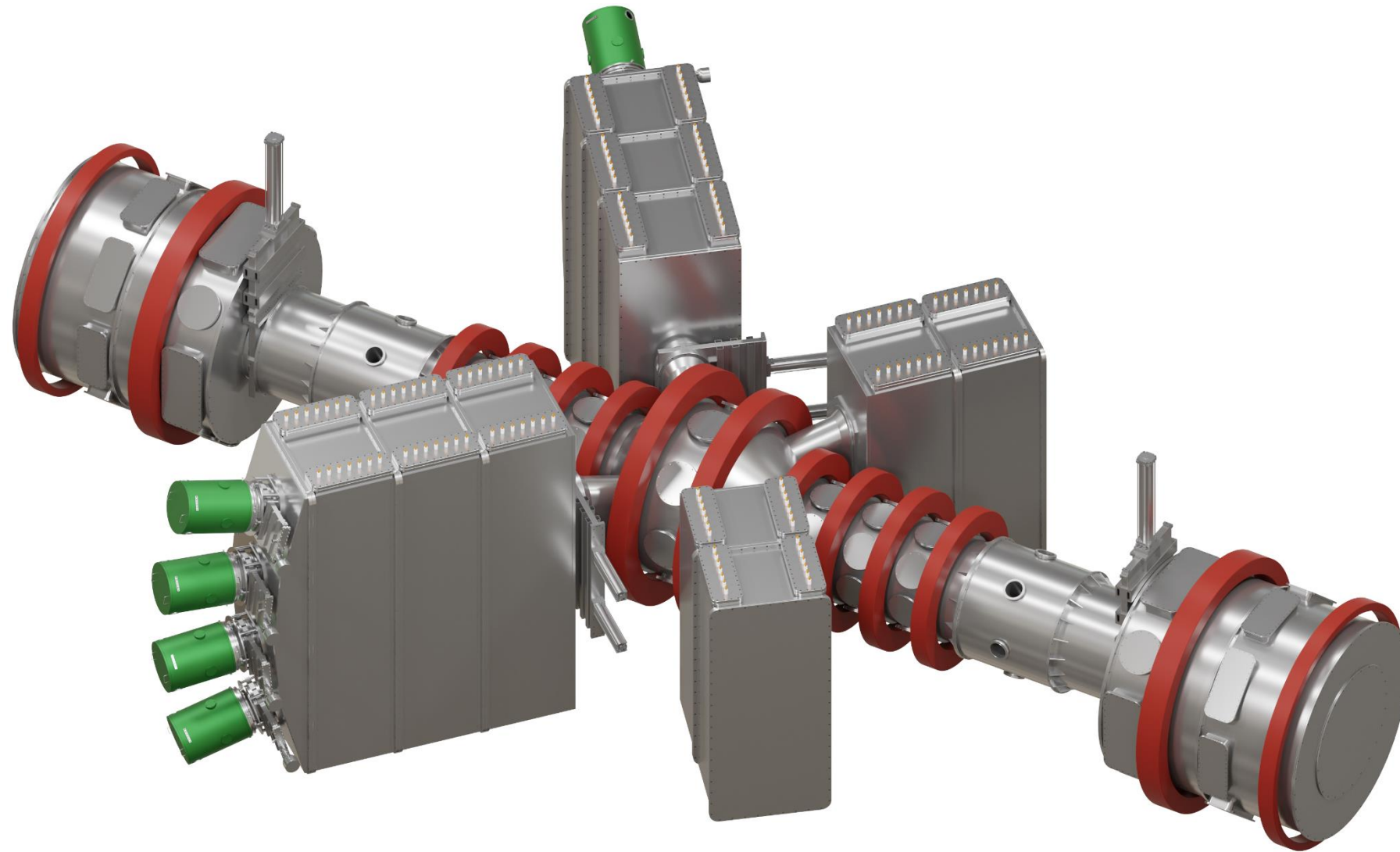
Основные отличия от предыдущей версии: более детальная проработка основных узлов, включение в программу экспериментов с высоким давлением, повышение параметров и возможностей.

Сохраняется модульность вплоть до перехода к полностью сверхпроводящей магнитной системе.

Проект ГДМЛ планируется реализовать в несколько этапов, первым из которых является ловушка с одиночными магнитными пробками (ГДМЛ-1).



# ГДМЛ-1: параметры установки

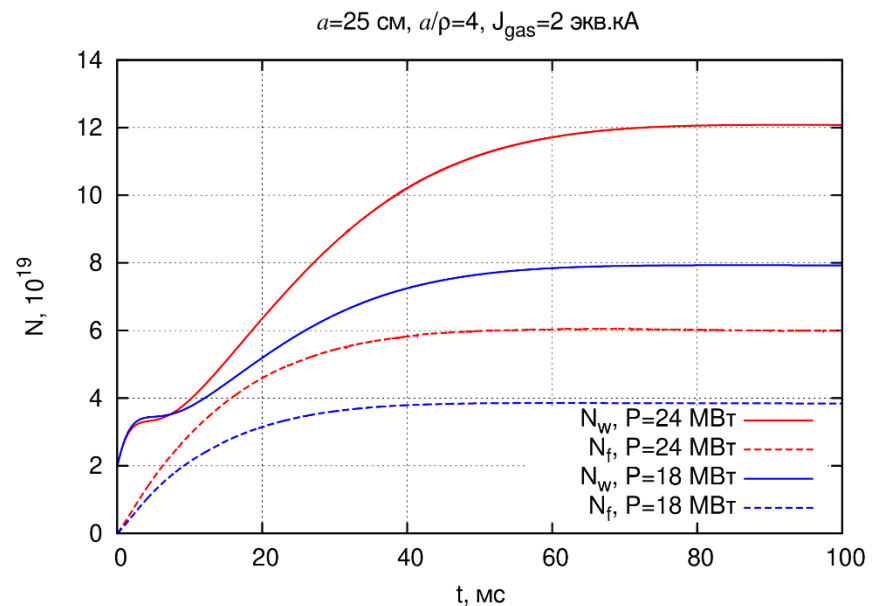
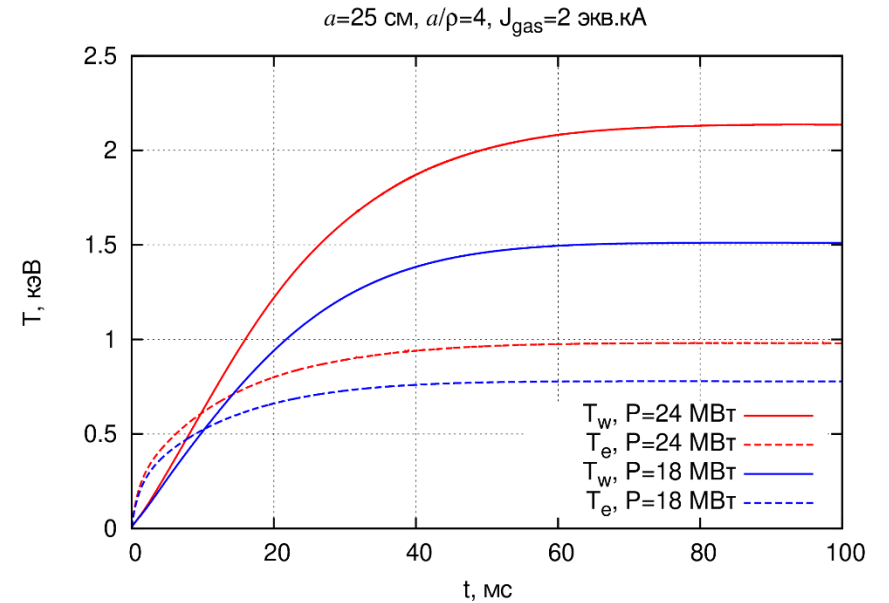


