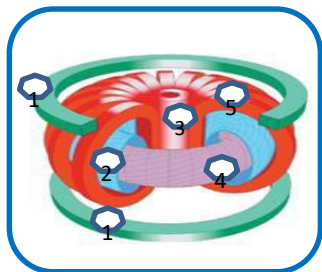




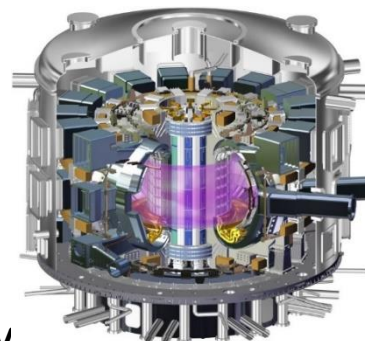
ROSATOM  
ИТЭР-Центр  
НИИЭФА  
НИКИЭТ  
ТРИНИТИ



NATIONAL RESEARCH CENTRE  
«KURCHATOV INSTITUTE»



«Большая модель» МТР (А.Д.Сахаров, И.Е.Тамм 1950)

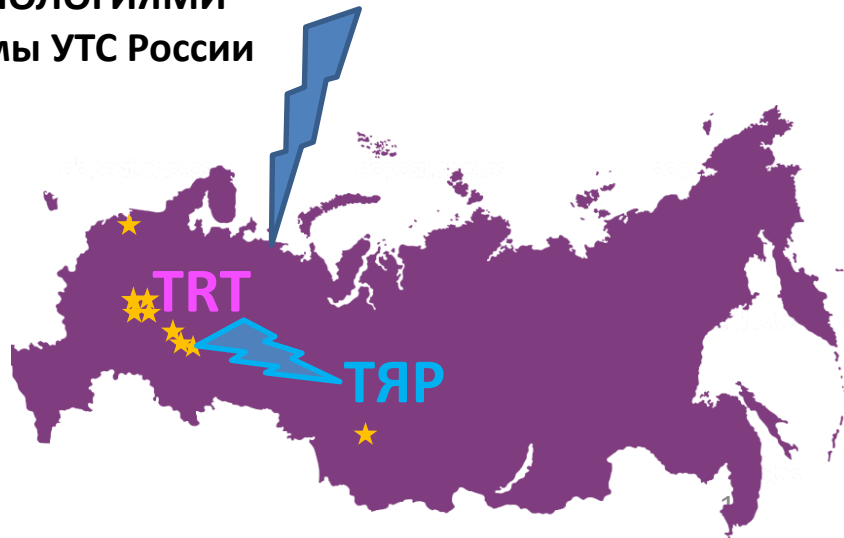


**ИТЭР**

## СТАТУС РАЗРАБОТКИ ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМ...

1. Основные цели и смыслы следующего шага Программы УТС России
2. Необходимые действия сегодня

**А.В.Красильников, С.В.Коновалов, Ю.А.Кашук**  
Учреждение ГК Росатом «Проектный Центр ИТЭР»  
[a.krasilnikov@iterf.ru](mailto:a.krasilnikov@iterf.ru)



# Статус магнитного УТС в мире

## Цель и смысл создания TRT

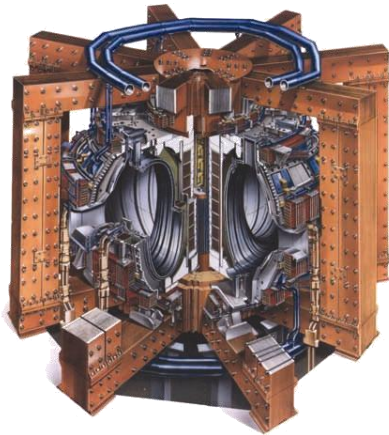
	Россия	ЕС	США	Япония	Китай	Корея	Индия
Основные действующие экспериментальные установки	T-11M Глобус-M2 ГДЛ T-15MD	JET JT-60SA ASDEX WEST W-7X	D-IIID NSTX	JT-60SA LHD	EAST	KSTAR	SST-1
Основной проект УТС	ITER	ITER	ITER	ITER	ITER	ITER	ITER
Национальные проекты УТС	<b>TRT</b> ТИН ГДМЛ Гибрид	DEMO	SPARK	DEMO	CFETR	DEMO	
Цель	Гибрид Т/я реактор	Т/я реактор	Т/я реактор	Т/я реактор	Т/я реактор	Т/я реактор	Т/я реактор

## JET

World's largest facility

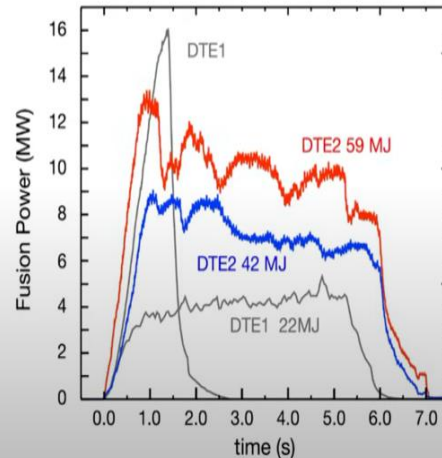
Fusion power record

16MW



## 5. JET achieved record fusion energy

High fusion power produced and sustained for 5 seconds



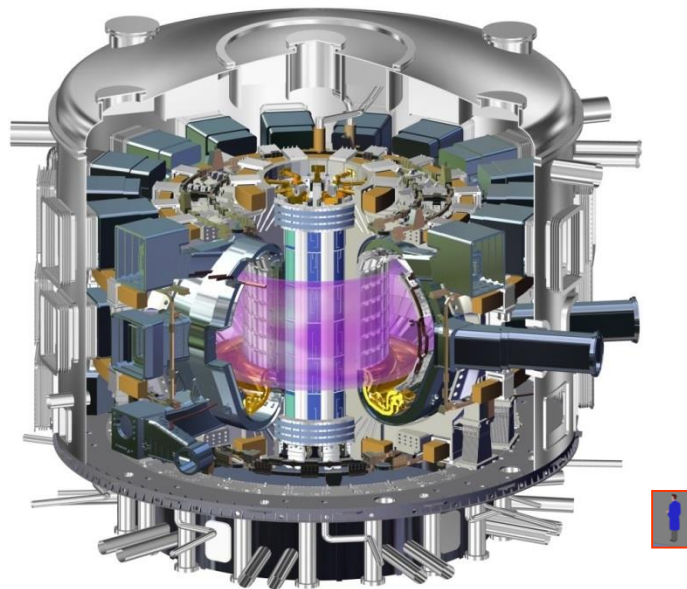
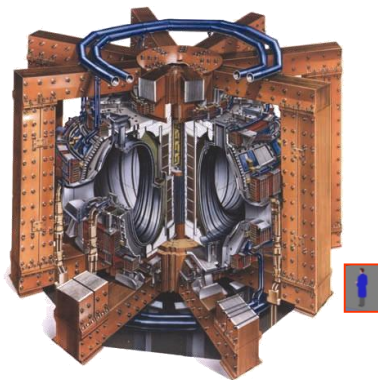
- ▶ First-ever high confinement plasmas using D-T with beryllium / tungsten wall
- ▶ Confirming **predictions** of plasma behaviour advances development of ITER high performance scenarios

**First DT fusion power record – 11MW** was reached at TFTR in 1997

**ITER:** Fusion power 500MW  
superconducting coils

**JET:**

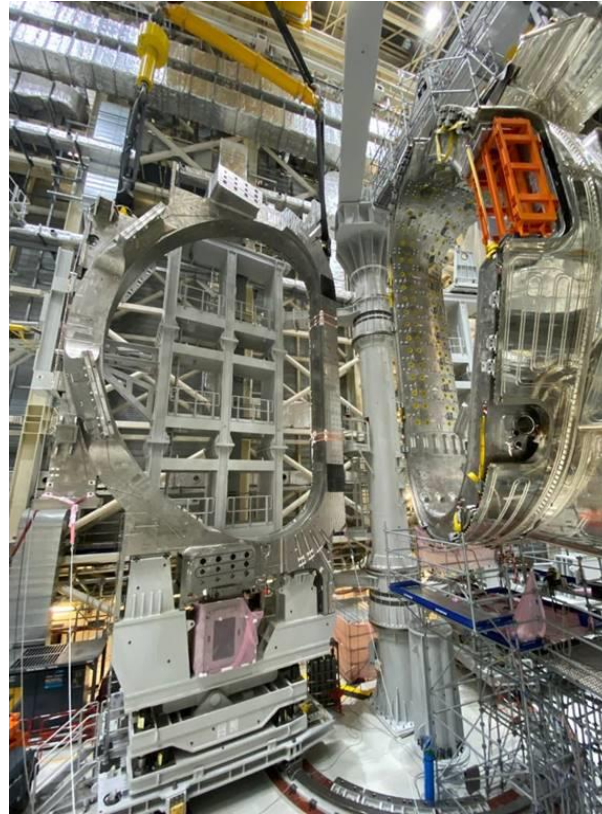
World's largest facility  
Fusion power record 16MW  
copper coils



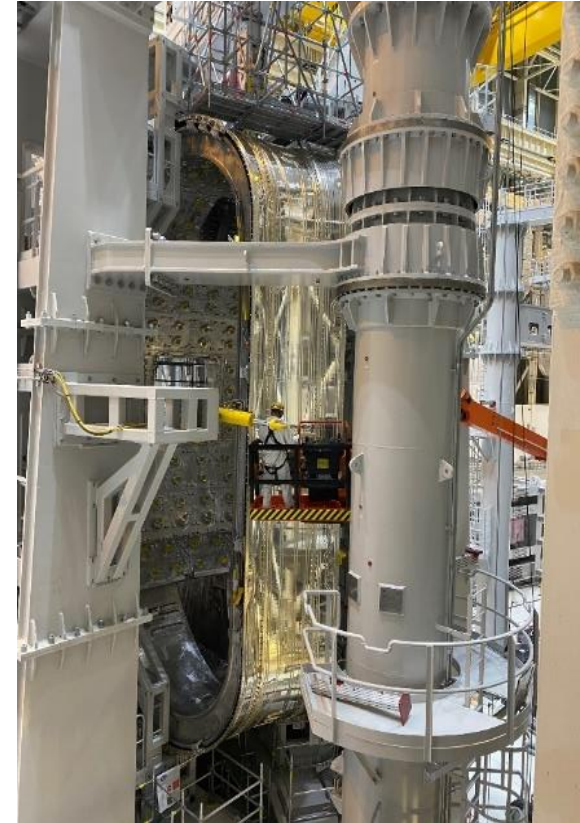
# Progress of Machine Delivery, Installation and Assembly



Central Column installation in the Pit



TF Coils #12 and #13 in SSAT#2

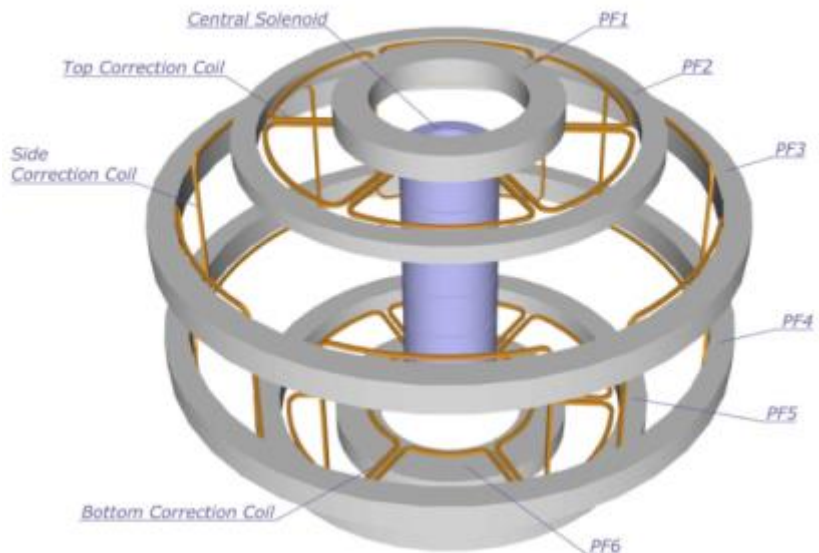


VVTS #6: Insulation Test

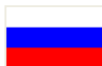
# Successful Installation of PF Coil #5 on 16 September 2021



# Poloidal Field Coil PF1



(PF1)

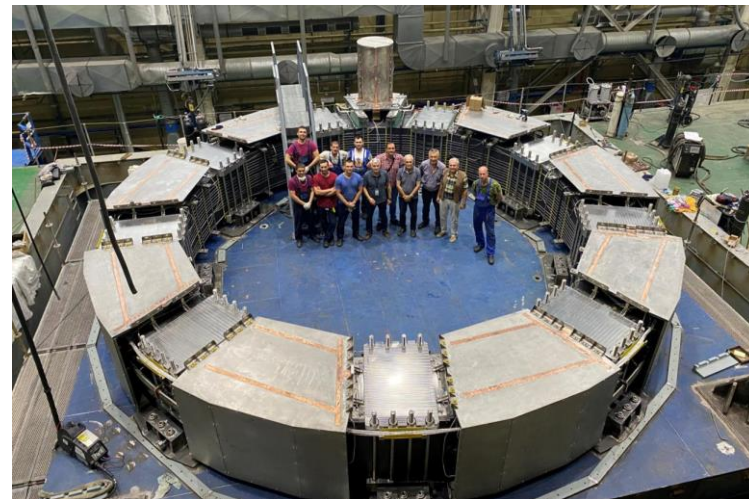


PF Coils



(PF2-6)

CCs



PF1 coil (diameter 9 m, weight 200 tons) is one of six coils of poloidal field in the magnetic system that serves to hold plasma in the ITER tokamak.

