

ИТЭР

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

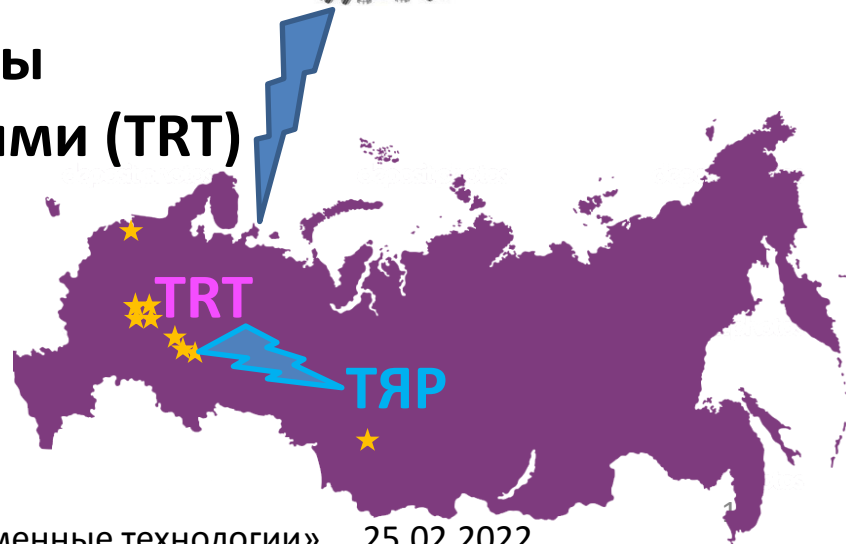
Основные целевые параметры

Токамака с Реакторными Технологиями (TRT)

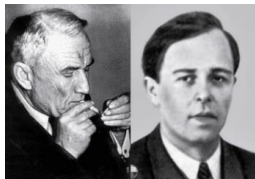
д.ф.- м.н. Анатолий В. Красильников

Учреждение ГК Росатом "Проектный Центр ИТЭР"

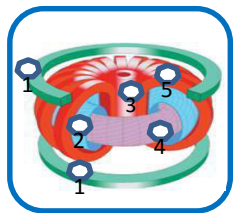
a.krasilnikov@iterf.ru



МТР (1950)



И.Е.Тамм А.Д.Сахаров



«Большая модель» МТР (А.Д.Сахаров, И.Е.Тамм 1950)
 ($R/a = 12/2$ м, $B_T = 5$ Тл, $I_p = 0,2$ МА, $n_e = 3 \cdot 10^{20}$ м⁻³, $T_0 = 100$ кэВ)

1971 - 1990

1972 году Л.А.Арцимовичем и В.Д.Шаfranовым предложена концепция вытянутого сечения с полоидальным дивертором.

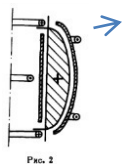


Рис. 2

T-8 1973
T-9 1973

Вытянутое поперечное сечение

T-12
T-13
ТВД

Полоидальный дивертор



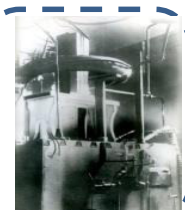
Л.А.Арцимович В.Д.Шаfranов

Термояд в России. История

ОТР (РФ, 1988)

ТОКАМАК (ТОроидальная КАмера МАгнитная Катушка)
И.Н.Головин 1957 г.

1955 - 1965



ТМИ - 1955

T-1 1957
T-2 1959
T-3 1960
T-5 1961, ФТ-1 1965
ТМ-1
ТМ-2 1962
ТМ-3 1965

T-3A 1967



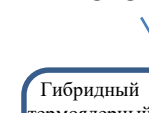
T-6 1970
T-4 1971
ТО-1 1972
ТО-2 1976
ТУМАН-2 1971
ТУМАН-2А 1976
ТУМАН-3 1976
ФТ-2

1967 - 2021

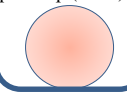
T-10, 1975



T-11 1975



Гибридный термоядерный реактор (1978)



T-7 (NbTi) 1979



ТМГ 1982



T-11M 1983

T-15 (Nb₃Sn) 1988

Глобус-М 1999
Глобус-М2 2020
КТМ

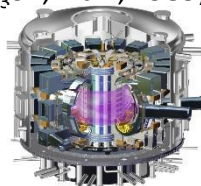
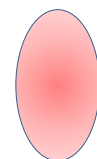


T-15МД 2021

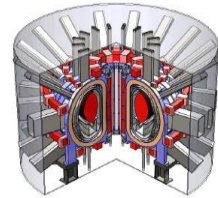


INTOR (1980)

ITER (Nb₃Sn, NbTi, 1985)