Общая длина	17 м
Радиус плазмы (центр)	10 – 30 см
Магнитное поле:	
в центре	0 – 1.5 Тл
в пробках	12 – 20 Тл
длительность импульса	2 – 10 с
Атомарная инжекция ( $H^0$ )	
мощность	24 МВт
длительность импульса	0.5 – 2 с
энергия атомов	30 кэВ
ЭЦР-нагрев	
частота	170 ГГц
мощность	2 – 6 МВт
длительность импульса	2 с

# ГДМЛ-1: параметры плазмы

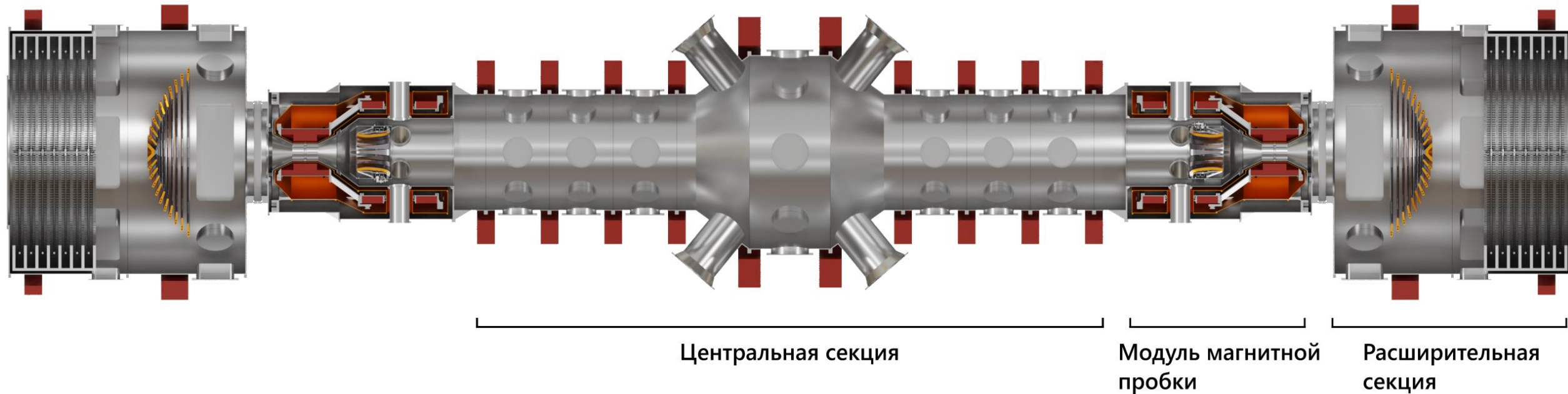
Результаты моделирования одномерным кинетическим кодом DOL без учета ЭЦР-нагрева:

	ГДЛ	ГДМЛ-1		
Мощность инъекции, МВт	5	18	18	24
Радиус плазмы ( $\beta = 0$ ), см	14	25	25	25
Радиус плазмы (относительный)	2.6	4	4	4
Температура электронов/ионов, кэВ	0.3/?	0.5/0.7	0.8/1.5	0.9/1.5
Плотность плазмы в центре, $10^{13} \text{ см}^{-3}$	3	4.2	3.6	4.0
Диамагнетизм, мВб	0.5	21	43	82
Время удержания энергии, мс	2	3	5.4	6.4
Среднее по сечению (локальное, эксп.) $\beta$	0.2 (0.6)	0.47	0.68*	0.79*
Темп напуска газа, экв. А.	?	3500	2000	2000



# Магнитная система

Магнитная система является комбинированной: импульсный медный соленоид соединяется с криостатами магнитной пробки, содержащими сверхпроводящие обмотки. В зоне расширительной секции предусмотрены медные постоянно включенные обмотки для контроля формы силовой линии.