The coil contains eight superconducting double layer pancakes. The most important technologies and equipment for the manufacture of coil were developed at JSC NIIEFA, while manufacturing is carried out jointly by JSC SNSZ and JSC NIIEFA.

## Russia's key contractors

 <b>ROSATOM</b> State Corporation for Atomic Energy "Rosatom" (State Client)	 Ioffe Physical Technical Institute of the Russian Academy of Sciences
 National Research Centre "Kurchatov Institute"	 Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences
 JSC "D.V. Efremov Institute of the Electrophysical Apparatus"	 JSC "GYKOM"
 Institution "Project Center ITER"	 State Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovative and Thermonuclear Research
 "Fusion Center"	 КРИОГЕНМАШ JSC "Cryogenmash"
 FUEL COMPANY OF ROSATOM Joint-Stock Company "TVEL"	 JSC "GCMP"
 JSC "All-Russian Research and Development Design and Engineering and Technological Institute of Cable Industry"	 JSC "N.A. Dollezhall Research and Development Institute of Power Engineering"
 JSC "A.A. Bochvar High-Technological Research and Development Institute of Inorganic Materials"	 Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Over 30 major Russian research institutions and industries participate in developing and fabricating ITER components



## **Основные цели и смысл создания TRT** состоят в:

- разработке и интеграции в одной установке ключевых инновационных термоядерных технологий (создание дополнительной к ИТЭР технологической платформы TRT):
  - *ВТСП электромагнитной системы*, работающей при *высоком (8Т на оси плазмы) магнитном поле*;
  - *металлической и литиевой жидкометаллической первой стенки*;
  - *инновационного дивертора*;
  - системы инъекции атомов с *энергией 0.5 МэВ и мощностью несколько десятков МВт*;
  - *мегаватных квазистационарных ( $t > 100$  с) гиротронов с частотой 230 ГГц*,
  - ИЦН на частотах *60-80 МГц мощностью несколько МВт*;
  - системы *неиндуктивной генерации тока*;
  - *третиевого комплекса*;
  - технологии *дистанционного управления*;
  - *совместимых с термоядерным реактором диагностик*;
  - технологии поддержания *квазистационарных разрядов в плазме с т/я параметрами*;
- пионерском исследовании работы токамака в режиме горения термоядерной плазмы ( $Q > 1$ ) с интенсивным нагревом альфа-частицами в центре плазменного шнура в дейтерий-третиевых экспериментах, а также эффективности генерации т/я мощности с другими реагирующими ионами на дотритиевой фазе;
- интеграции технологических разработок ИТЭР в российскую программу УТС.

TRT разрабатывается как плазменный прототип как чистого т.я. реактора, так и т.я. источника нейтронов для гибридного (синтез-деление) реактора.

# Необходимые условия создания термоядерного (гибридного) реактора в России

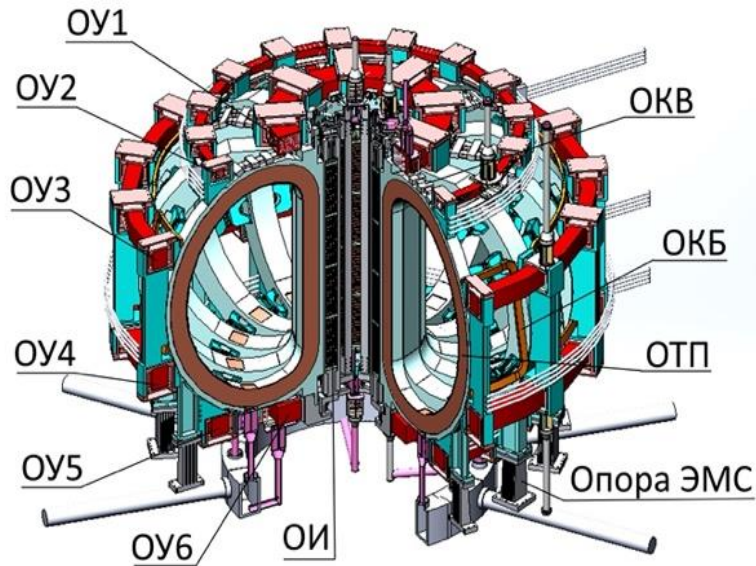
Условие	Статус (наличие)	Цель до 2030	Небходим.действ.сегодня
1. Создание проекта установки: плазм. прототипа т/я и гибридного реактора	Конц. проект TRT Конц. прорект ГДМЛ Конц проект Гибр. реак	Изготовл и. монтаж основных элементов TRT и ГДМЛ	Разработка программ исслед, интегрир. комплекс. аппарат., эскизн. проектир. устан.
2. Создание инфраструк.	Здание 220 ТРИНИТИ	Инфраструкт. стационарн. TRT	<b>Разраб. проектов сист. инфр.</b>
3. Создание сверхпроводящей ЭМС	НТСП проводн. ВТСП лента	Создана ЭМС TRT и ГДМЛ	<b>Создание ВТСП сверхпроводн. для ЭМС TRT</b>
4. Создан. сист доп.нагр. и ген тока	Инжект нейтрал. (ИЯФ) Гиротроны (ИПФ) Работы по ИЦН/геликонам (ФТИ)	Создание систем нагрева и ген тока	<b>Стенд НИ в ТИРИТИ Испыт гиротр в ИПФ Созд. Сист. ИЦН и ген.тока на Т-15МД (ФТИ + КИ)</b>
5. Создание металлич. и жидкомет. перв. стенки	Опыт ИТЭР Опыт Т-11М и Т-10	Создание штатных элем.ПС TRT	Разраб.протот. ПС TRT Тестир элем.Li ПС на Т-15МД
6. Созд. инновацион. дивертора	Опыт ИТЭР	Создание штатных элементов дивертора TRT	Разраб.прот. диверт. TRT Тестир элем.диверт на Т-15МД
7. Создан системы управления	Опыт ИТЭР	Разработка Сист. Управл. TRT	Участие в ИТЭР, Разраб. и тест.сист.упр. Т-15МД
8. Создание диагн.комп.	Опыт ИТЭР	Созд. и тестир основн диагн.	Интеграция диагн. комплекса

# Table 1. TRT main parameters in comparison with other machine and projects

\* expected T-14 parameters after adiabatic compression,

\*\* TRT with D + trace T plasma / D - T plasma.

		C-Mod	T-14	CIT	Ignitor	DTT	SPARC	TRT	ITER
$R_o$	m	0.67	0.42*	2.1	1.32	2.11	1.85	2.15	6.2
a	m	0.22	0.12*	0.65	0.47	0.64	0.57	0.57	2.0
A		3.0	3.3	3.2	2.8	3.3	3.2	3.77	3.1
$B_0$	T	8.0	12.5*	10.0	13.0	6.0	12.2	8	5.3
$I_p$	A	2.0	1.2*	11.0	11.0	5.5	8.7	4 - 5	15.0
$k_{sep}$		1.8	1	2.0	1.83	1.8	1.97	1.8	1.85
$\delta_{sep}$		0.4		0.25	0.4	0.4	0.54	0.3	0.48
$\Delta t_{flattop}$	s	1	0.2	5	4	90	10	100/<10**	1000
$\Phi_{tot}$	Wb	8		75	33	33Vs	42	~33	277
$\langle n_e \rangle$	$10^{20} m^3$	2 - 8	8*	3	4.8	1.8	1.4	up to 2	1
$\tau_\epsilon$	s	~ 0.1	0.06		0.62	0.43	0.77	0.33	
$P_{aux}$	MW	6	3.5	20	24	45	25	up to 40	73
$P_{fus}$	MW	0	3.5*	800	96	~ 0.01	140	~0.5/ 40**	500
$P_{sep}/R$	MW/m	~ 10			16	15	15.7	14 / 16**	15
Q		0	1	infinity	9	0	11	0.01/ >1**	10

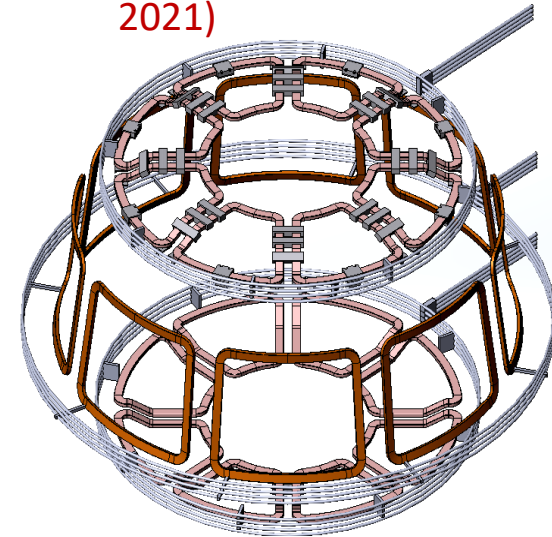


TFC – 16 ВТСП катушек (ОТП)

PFC – 6 ВТСП (НТСП-?) (ОУ),

CS – 4 секции ВТСП (ОИ),

СС - 24 ВТСП (НТСП - ?) (ОКВ)  
корректирующие катушки и  
4 управляющих катушки  
горизонтального поля.



Диапазон изменения магнитного поля – 0-16Тл    Рабочий диапазон температур - 4,2–15К ( $T_{\max}$  – 20К)

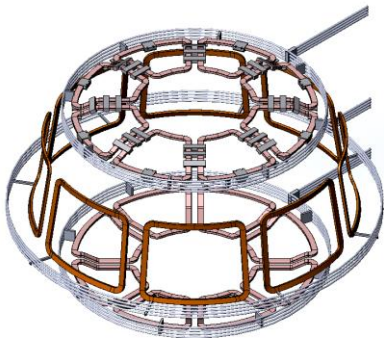
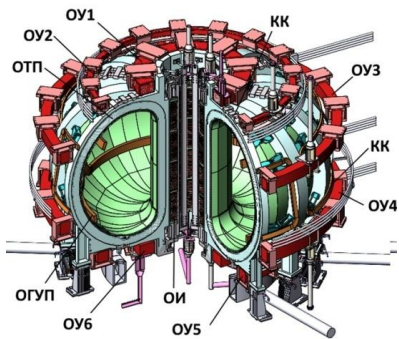
Рабочий ток проводников – 60 кА

Максимальный ток – до 80 – 100 кА при 4.2 К

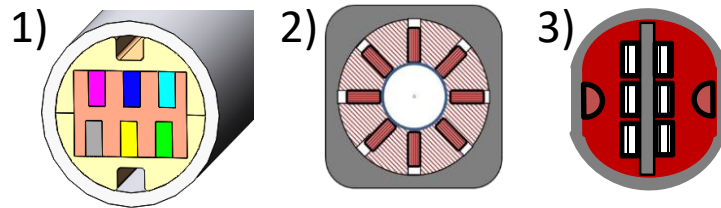
Конструктивная плотность тока (по металлу) провода ОТП не менее 113 А/мм<sup>2</sup>

Конструктивная плотность тока (по металлу) провода ЦС не менее 89 А/мм<sup>2</sup>

# Потребность в ВТСП проводах и лентах в рамках проекта TRT



Рассматриваемые конструкции проводников для TRT  
(В.Е.Сытников и др: «Физика плазмы №12, 2021)



На основании данных для ВТСП лент шириной 4 мм производства компании SuperOx приняты усреднённое расчетное значение критического ток лент для проводов установки ТРТ:

$$I_c(15 \text{ Тл}, 4,2 \text{ К}) = 600 \text{ А} - \text{не менее } 150 \text{ А/мм ширины};$$

$$I_c(15 \text{ Тл}, 20 \text{ К}) = 300 \text{ А} - \text{не менее } 75 \text{ А/мм ширины};$$

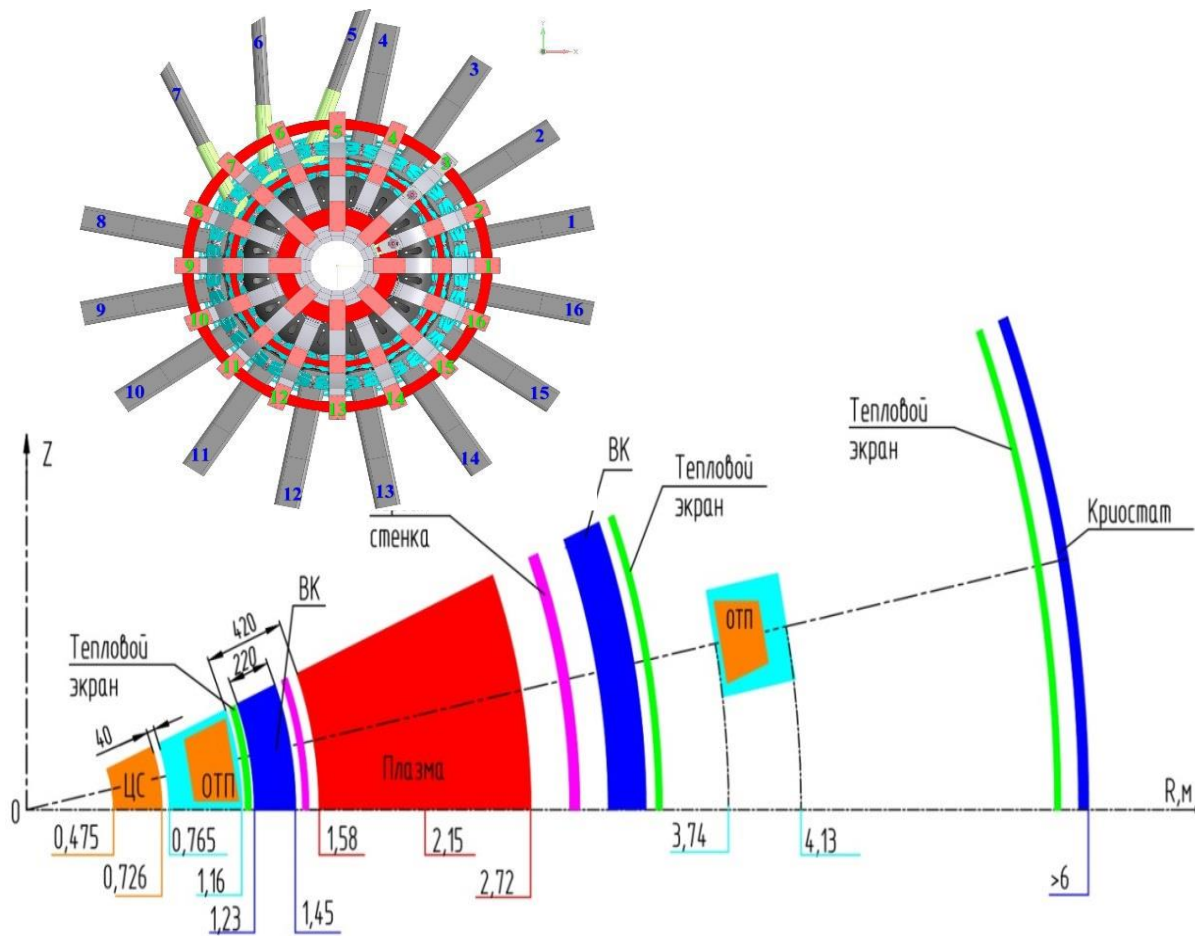
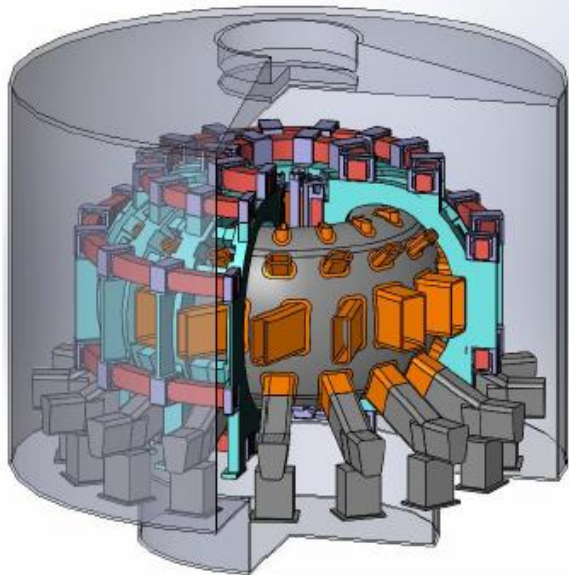
$$I_c(15 \text{ Тл}, 15 \text{ К}) \sim 363 \text{ А} - \text{не менее } 90,8 \text{ А/мм ширины}.$$

**Для создания необходимого количества проводников потребуется 7,0 – 8,0 тыс. км ВТСП ленты шириной 4мм производства компании SuperOx.**

Обмотки	R, мм	Индукция поля, Втмах, Т	Рабочий ток, кА	Провод, мм	Длина провода в катушках, м
ОТП		15	74	D 26	16800
ОИ	600	14	60	26x26	3860
ОУ1	1500	6,5	45	28x28	1320
ОУ 2	3000	2,5	45	28x28	380
ОУ 3	4300	5,0	45	28x28	2160
ОУ 4	4300	5,0	45	28x28	2920
ОУ 5	3000	5.0	45	28x28	940
ОУ 6	1500	6,0	45	28x28	1320
КК			30	25x25	1568
Сумма, Σ					31268

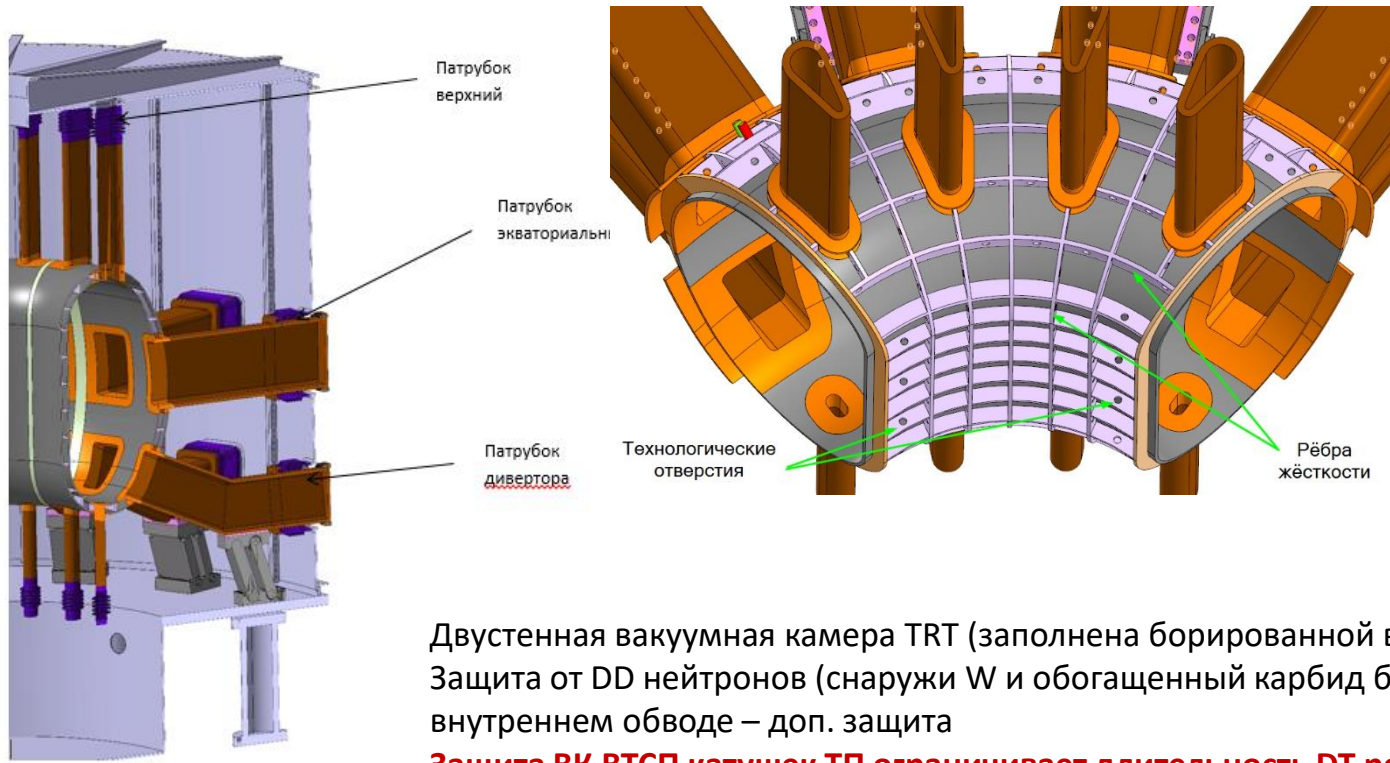
В мире пока не созданы проводники на параметры обмоток ОТП и ОИ  
**В 2022 будут результаты для SPARC (MIT) и ST-40 (Токамак Energy) и первые результаты тестов наших образцов 2) и 3)**

# TRT 2021 – Вакуумная камера и криостат



Д.А.Антропов и др: «Физика плазмы №12, 2021.

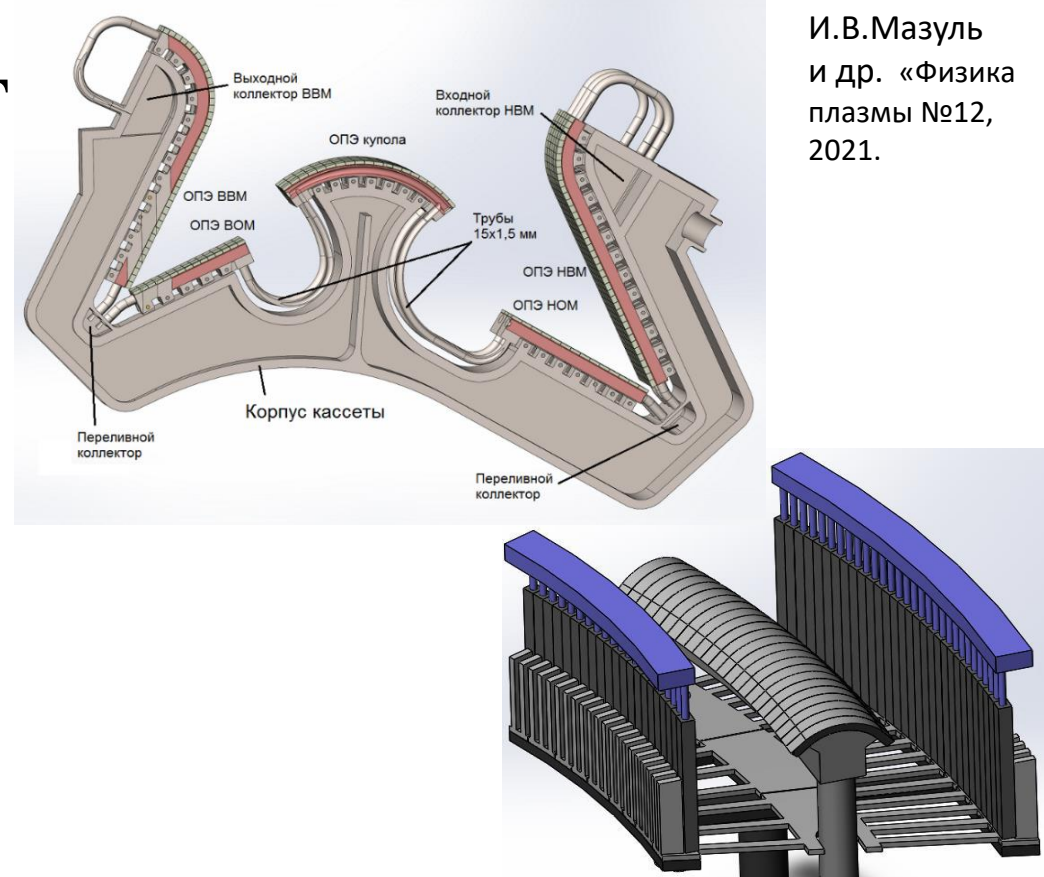
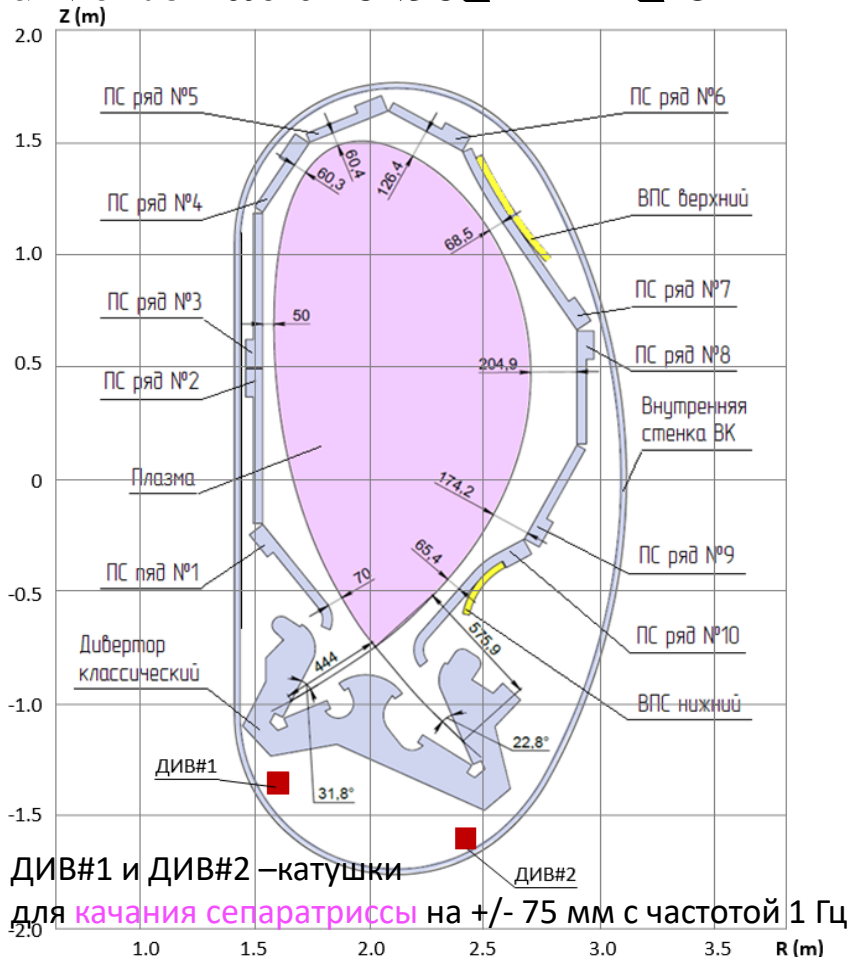
# TRT 2021 – Вакуумная камера