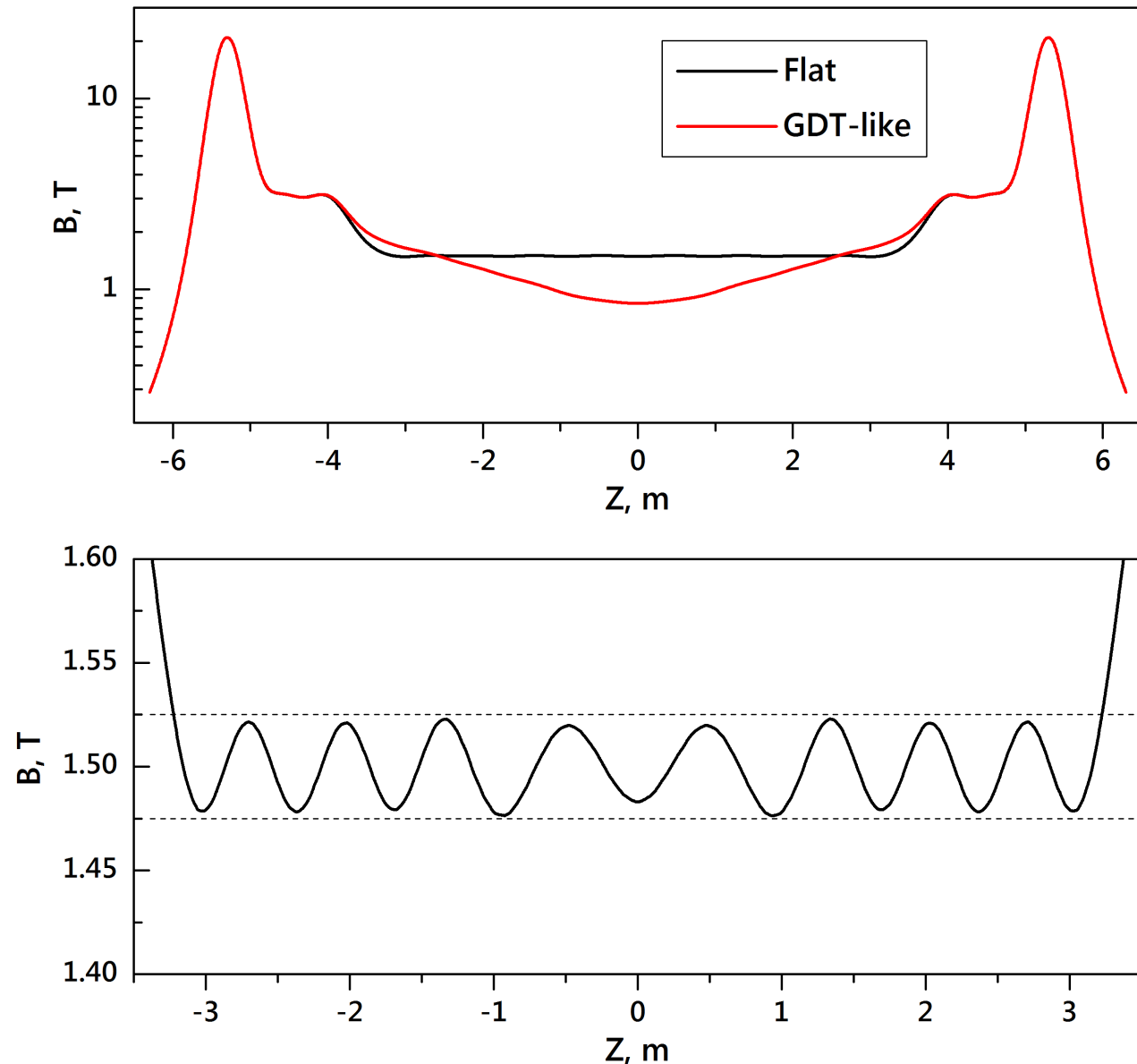
# Магнитная система

Магнитная система предусматривает индивидуальное питание катушек центральной секции и эксперименты с произвольным профилем магнитного поля амплитудой до 1.7 Тл.

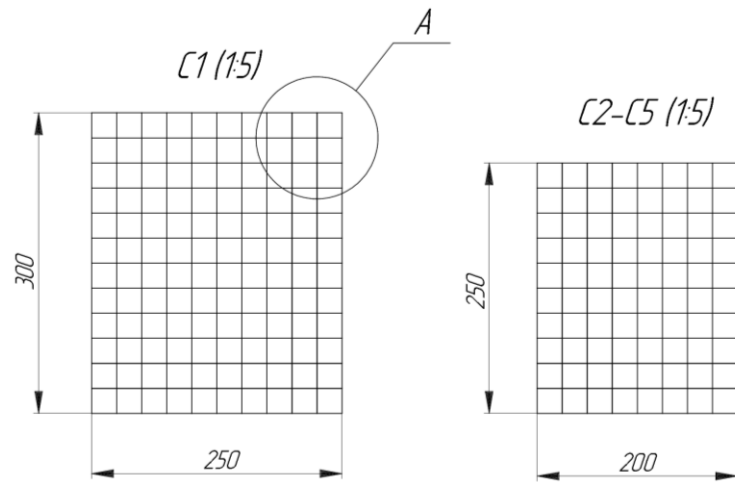
Два типичных сценария эксперимента – режим с «параболическим» профилем поля и режим с «плоским» профилем.

Система питания катушек предусматривает подстройку профиля поля во время разряда.

Неоднородность магнитного поля в режиме с плоским профилем составляет 1.5% / 3% для силовых линий  $R = 15 \text{ см} / 30 \text{ см}$ .



# Магнитная система: медный соленоид

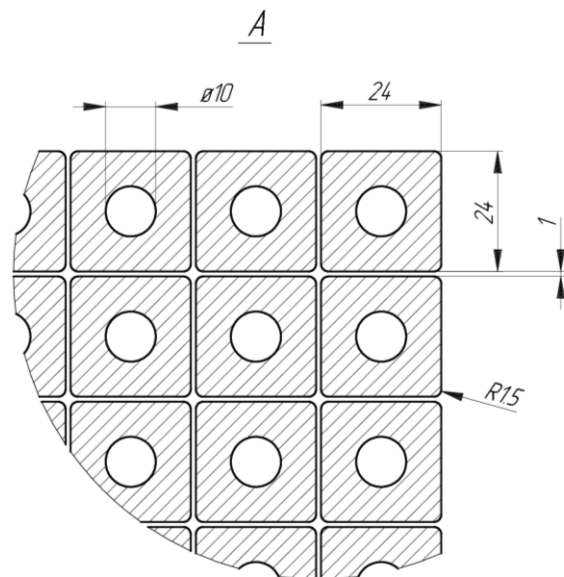


Катушки центральной секции изготавливаются из медного проводника квадратного сечения с каналом охлаждения.