Двустенная вакуумная камера TRT (заполнена борированной водой)  
Защита от DD нейтронов (снаружи W и обогащенный карбид бора). На внутреннем обводе – доп. защита

**Защита ВК ВТСП катушек ТП ограничивает длительность DT режимов (<10с) !**  
(Результаты MCNP расчётов, Д.В.Портнов и др. «Физика плазмы №12, 2021)

# Layout of the first wall and divertor at the beginning of TRT



И.В.Мазуль  
 и др. «Физика  
 плазмы №12,  
 2021.

Figure 5. Models of “traditional” (left) and the optional with stainless steel tubes TRT divertor with sweeping vertical plates (right).



## 1. Необходимое действие сегодня для создания т/я реактора в России

### **Создание проекта установки**

#### **Разработка программ исследований**

(ВТСП ЭМС, Квазистационарный разряд – 100с (ген тока, плазма-стенка, инновац дивертор, оптимизация профиля тока при т/я параметрах), исслед.альтерн.топлива, физика быстрых ионов, эксп. модули blankets и др.)

#### **Интегрирование комплекса аппаратуры**

(системы доп.нагрева и генерации тока, управления, диагностики)

ИТЭР – Центр (в кооперация с основными разработчиками)

в рамках госконтрактов с ГК Росатом

#### **Эскизное проектирование установки TRT**

(ЭМС, Вакуумная камера. Первая стенка, Дивертор, Криостат, Вакуумная система, система ввода топлива )

НИИЭФА в кооперации с ИТЭР – Центром и основными разработчиками систем

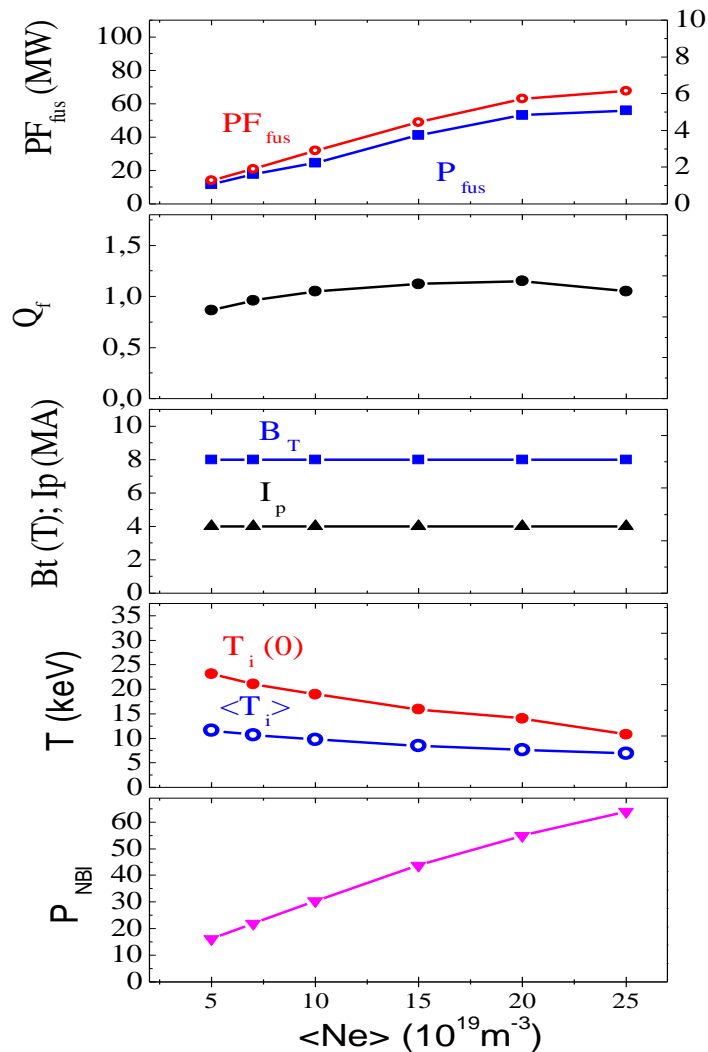
## 2. Необходимое действие сегодня для создания т/я реактора в России

#### **Развитие инфраструктуры TRT (ТРИНИТИ)**

(Стационарное энергопитание, вакуумная система, система ввода топлива, криогенная система, система охлаждения и др.)

ТРИНИТИ в кооперации с ИТЭР–Центром, НИИЭФА и основными разработчиками систем

# Ожидаемые режимы разряда



В DT плазме уверенно получаются МГД устойчивые полностью безындукционные режимы с током плазмы 4 МА при различных значениях плотности плазмы.

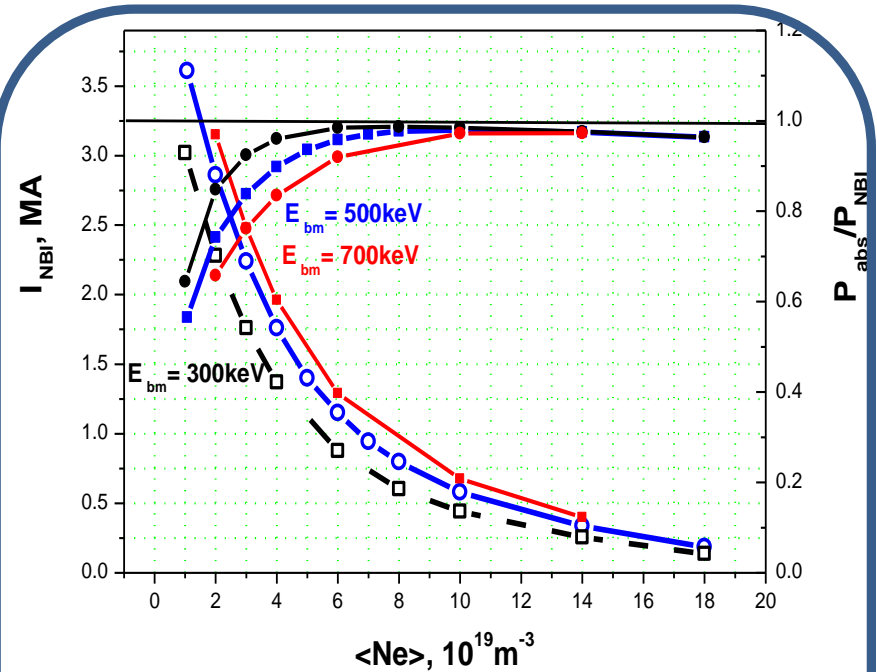
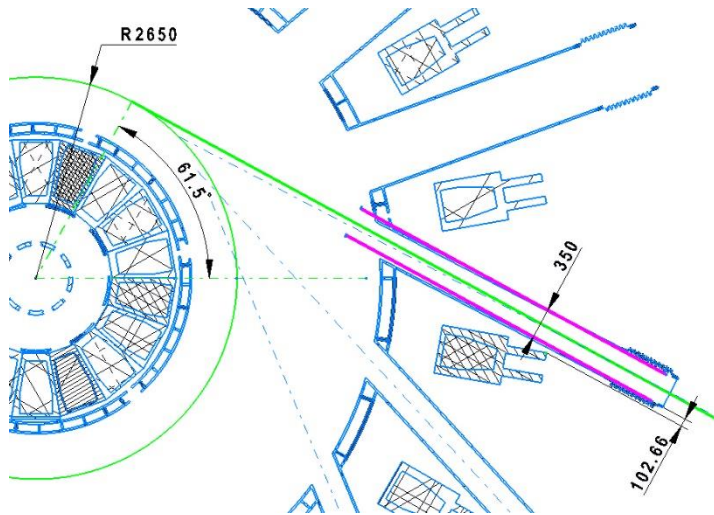
$Q \sim 1$  примерно во всем рассмотренном диапазоне плотности  $0.5 < n_{e20} < 2.5$  и мощности дополнительного нагрева

$15 \text{ МВт} < P_{\text{aux}} < 60 \text{ МВт}$ .

Даже на нижней границе рассмотренного диапазона мощность термоядерных реакций  $>15 \text{ МВт}$ , что обеспечивает  $\sim 0.2 \text{ МВт/м}^2$  нейтронного потока на стенку, т.е. удовлетворяет потребности нейтронного источника в гибридной схеме.

(В.М.Леонов и др: «Физика плазмы №11, 2021)

# NBI CD in TRT



Зависимость эффективности захвата пучков и генерации пучкового тока в ТРТ от плотности плазмы и энергии пучков NBI,  $P_{beam}=20MW$

Патрубки для ввода пучков обеспечивают оптимальный для генерации тока прицельный радиус  $R_{tg}=R_0-a/2$

Эффективная генерация тока возможна при плотности плазмы  $5 - 10 * 10^{19} m^{-3}$ .

(В.М.Леонов и др: «Физика плазмы №11, 2021)

## Режимы работы «традиционного» дивертора TRT

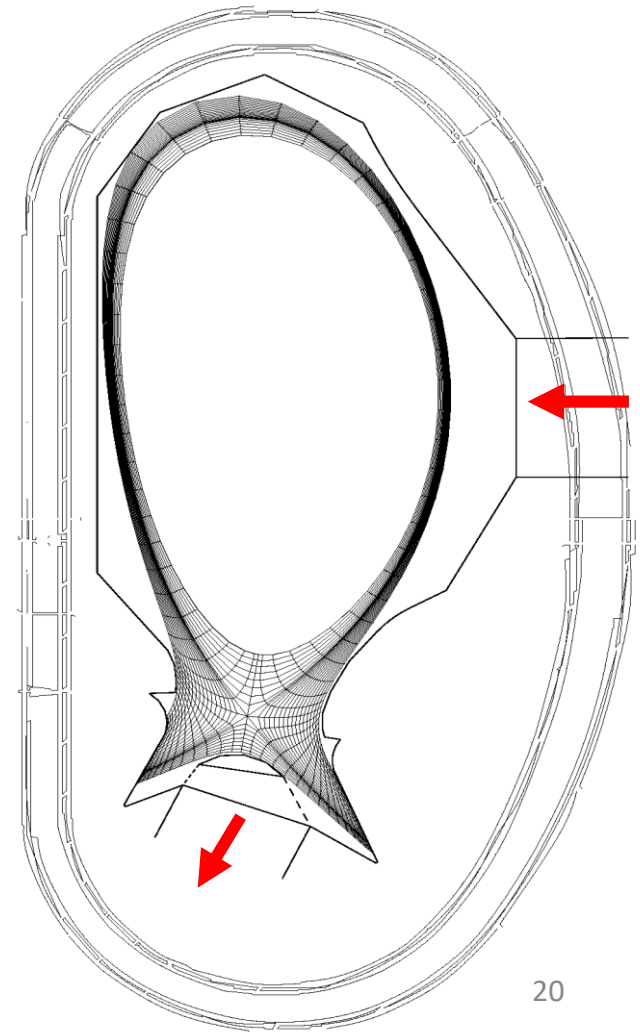
Моделирования SOLPS4.3 показало:

**При полной проектной величине тока в плазме  $\sim 5$  МА и мощности нагрева плазмы 25-40 МВт не следует ожидать широкого «окна» рабочих параметров плазмы, (запредельная тепловая нагрузка на диверторные пластины и не совместимость с необходимым удержанием основной плазмы).**

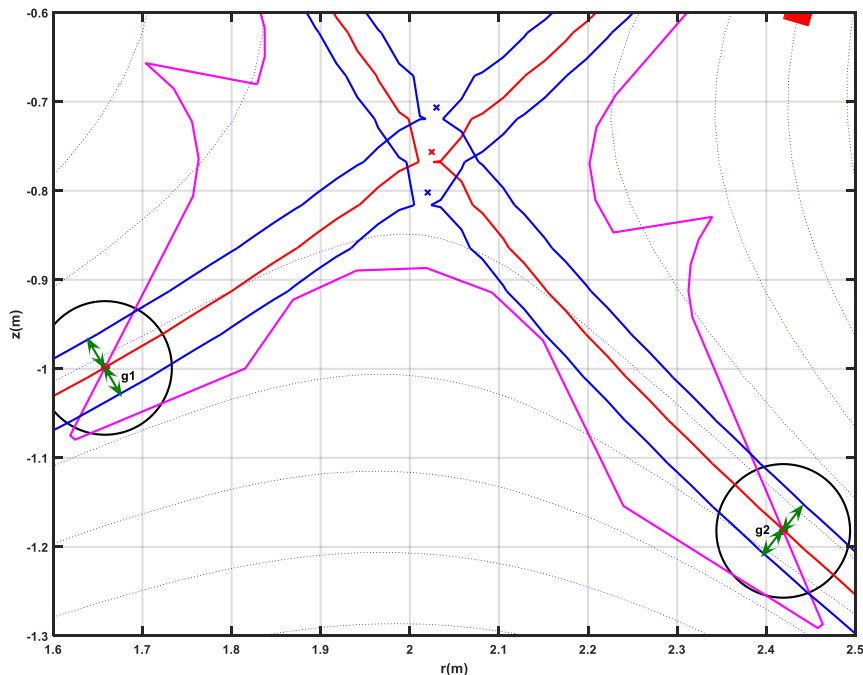
**Рекомендации – понизить ток и/или плотность и/или доп. нагрев плазмы.**

**Снижение параметров до  $n_e \sim 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  и  $I_p = 4$  МА расширяет операционное пространство режимов работы ИТЭРо-подобного дивертора TRT !**

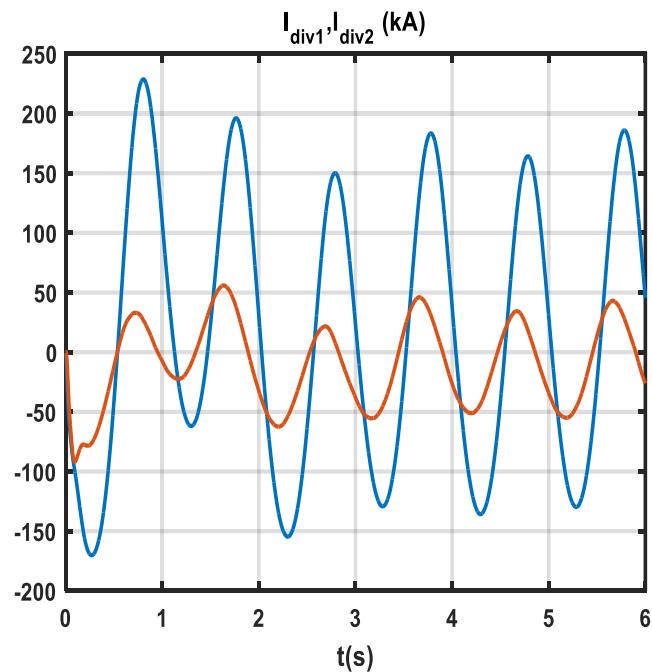
(А.С.Кукушкин и др: «Физика плазмы №12, 2021)



# Качание сепаратрисы (И.В.Мазуль и др.)



Ветви сепаратрисы для базовой конфигурации (красный цвет) и ветви сепаратрисы (синий цвет), смещенные на величины  $d_{sep} \approx \pm 75$  мм с частотой  $f_{sep} = 1$  Гц,  $g1$ ,  $g2$  – управляемые параметры для качания ветвей.

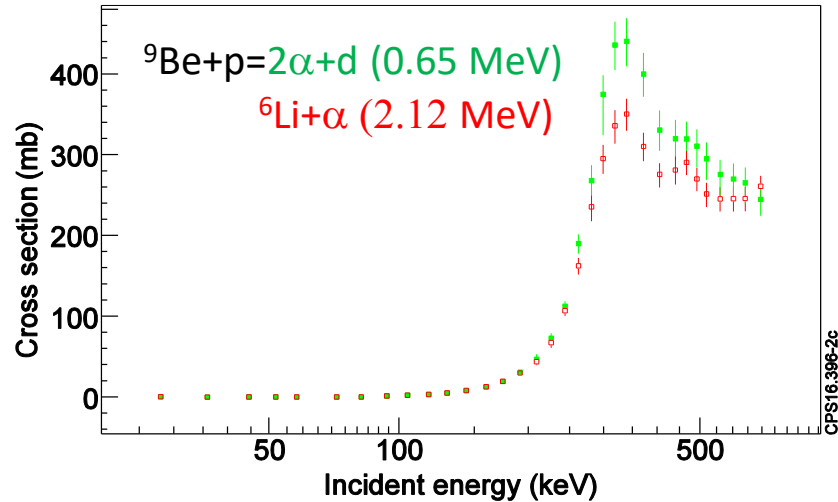
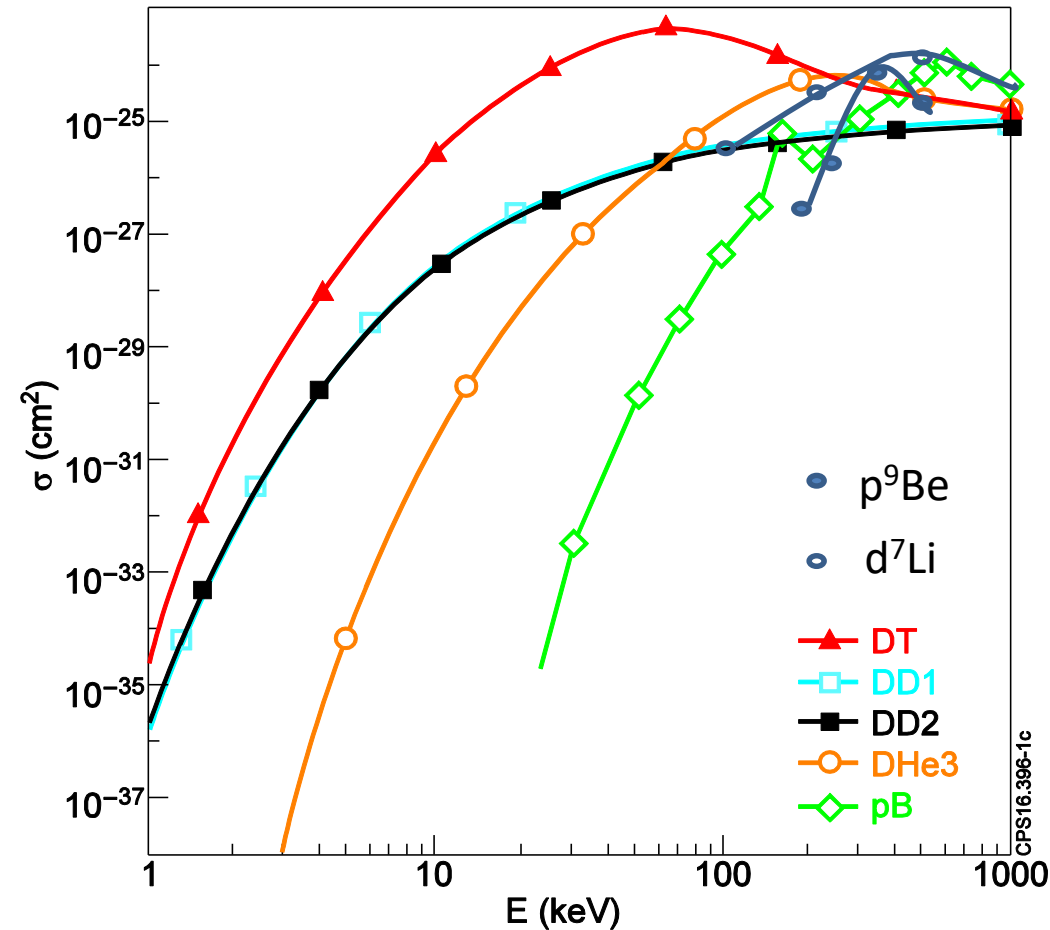


Токи в обмотках Div#1 (синяя линия), Div#2 (красная линия) в процессе качания с частотой  $f_{sep} = 1$  Гц.

# Основные термоядерные реакции в дейтериевой (H) плазме TRT

Реагирующие ионы	продукты	Сечение, b		$\langle \sigma \cdot v \rangle$ , м <sup>3</sup> /сек		Q, MeV
		@ 100кэВ	200кэВ	@ 100кэВ	200кэВ	
D+D	T+p	$2 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^6$	4
	n+ <sup>3</sup> He	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^6$	3.3
D+T (0.1-1%)	n+ <sup>4</sup> He	5	3	$10^8$	$5 \cdot 10^8$	17,6
D+ <sup>3</sup> He (0.1-10%)	p+ <sup>4</sup> He	$2 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^6$	18.7
D+ <sup>6</sup> Li (0.2%)	p+T+ <sup>4</sup> He			$1.5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	2.26
	p+ <sup>7</sup> Li	$9 \cdot 10^{-4}$	$10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^5$	$4.5 \cdot 10^5$	5.0
	n+ <sup>7</sup> Be	$8 \cdot 10^{-4}$	$10^{-2}$	$10^5$	$3 \cdot 10^5$	3.4
	n+ <sup>3</sup> He+ <sup>4</sup> He			$0.6 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^5$	2.5
	<sup>4</sup> He+ <sup>4</sup> He	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$0.5 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^5$	22.4
D+ <sup>7</sup> Li (1.8%)	n+ <sup>4</sup> He+ <sup>4</sup> He		$2 \cdot 10^{-1}$	$9 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^6$	15.1
D+ <sup>9</sup> Be (2%)		$1.5 \cdot 10^{-1}$ (500)				4.5-7.2
D+ <sup>11</sup> B (2%)						
p+ <sup>9</sup> Be (2%)		$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-1}$ (350)			0.6-2.2
p+ <sup>11</sup> B (2%)	3 * <sup>4</sup> He	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-2}$			8.7

# Сечения термоядерных реакций



$$\sigma(d+{}^7\text{Li} @ 200\text{keV}) = 2 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2$$
$$\sigma(d+{}^9\text{Be} @ 500\text{keV}) = 1.5 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2$$

# Размещение ТРТ и нагревных инжекторов в зале ГНЦ РФ ТРИНИТИ

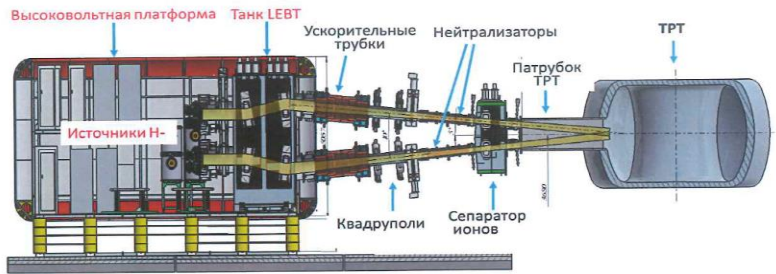
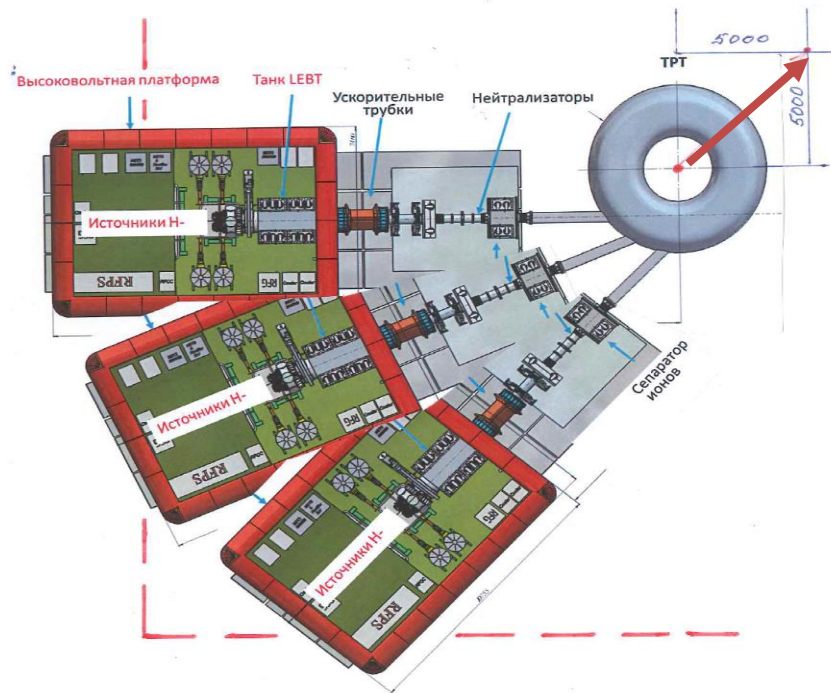


Схема инъекции нейтральных пучков в ТРТ (вид сбоку)



1. Для интеграции с нагревными инжекторами анализируется возможность сдвига токамака ТРТ на  $\sim 7$  м вдоль диагонали зала.
2. Наряду с этим анализируется возможность уменьшения размеров высоковольтной платформы вдоль пучков.