Магнитная система рассчитана на частоту повторения импульсов 1 раз в 10 мин. при максимальном токе.



П.П. Хвостенко и др. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕРМОЯДЕРНАЯ УСТАНОВКА ТОКАМАК Т-15МД 2019 ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, т. 42, вып. 1, с. 15-38



Энергия поля в медном соленоиде, МДж	27.5
Масса меди, т	24
Предельная температура после импульса, °С	60
Период повторения импульсов, мин	10
Активная мощность при макс. токе, МВт	27
Сопротивление катушки С1, мОм	32.6
Сопротивление катушек С2-С5, мОм	14.2



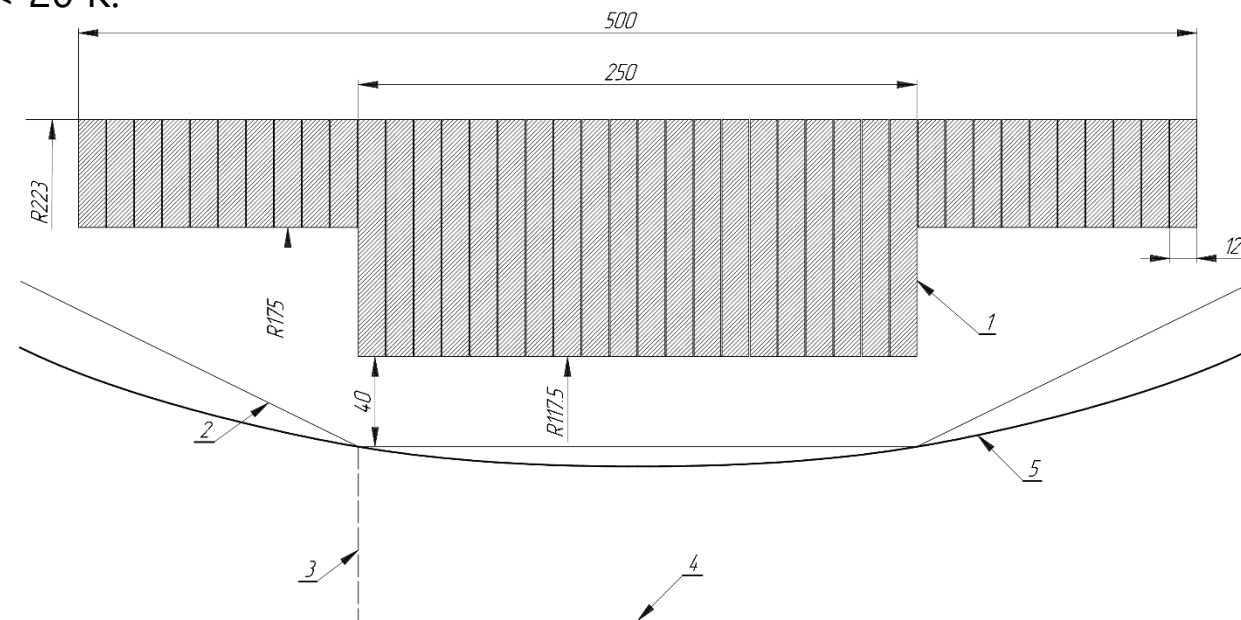
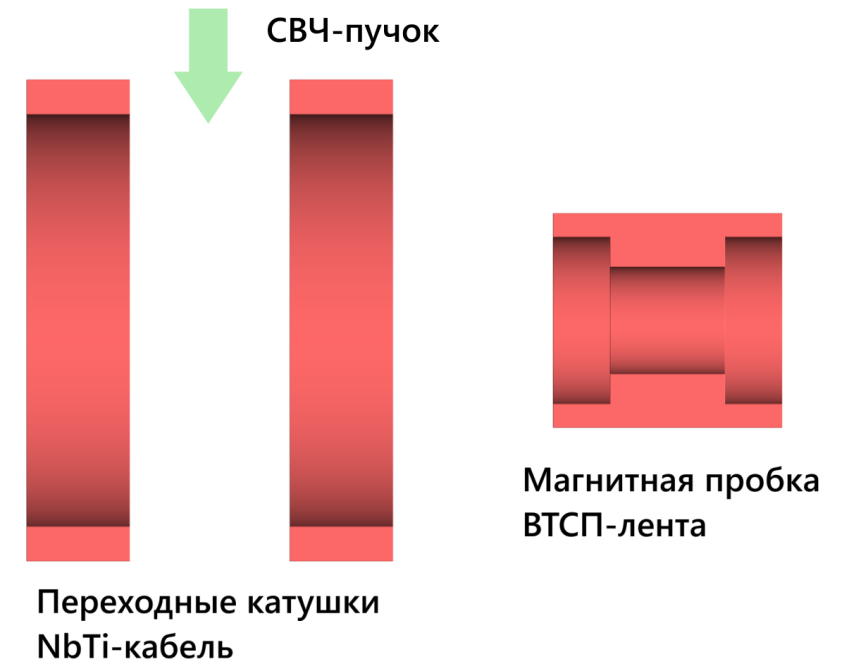
# Магнитная система: СП обмотки

Сверхпроводящие обмотки модуля магнитной пробки размещены в едином криостате.

Одна из основных функций переходных катушек – поддержание постоянного магнитного поля величиной 3 Тл в области ввода СВЧ-пучков. Дополнительной функцией переходных катушек является экранировка соленоида магнитной пробки от импульсных наводок.

Основная магнитная пробка ГДМЛ – соленоид с магнитным полем 20 Тл, апертурой диаметром 234 мм и магнитным потоком 0.74 Вб. Соленоид изготавливается из высокотемпературного сверхпроводника второго поколения SuperOx и рассчитан на работу при температуре  $< 20$  К.

Тип проводника	2G REBCO ВТСП-лента 12 мм
Способ намотки	Двойные галеты переменной высоты
Изоляция	Нержавеющая сталь
Число витков	7995
Рабочий ток, А	1008
Индуктивность, Гн	10.9
Энергия, МДж	5.5
Длина ленты, км	10

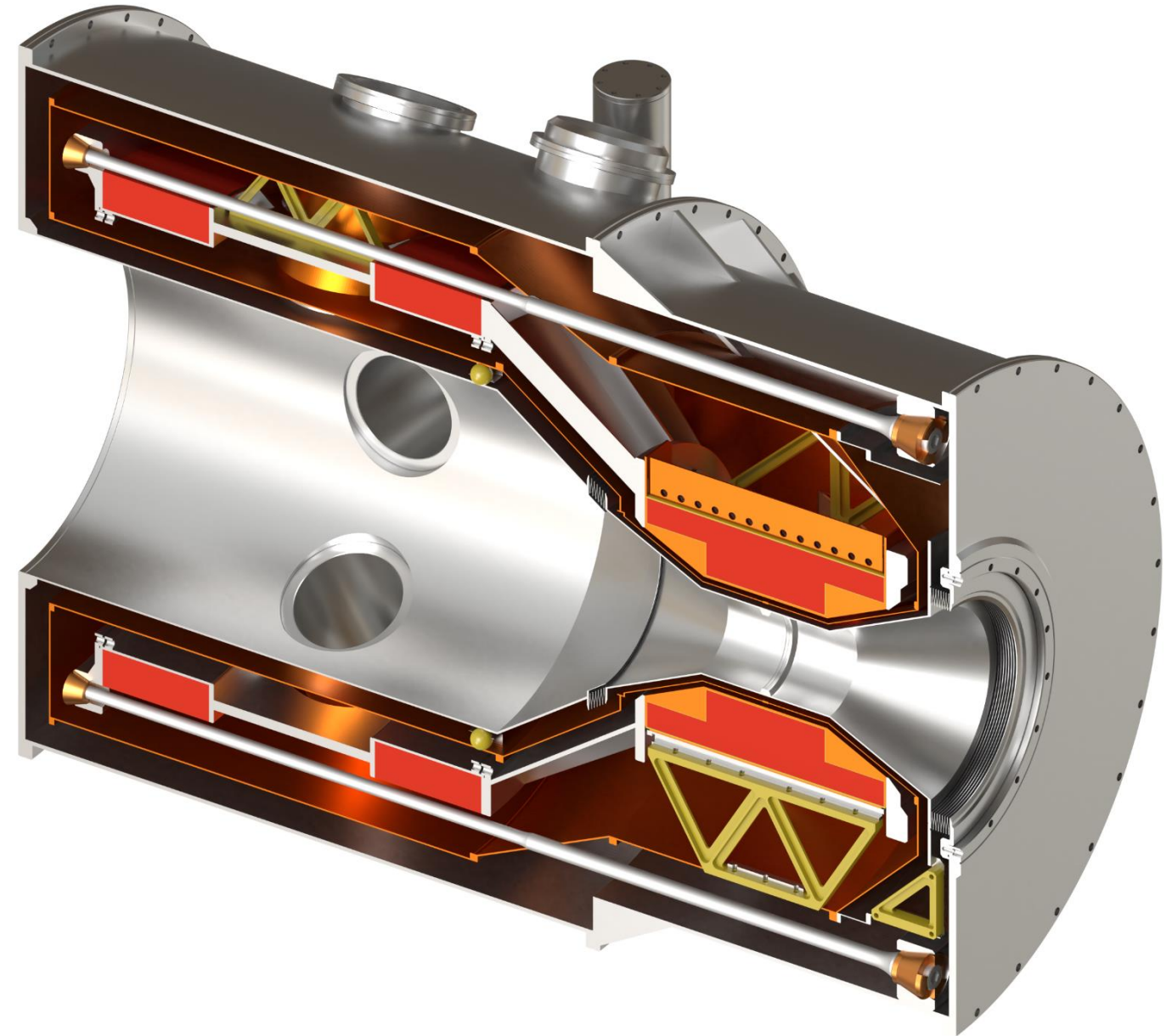


# Магнитная система: криостат

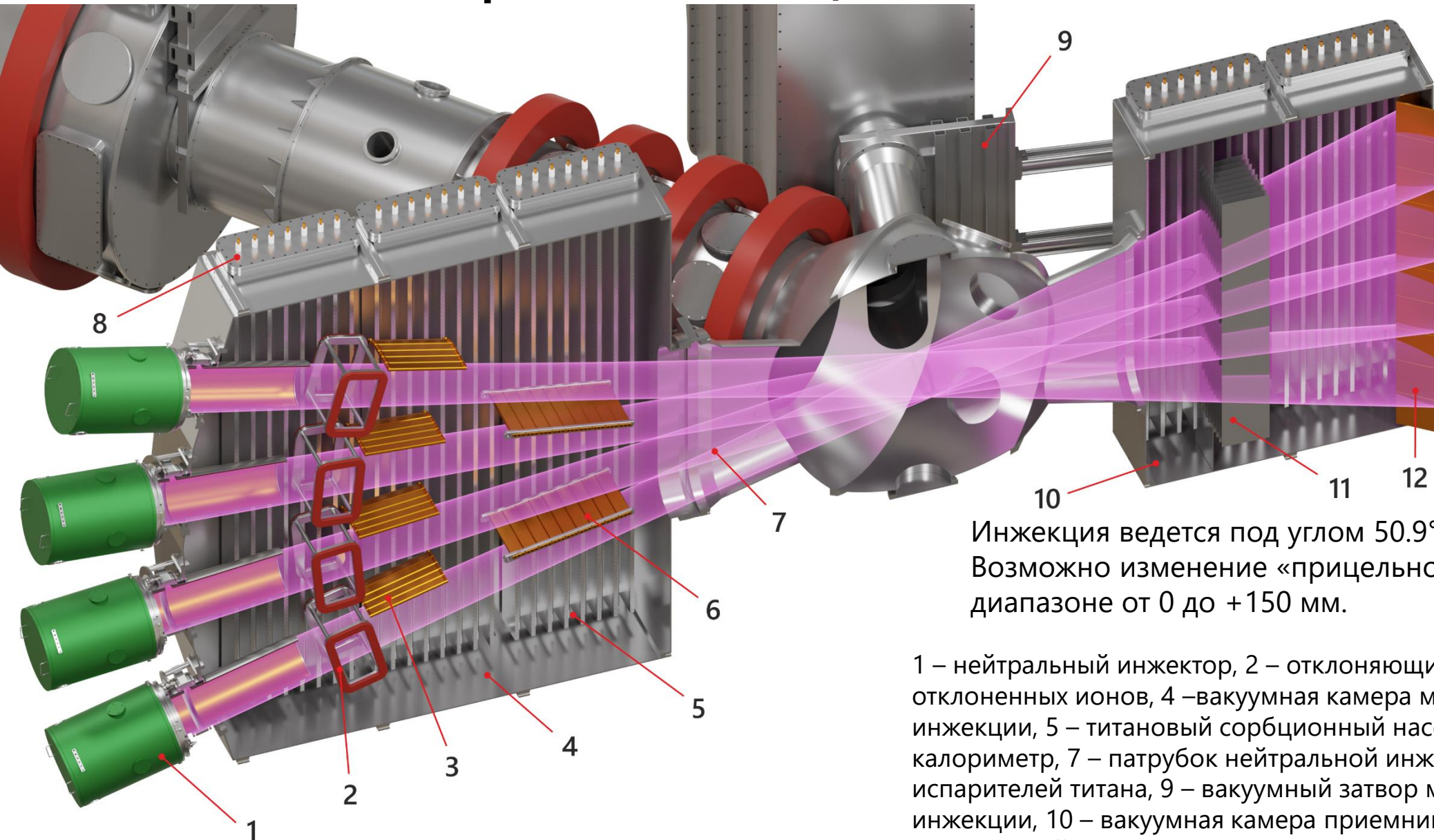
Опорная структура криостата рассчитана на подключение к основной магнитной системе, а также установку дополнительных магнитных секций, например: многопробочных секций и катушек секции расширителя.