### **3. Необходимое действие** сегодня для создания т/я реактора в России **Создание ВТСП сверхпроводников для ЭМС TRT**

ВТСП лента с требуемыми характеристиками производится российской компанией С-Инновация.

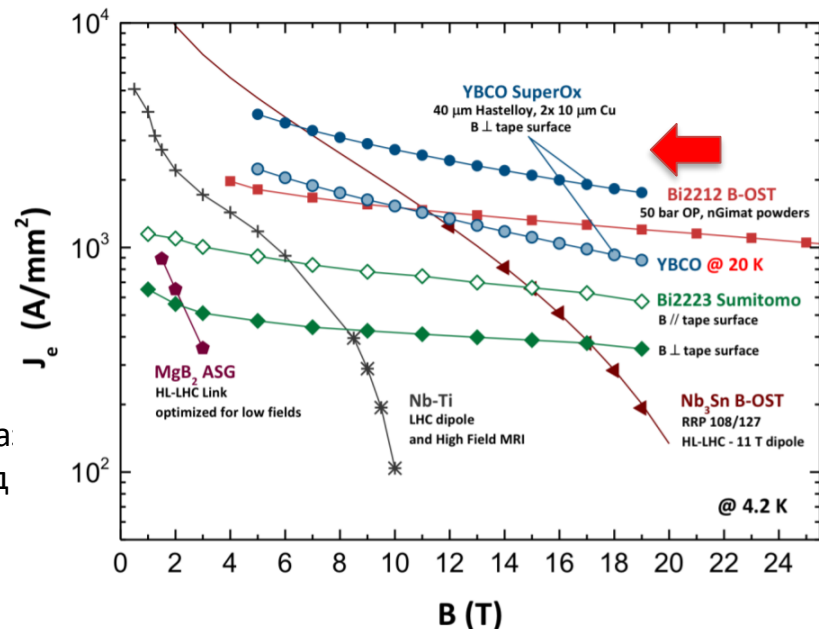
Требуемое количество ВТСП ленты закупается у С-Инновации или изготавливается в кооперации с ней.

**Срочная (2023-24) Организация изготовления ВТСП  
сверхпроводников необходима для реализации проекта TRT !!!**

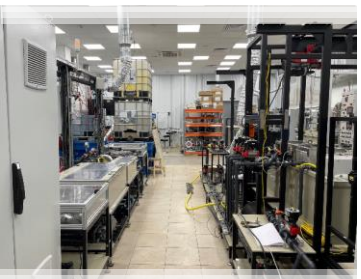
## ВТСП-лента для высоких магнитных полей

- Патент на изобретение RU2761855 от 21.07.2021
- $I_c$  (20K, 20Тл) =  $I_c$  (77K, 0Тл) = 130-200 A/4 мм
- Стандартный продукт –  $J_e$  (20K, 20Тл) > 600 A/мм<sup>2</sup>
- Рекордные результаты –  $J_e$  (20K, 20Тл) > 1500 A/мм<sup>2</sup>
- Толщина подложки 35 мкм
- Продольная резка ВТСП-ленты фемтосекундным лазером
- Указанный минимальный критток - для перпендикулярного поля
- В параллельном поле критток ещё выше, приблизительно в 4-6 ра
- Общая мощность производства – 1000 км 12 мм ВТСП-ленты в год
- Распределение мощностей сегодня: 2/3 = Москва, 1/3 = Токио

- В 2019-2021 гг. мощность производства была увеличена в 5 раз
- Текущий штат ООО «С-Инновации» – 80 человек
- Площадь арендуемых помещений ~ 1200 м<sup>2</sup>

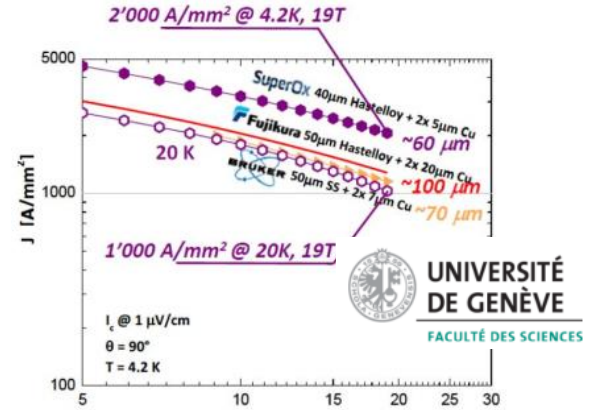
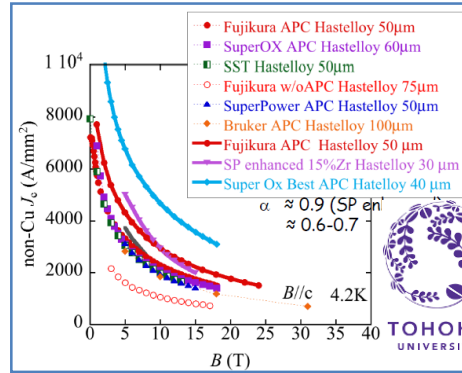
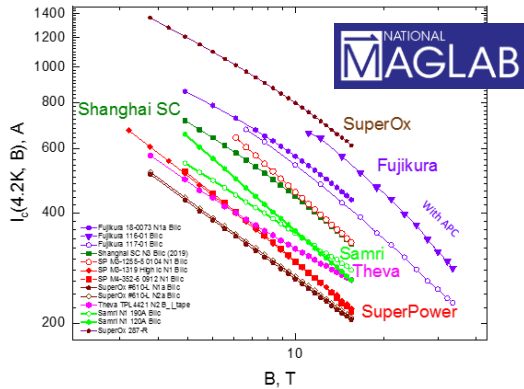


European Strategy for Particle Physics Accelerator R&D Roadmap  
CERN, 2022 <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2201/2201.07895.pdf>

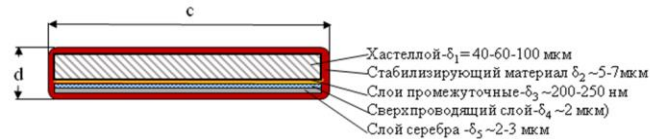
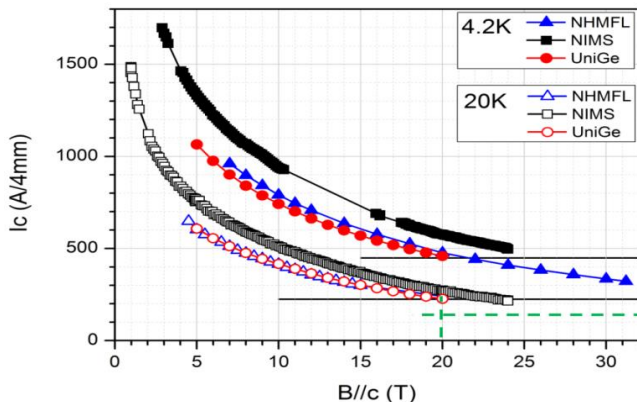


# Лента YBCO компании SuperOx

Результаты независимых сравнительных испытаний лент различных производителей, проведенных в лучших лабораториях мира



**Критический ток ленты SuperOx при 4,2 и 20 K выше чем у ближайших конкурентов на 30%**



Критические характеристики ленты компании SuperOx при 4,2 K и 20 K, в сильных магнитных полях, измеренные в различных лабораториях и принятые за базовые при разработке проводников для катушек TRT.

#### **4. Необходимое действие сегодня для создания т/я реактора в России**

**Создан. сист доп.нагр. и ген тока**

### **Создание Стенда Инжектора нейтралов TRT в ТИРИНТИ (ТРИНИТИ + ИЯФ)**

Ионный источник (9 А, 120 кВ), Ускоритель (9 А, 500 В), Плазменный нейтрализатор (изготовленные по госконтракту в 2023-24) Для проведения испытаний при максимальной мощности и длительности на D<sup>-</sup>

### **Испытание гиротронов в ИПФ (ИПФ)**

**Разработка систем ИЦН и генерации тока TRT геликонами**

**Создание Системы ИЦН и генерации тока геликонами  
на Т-15МД (ФТИ + КИ)**

## \*Следующий шаг\* в инжекторах атомов



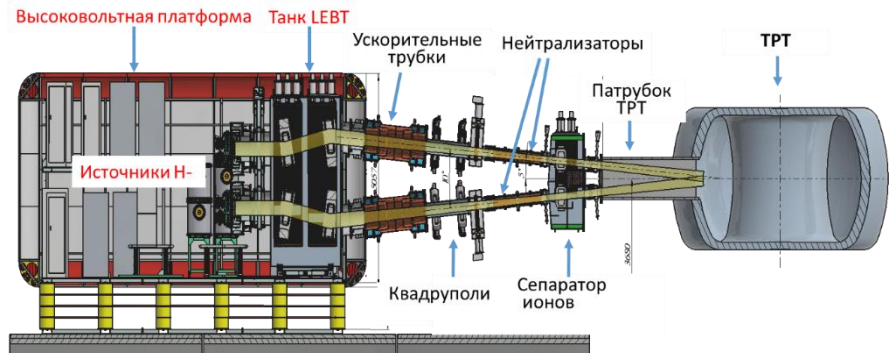
**Инжектор имеет важные инновации:**

- Оси ионного источника и ускорителя пространственно разведены ,
- Плазменный или фотонный нейтрализатор и
- Рекуперация энергии остаточных ионов для обеспечения общей энергетической эффективности системы на уровне 80%.



**Инжектор атомов с параметрами 1000 keV, 5 MW, 1000 s создан в Институте ядерной физики РАН по заказу Tri Alpha Energy, Inc. (США)**

# Системы дополнительного нагрева и генерации тока TRT



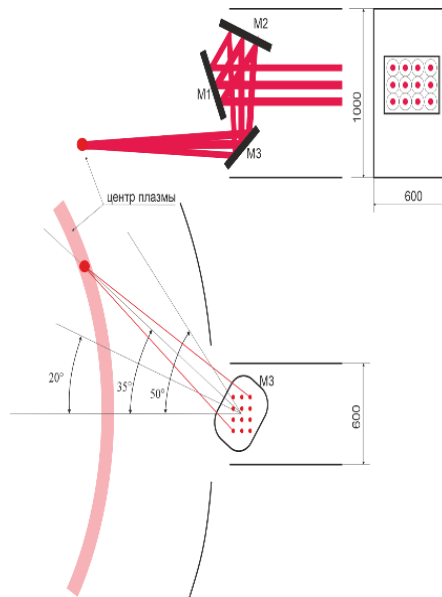
## 500 кэВ D- NBI на TRT (проект ИЯФ СО РАН)

мощность двухпучковой инъекции нейтралов в каждый порт  
 $\sim 7$  МВт (Н) и  $\sim 5.7$  МВт (D).

(Ю.И.Бельченко и др: «Физика плазмы №11, 2021)

Уникальный набор систем доп. нагрева TRT обеспечит самосогласованное управление профилями параметров плазмы, включая  $I_p(r)$

10МВт, >100 с ЭЦР, 230ГГц  
 $\sim 12$  гиротронов – ИФФ РАН



(В.И.Белоусов и др: «Физика плазмы №12, 2021)

# ИЦН и генерация тока геликонами

- \* В частотном диапазоне 60 - 80 МГц будет реализовано несколько схем ICRH ( ${}^3\text{He}^{2+}$ , плазменные  $\text{T}^+$  и пучковые  $\text{T}^+$  на частоте 80 МГц и плазменные  $\text{D}^+$  и  ${}^9\text{Be}^{4+}$ ,  ${}^7\text{Li}^{3+}$ ,  ${}^{11}\text{B}^{5+}$ , и пучковые  $\text{D}^+$  на частоте 60 МГц )
  - с высоким поглощением волн в центральной области плазменного шнура,
  - хорошей связью антенны с плазмой
  - и с применением продемонстрированных как эффективные решений:
    - по управлению потоками примесей
    - и индуцированными периферийными колебаниями (ELM) быстрыми изменениями нагрузки антенны.
- Также рассматривается возможность применения несколько-мегаватной системы генерации неиндуктивного тока с использованием геликонов, излучаемых антенной бегущей волны в диапазоне частот  $\sim 1000\text{-}1200$  МГц..

# Внеосевая генерация тока геликонными волнами с применением Антенны бегущей волны на токамаках D-III-D и KSTAR предложена В.Л.Вдовиным



Travelling wave antenna for DIII-D proposed by Victor Vdovin

\* Следующий шаг\*

Разрабатывается Антенна бегущей волны (TWA) для внеосевой генерации тока Геликонами

Proposal for TWA in T15-MD: inside view

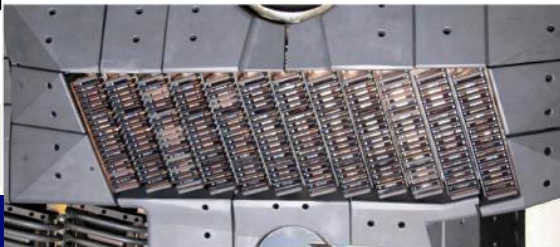
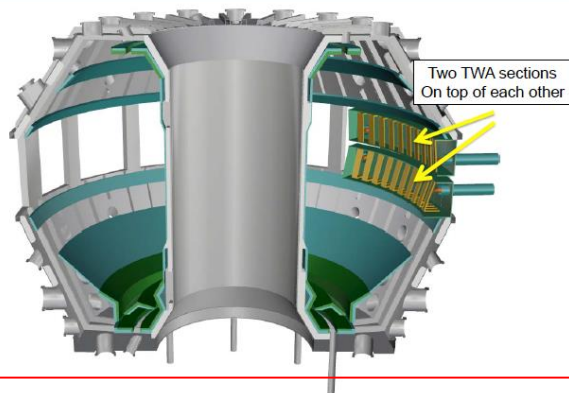


Fig. 1. Photograph of the 12-module low power antenna installed in DIII-D.



Victor Vdovin

J.F. Tooker et al.,  
"Development of a high power Helicon system for DIII-D"  
Fusion Engineering and Design 123 (2017) 228–231

Новый высокоэффективный метод внеосевой генерации тока геликонными волнами создаётся на токамаках: D-III-D (1 MW, 476 MHz в 2019) и KSTAR (~500 МГц ~4 МВт)

Система ионного циклотронного нагрева и генерации тока

Геликонными волнами разрабатывается в

НИЦ «Курчатовский институт совместно с бельгийскими коллегами и в ФТИ РАН



## 5-6. Необходимое действие сегодня для создания т/я реактора в России

### Создание металлической и жидкометаллической первой стенки (5)

### Создание инновационного дивертора (6)

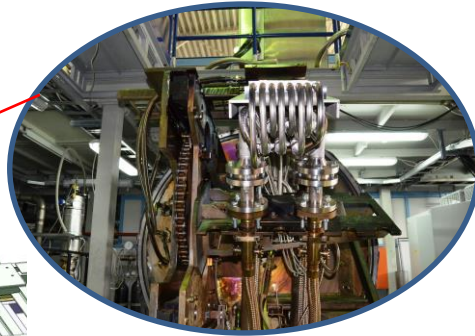
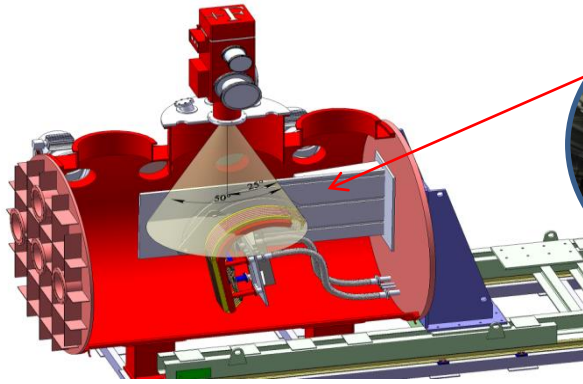
- Разработка прототипов ПС и дивертора TRT (НИИЭФА)



- Тестирование элементов Li ПС и дивертора на Т-15МД (Красная Звезда, ТРИНИТИ, НИЦ КИ)

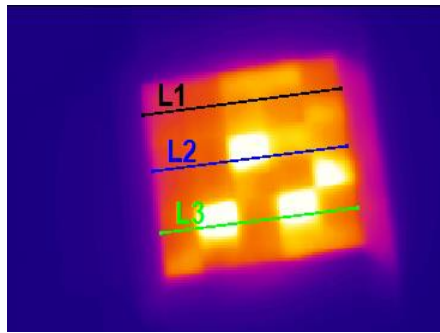
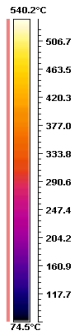
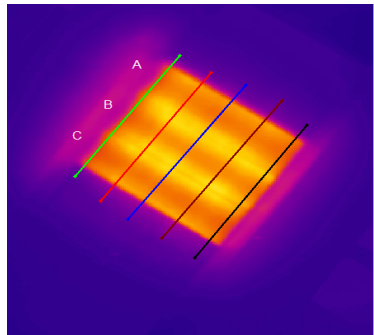


# Plasma-Facing Components Tests



Taken that plasma temperature is to reach 300 millions C° and (up to 20 MW/m<sup>2</sup> heat load) the Plasma-Facing Components should meet the respective high requirements. To conduct the tests in Russia, a special IDTF facility with 800 kW electron injector has been assembled at the Efremov Institute (NIIEFA), St. Petersburg.

Tests are carried out for the components from Russia, EU and Japan



## **7. Необходимое действие** сегодня для создания т/я реактора в России

Создание системы управления

Участие в создании систем управления плазмой в ИТЭР

Разработка концепций систем управления TRT

Разработка и тестирование систем управления Т-15МД

## **8. Необходимое действие** сегодня для создания т/я реактора в России

**Создание диагностического комплекса**

Интеграция диагностического комплекса TRT



# Диагностики ИТЭР, создаваемые в России



## Нейтронные

Диверторный  
Монитор  
Нейтронного  
Потока



Камеры деления  
U-235 и U-238

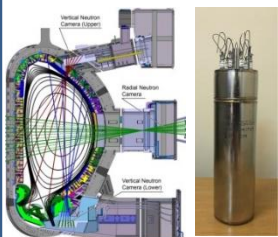
Алмазный  
спектрометр  
нейтронов и  
быстрых атомов



$\epsilon_R < 1\%$



Вертикальная  
нейтронная камера  
для томографии



Детекторный блок  
АД + U-238

Томсоновское рассеяние & ЛИФ

в диверторе



Full scale prototype  
of in-vessel optics

Spectroscopy equipment:

Polichromator 5-200 eV. SIC mirrors  
Polichromator 0.3-200 eV RF mirror cleaning

• Laser systems:

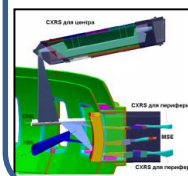
Nd:YAG 1.0645 $\mu\text{m}$  (2 J, 3 ns, 50Hz)  
Nd:YLF laser 1.047  $\mu\text{m}$  (2 J, 10 ns, 5Hz)  
Nd:YAG laser 0.946 $\mu\text{m}$  (0.1J, 10ns, 100Hz)



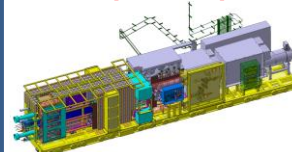
Laser 2J / 100Hz

## Оптические

CXRS



Н-альфа спектроскопия

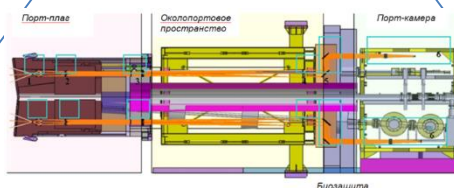


Мо МК первое  
зеркало  
Плазменная  
чистка

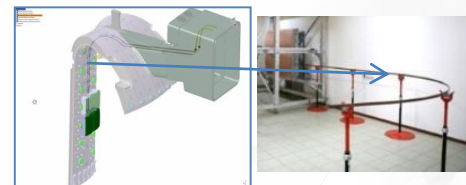
3-D интеграция Н-альфа  
спектроскопии в 11 порт-плаге

Диагностика  
плазмы

Порт-плаги

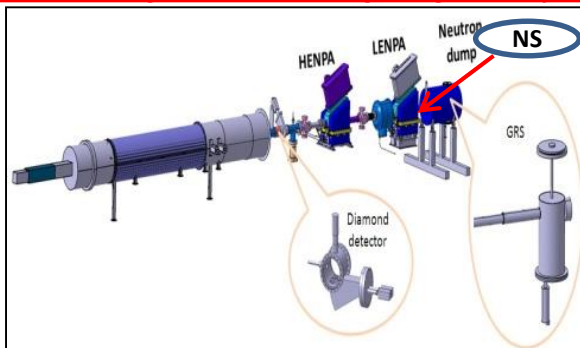


Reflectometry & Refractometry



От 12 до 140 ГГц

Анализаторы атомов перезарядки (NPA)



Два NPAs: HENPA (0.2–2 MeV), LENPA (10–200 keV)  
Алмазные спектрометры быстрых атомов (0.04 – 8 MeV) и нейтронов, сцинтилляционный нейтронный спектрометр (NS), гамма-спектрометр (GS)

Верхние порты: 02, 08, 14  
Нижний порт 08  
Экваториальный порт 11

13 Диагностик ИТЭР создаётся в России !!!



## Единое Информационное Пространство

### УТС исследований России

RPC соединён с: МО ИТЭР, JET (ЕС), EAST (Китай), Стендом «НГ» (Россия), Российскими поставщиками ИТЭР.

В ближайших планах соединение с: KSTAR (Корея), W-7X (Германия) и WEST (Франция) др.

**ИТП «ПТС» объединяет:** «ИТЭР-Центр», НИИЭФА, ТРИНИТИ, ВНИИЭФ, ИПФ РАН, ФТИ РАН, ИЯФ СО РАН, запланировано подключение НИЦ КИ



### Основные задачи

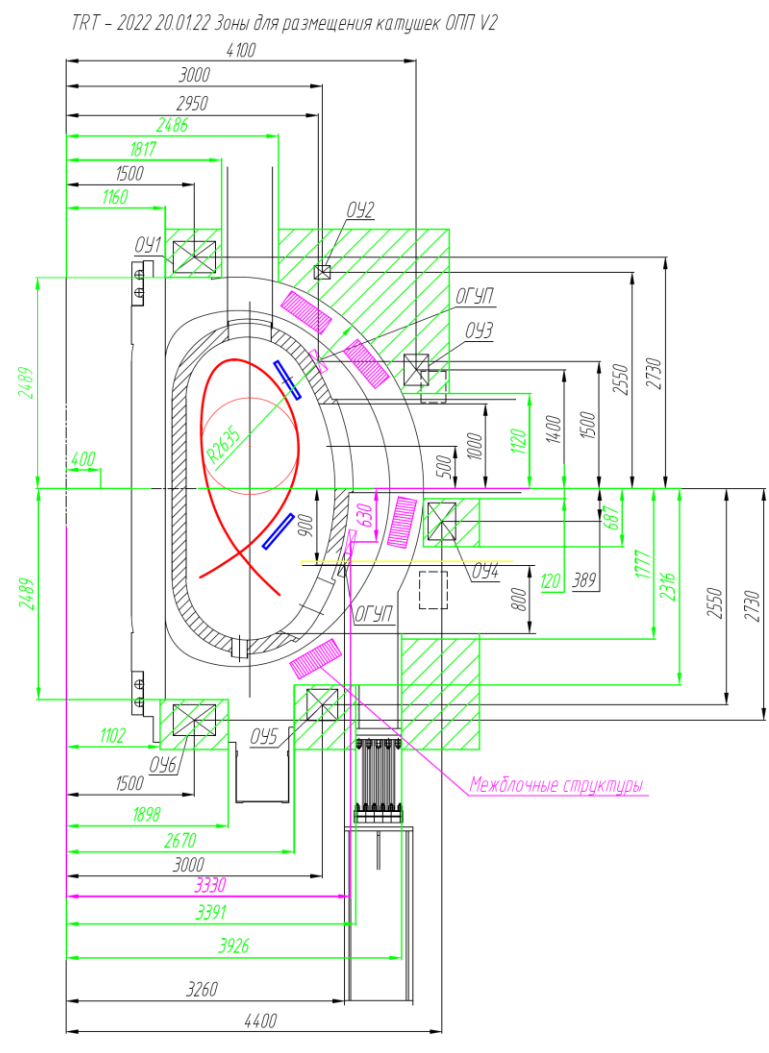
Remote Participation Centre (RPC) и . Единого Информационного Пространства УТС исследований

1. *Удаленное участие в экспериментах.*
2. *Обеспечение удалённого мониторинга работы российских подсистем ИТЭР.*
3. *Исследование способов передачи больших объемов трансконтинентального трафика.*
4. *Отработка систем управления сложным технологическим оборудованием в условиях сильных радиационных и электромагнитных*
5. *Создание российской базы данных разработок и технологий ИТЭР для сооружения термоядерного реактора в РФ.*
6. *Подготовка персонала*



# Разработка Диагностики TRT

- Диагностическая конференция Сочи -2021.
- Выпуск Физики плазмы по диагностике TRT в 2022 (№8 & 12).
- По результатам совещаний по диагностике TRT меняется конструкция вакуумной камеры и ЭМС:
  - экваториальные патрубки смещаются вверх к центру плазмы,
  - обсуждается возможность «выпрямления» диверторных патрубков,
  - анализируется уменьшение диаметра криостата
  - анализируется возможность добавления наклонных патрубков
- Диагностическая конференция Сочи -2023.
- Начата подготовка выпуска Физики плазмы по диагностике TRT в 2023 (№ 12).