Внутренняя стенка криостата является частью вакуумной камеры для удержания плазмы – в ней располагаются системы стабилизации и газовой подпитки плазмы.

6 сквозных портов предназначены для диагностики плазмы и ввода СВЧ-пучков на частоте 170 ГГц для нагрева на второй гармонике ЭЦ-резонанса.



# Система атомарной инжекции



Инжекция ведется под углом  $50.9^\circ$  к оси установки. Возможно изменение «прицельного параметра» в диапазоне от 0 до +150 мм.

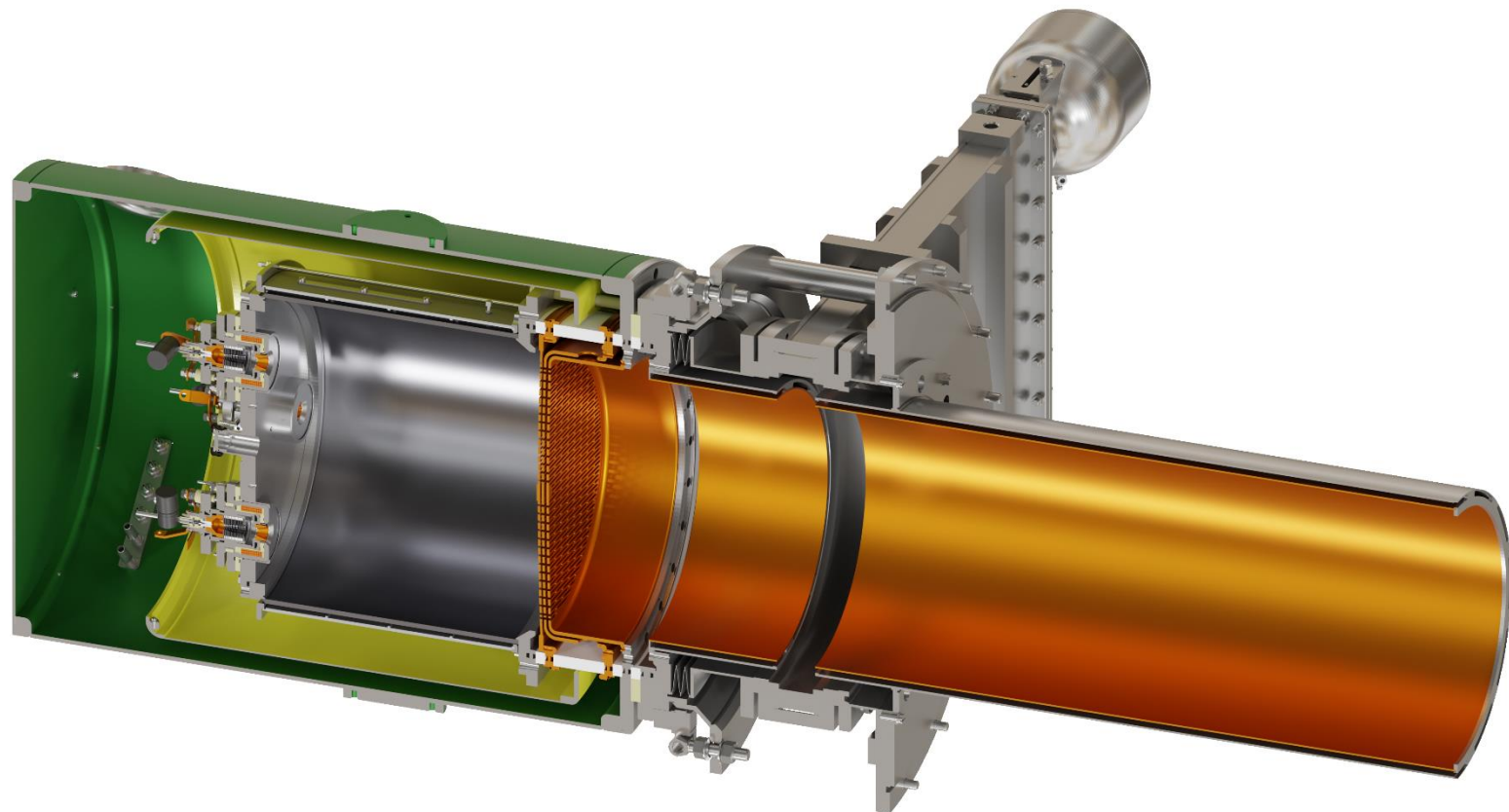
1 – нейтральный инжектор, 2 – отклоняющий магнит, 3 – приемник отклоненных ионов, 4 – вакуумная камера модуля нейтральной инжекции, 5 – титановый сорбционный насос, 6 – поворотный калориметр, 7 – патрубок нейтральной инжекции, 8 – сборка дуговых испарителей титана, 9 – вакуумный затвор модуля нейтральной инжекции, 10 – вакуумная камера приемника атомарных пучков, 11 – блок газовой задержки, 12 – приемник атомарных пучков.