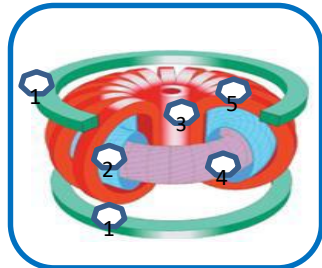


# Реализация Проекта TRT обусловлена выполнением Необходим.действ.сегодня

Условие	Статус (наличие)	Цель до 2030	Небходим.действ.сегодня
1. Создание проекта установки: плазм. прототипа т/я и гибридного реактора	Конц. проект TRT Конц. прорект ГДМЛ Конц проект Гибр. реак	Изготовл и. монтаж основных элементов TRT и ГДМЛ	Разработка программ исслед, интегрир. комплекс. аппарат., эскизн. проектир. устан.
2. Создание инфраструк.	Здание 220 ТРИНИТИ	Инфраструкт. стационарн. TRT	<b>Разраб. проектов сист. инфр.</b>
3. Создание сверхпроводящей ЭМС	НТСП проводн. ВТСП лента	Создана ЭМС TRT и ГДМЛ	<b>Создание ВТСП сверхпроводн. для ЭМС TRT</b>
4. Создан. сист доп.нагр. и ген тока	Инжект нейтрал. (ИЯФ) Гиротроны (ИПФ) Работы по ИЦН/геликонам (ФТИ)	Создание систем нагрева и ген тока	<b>Стенд НИ в ТИРИТИ Испыт гиротр в ИПФ Созд. Сист. ИЦН и ген.тока на Т-15МД (ФТИ + КИ)</b>
5. Создание металлич. и жидкомет. перв. стенки	Опыт ИТЭР Опыт Т-11М и Т-10	Создание штатных элем.ПС TRT	Разраб.протот. ПС TRT Тестир элем.Li ПС на Т-15МД
6. Созд. инновацион. дивертора	Опыт ИТЭР	Создание штатных элементов дивертора TRT	Разраб.прот. диверт. TRT Тестир элем.диверт на Т-15МД
7. Создан системы управления	Опыт ИТЭР	Разработка Сист. Управл. TRT	Участие в ИТЭР, Разраб. и тест.сист.упр. Т-15МД
8. Создание диагн.комп.	Опыт ИТЭР	Созд. и тестир основн диагн.	Интеграция диагн. комплекса



ROSATOM  
ИТЭР-Центр  
НИИЭФА  
НИКИЭТ  
ТРИНИТИ

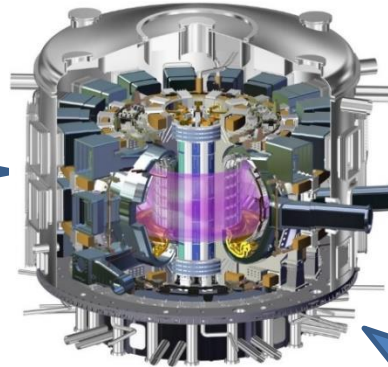


«Большая модель» МТР  
(А.Д.Сахаров, И.Е.Тамм 1950)

TFTR 1995  
11 MBm

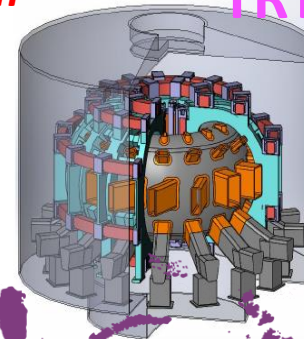


JET 1997  
16 MBm

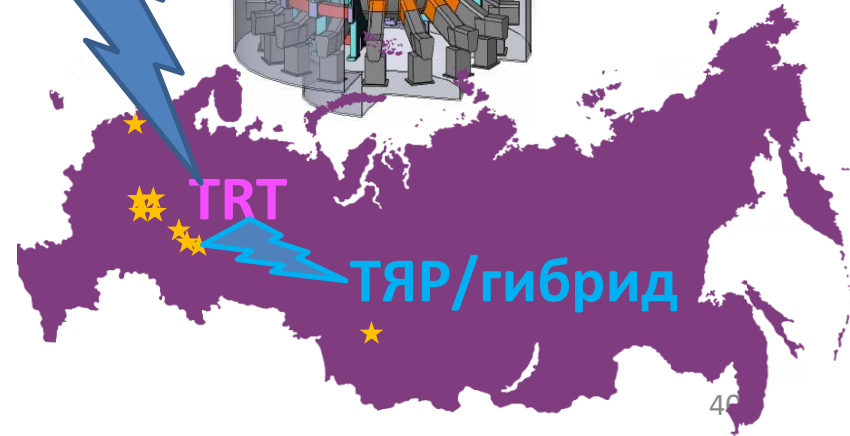


ИТЭР 2035  
500 MBm

TRT ~2035  
Прототип 40 MBm



От великой идеи  
к энергетике будущего





Дополнительные слайды

# Заключение – основные цели

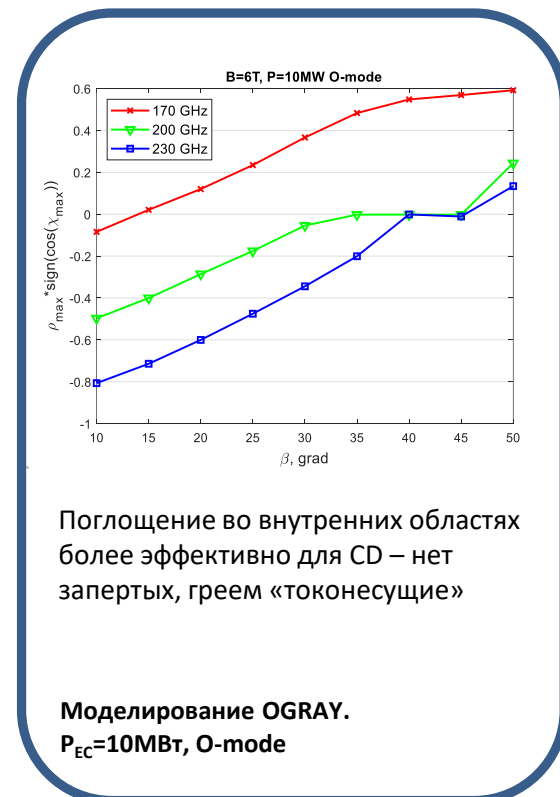
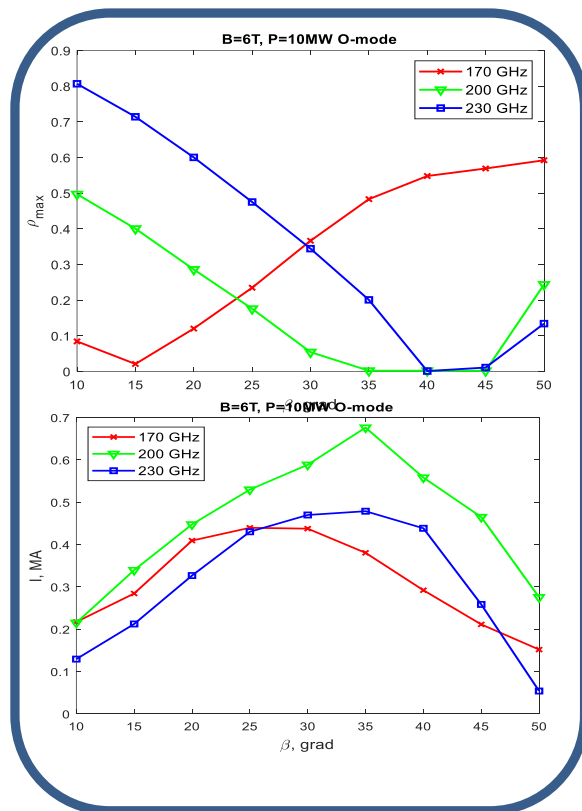
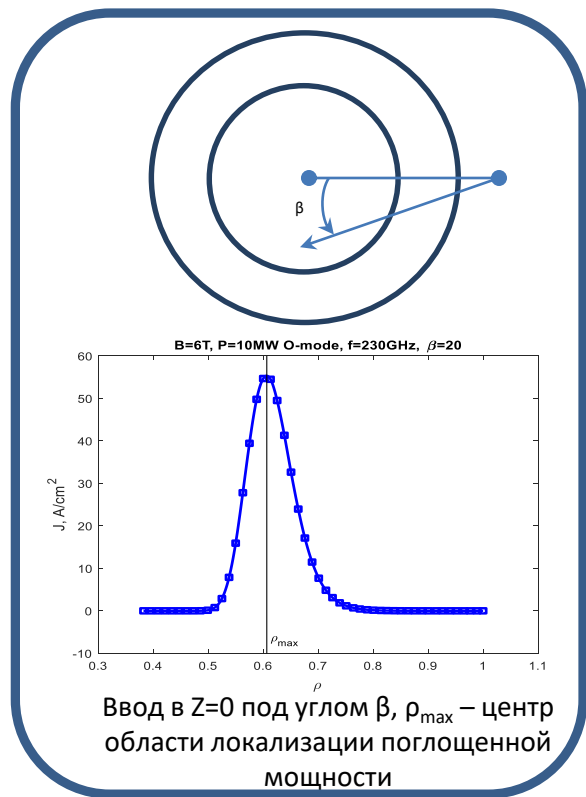
## \* TRT обеспечивает достижение всех трёх основных целей :

- Адаптация в российскую программу УТС технологий и разработок ИТЭР
  - Дополнительная к ИТЭР технологическая платформа
  - Реализация  $Q > 1$  в ДТ разрядах и исследование эффективности т/я реакций при различных топливных смесях на дотритиевой фазе
- 
- **Программа исследований TRT обеспечивает разработку технологий т/я и гибридного реакторов :**
    - Генерация квазистационарного тока (НИ, ЭЦ, Геликоны, бутстреп)
    - Разработка квазистационарных реакторных режимов взаимодействия плазма – стенка
    - Разработка инновационного прототипов квазистационарного дивертора
    - Исследования прототипов экспериментальных модулей blankets
    - Разработка технологий тритиевого топливного цикла
    - Исследование эффективности т/я реакций при различных топливных смесях
    - Разработка дистанционного управления т/я реактором и роботизация

# Заключение - режимы

- $B_t = 8T$  – обеспечивает необходимый запас по  $q$  и  $\beta$  – МГД устойчивые и, следовательно, потенциально управляемые стационарные режимы (ток и профили)
- ЭМС позволяет работу  $\sim 100$ с с  $I_p = 5$ МА. **Режимы при 4МА – обеспечивают запас по нейтронному выходу и длительности разряда** – прямой прототип ТИН для гибрида
- Плотность  $2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  – реальна, но видимых преимуществ для  $P_{fus}$  не создает, проблема -дивертор. **Работа при  $1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  – режимы с безындукционной генерацией тока – полноценный источник нейтронов для гибрида!!!**
- **Системы донагрева должны обеспечить нагрев и генерацию тока в реакторных условиях**, а также возможность управления профилями (совместно с системами подпитки топливом - бутстреп)
- МГД пределы по характеристикам пьедестала (ELM) – есть широкое операционное окно для гибрида  
(С.Ю.Медведев и др: «Физика плазмы №11, 2021)
- Альфвеновские неустойчивости – серьезная угроза раскачки на пучке. Не так страшны неустойчивости как ассоциированные с их раскачкой потери быстрых ионов – нужен доп. анализ  
(М.Ю.Исаев и др: «Физика плазмы №11, 2021)
- Короткие ( $< 5$ с) DT режимы – вполне реальны. Отработка базовых тритиевых технологий, технологий различных топливных циклов – вписывается в круг задач TRT.
- TRT создаст возможность исследований плазмы с интенсивным протеканием D-D, D-T, D- $^3\text{He}$ , D- $^7\text{Li}$ , D- $^{11}\text{B}$ , p- $^9\text{Be}$ , p- $^{11}\text{B}$  и других термоядерных реакций.

# ЭЦР Нагрев и Генерация Тока



Выбор частот в диапазоне  $170 < f < 230$  ГГц и углов ввода позволяет осуществлять генерацию тока как на оси, так и на периферии.