# Система атомарной инжекции

Система атомарной инжекции мощностью 24 МВт построена на базе инжекторов водорода, разработанных в ИЯФ для установки C2-U TAE Technologies и других проектов.

Основные отличия: щелевая трех-электродная ионно-оптическая система с увеличенной толщиной сеток, увеличенное ускоряющее напряжение 30 кВ, охлаждаемые дуговые источники плазмы с увеличенной длительностью импульса.

Диаметр электродов ИОС, мм	340
Число электродов ИОС	3
Тип ИОС	Щелевая
Радиус кривизны сетки, мм	6000
Рабочий газ	Водород
Ускоряющее напряжение, кВ	30
Ток ионов, А	160
Мощность ионного пучка, МВт	4.8
Тип источника плазмы	Дуговой
Длительность импульса, с	0.5
Состав пучка по току ( $E : E/2 : E/3 : E/18$ ), %	85 : 10 : 4 : 1
Угловая расходимость вдоль щелей, мрад	
Угловая расходимость поперек щелей, мрад	

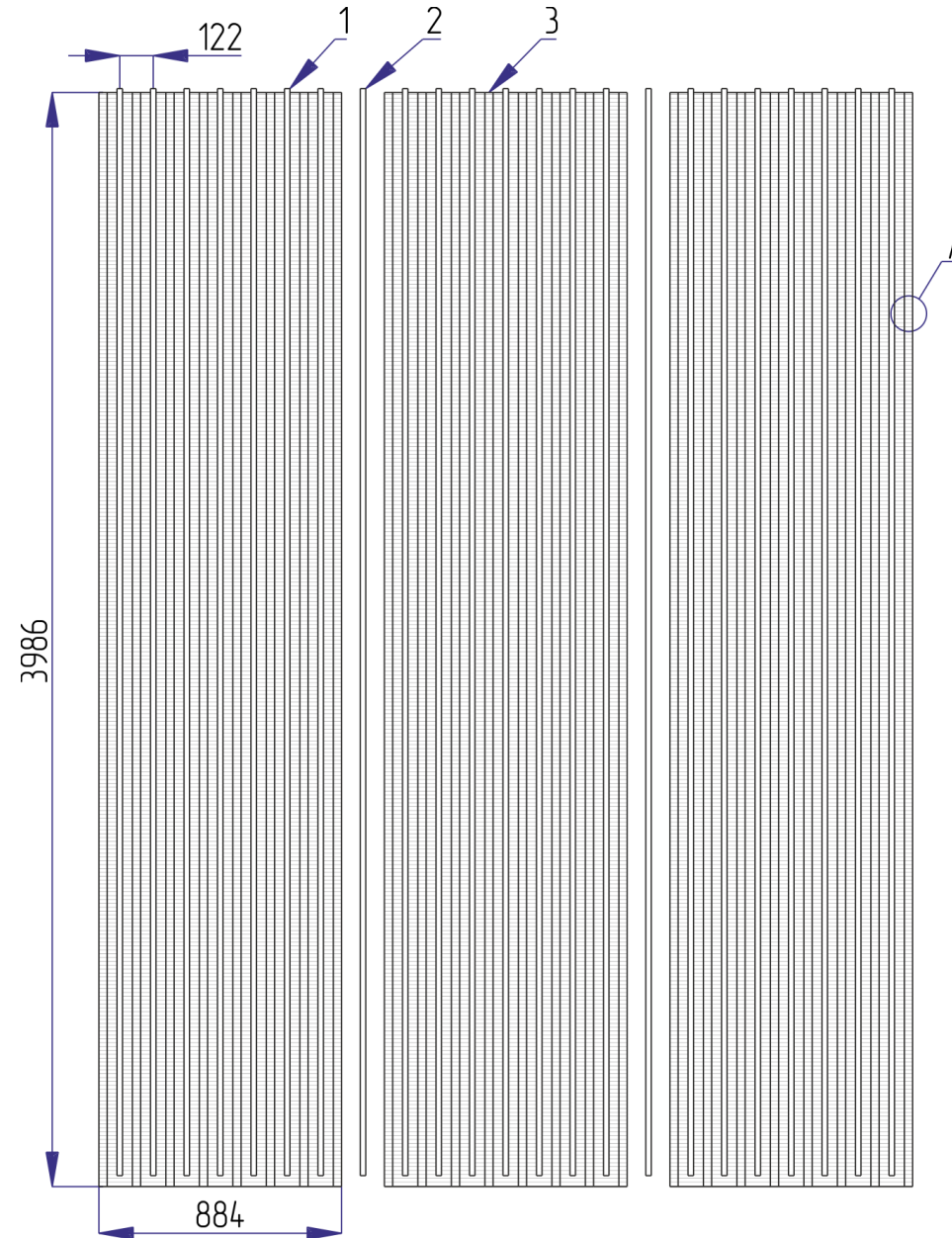
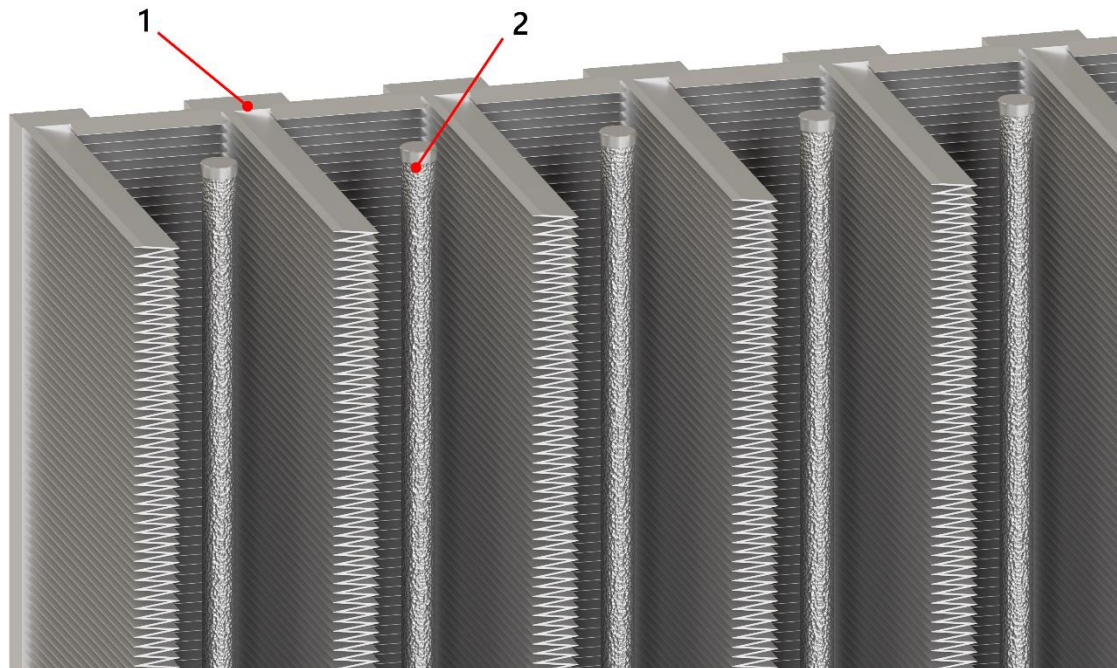


# Системы вакуумной откачки

Высокопроизводительные системы вакуумной откачки построены на базе титановых геттерных насосов с дуговым испарением титана.

Конструкция насосов является дальнейшим развитием откачивающей системы, разработанной для токамака ASDEX-U.

Суммарная производительность во всей установке – более 15 000 м<sup>3</sup>/с по водороду.



# Заключение

- В ИЯФ СО РАН планируется проведение масштабной кампании научно-исследовательских и конструкторских работ, направленных на экспериментальное обоснование новых эффективных методов удержания плазмы с целью создания термоядерного реактора на основе магнитной ловушки открытого типа.
- На установках СМОЛА и ГОЛ-NB проводятся исследования удержания плазмы в многопробочных и винтовых магнитных соленоидах, способных в десятки раз повысить время удержания плазмы в простой осесимметричной линейной ловушке.
- На установка ГДЛ и САТ будет предпринята попытка исследовать режимы удержания плазмы с  $\beta \rightarrow 1$ , способные обеспечить предельную плотность мощности термоядерных реакций в стационарной системе с магнитным удержанием плазмы. Оба подхода естественно комбинируются для достижения суммарного эффекта.
- Одновременно с экспериментами ведется разработка эскиза установки следующего поколения, на которой можно будет исследовать все указанные выше вопросы в условиях квазистационарного разряда, а также продемонстрировать готовность ловушек открытого типа для технологических применений, таких как мощные объемные источники нейтронов для различных применений.

# Полезные ссылки

## *Газодинамическая ловушка:*

- В. В. Мирнов, Д. Д. Рютов. Газодинамическая ловушка. Препринт ИЯФ. <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/20/073/20073422.pdf>
- А.А. Иванов, В.В. Приходько. Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы. DOI: 10.3367/UFNr.2016.09.037967
- P.A. Bagryansky et al Threefold Increase of the Bulk Electron Temperature of Plasma Discharges in a Magnetic Mirror Device. DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.205001
- P.A. Bagryansky, A.V. Anikeev, A. D. Beklemishev et al Confinement of Hot Ion Plasma with  $\beta = 0.6$  in the Gas Dynamic Trap DOI: 10.13182/FST11-A11568
- E.I. Soldatkina et al Measurements of axial energy loss from magnetic mirror trap DOI: 10.1088/1741-4326/ab95d2
- A.D. Beklemishev et al Vortex Confinement of Plasmas in Symmetric Mirror Traps DOI: 10.13182/FST10-A9497

## *Многопробочное удержание:*

- Budker G. I., Mirnov, V. V., Ryutov, D. D. Influence on Corrugation of the Magnetic Field on the Expansion and Cooling of a Dense Plasma. 1971 JETP Lett. 14 212
- A.V. Burdakov, A.A. Ivanov and E.P. Kruglyakov Axially Symmetric Magnetic Mirror Traps: Status and Prospects. DOI: 10.13182/FST07-A1306
- D. I. Skovorodin, A. D. Beklemishev Flow-Driven Drift Instability in a Multiple-Mirror Trap DOI: 10.13182/FST13-A16920
- V.V. Postupaev Start of experiments in the design configuration of the GOL-NB multiple-mirror trap DOI: 10.1088/1741-4326/ac69fa

## *Винтовое удержание:*

- A.D. Beklemishev Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps DOI: 10.13182/FST13-A16953
- A.D. Beklemishev Radial and axial transport in trap sections with helical corrugation. 2016 AIP Conf. Proc. 1771, 040006. DOI: 10.1063/1.4964191
- A.V. Sudnikov, et al. Plasma flow suppression by the linear helical mirror system. 2022 Journal of Plasma Physics 88 (1), 905880102. DOI: 10.1017/S0022377821001276

## *Удержание плазмы с высоким $\beta$ и FRC:*

- A.D. Beklemishev Diamagnetic "bubble" equilibria in linear traps DOI: 10.1063/1.4960129
- H. Gota et al Formation of hot, stable, long-lived field-reversed configuration plasmas on the C-2W device DOI: 10.1088/1741-4326/ab0be9

## *Проект ГДМЛ:*

- A.D. Beklemishev Novosibirsk Project of Gas-Dynamic Multiple-Mirror Trap DOI: 10.13182/FST13-A16872

## *Нейтронные источники:*

- P.A. Bagryansky et al Development strategy for steady-state fusion volumetric neutron source based on the gas-dynamic trap. DOI: 10.1088/1741-4326/ab668d