TRT (REBCO) 2020

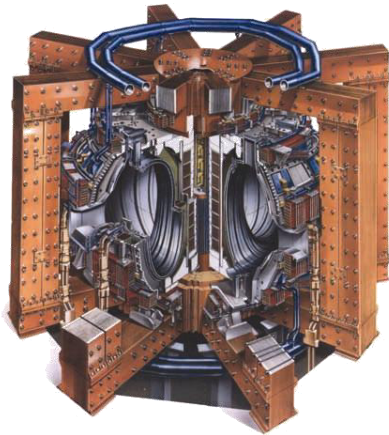


JET

World's largest facility

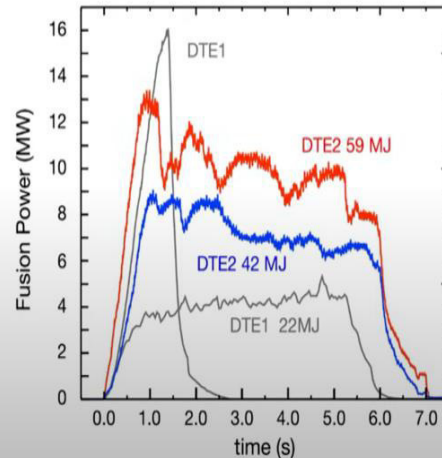
Fusion power record

16MW



5. JET achieved record fusion energy

High fusion power produced and sustained for 5 seconds



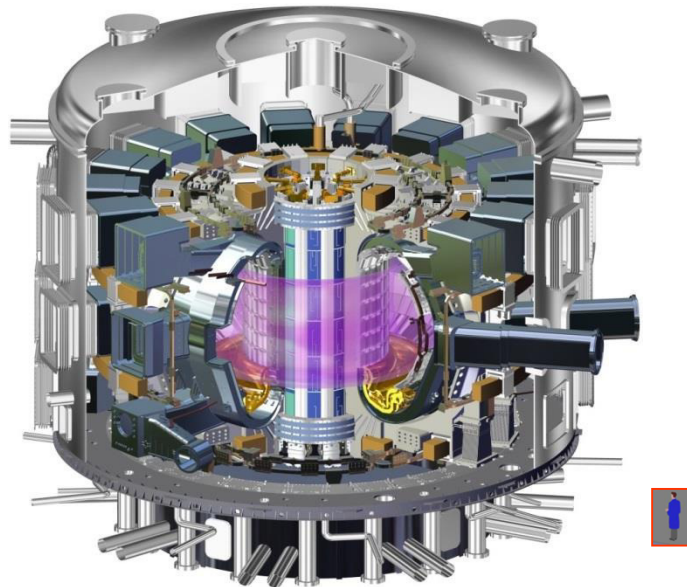
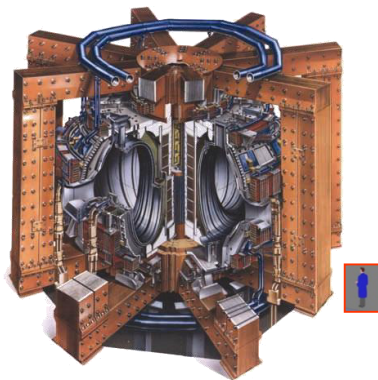
- ▶ **First-ever high confinement plasmas using D-T with beryllium / tungsten wall**
- ▶ **Confirming predictions of plasma behaviour advances development of ITER high performance scenarios**

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





ITER fusion technology platform

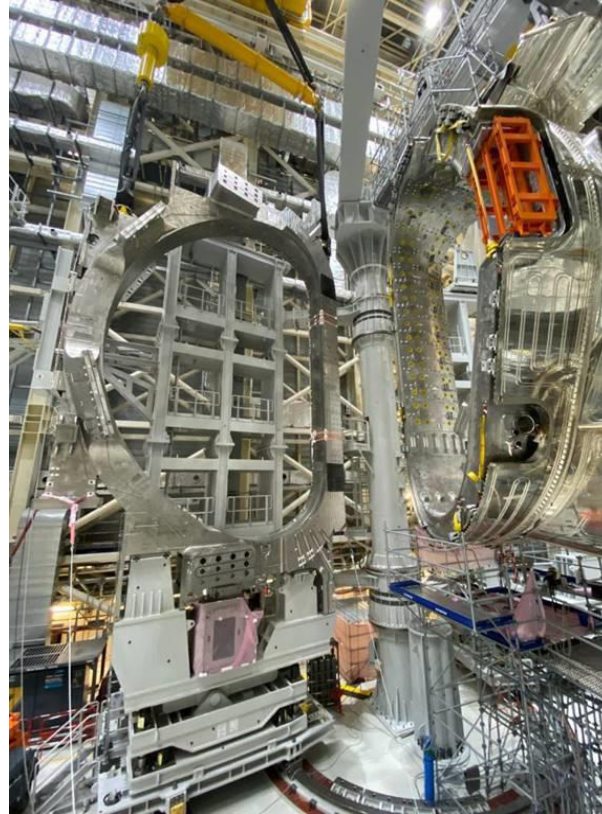
General Site Overview



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





PF1 Magnet Coil with clamps installed



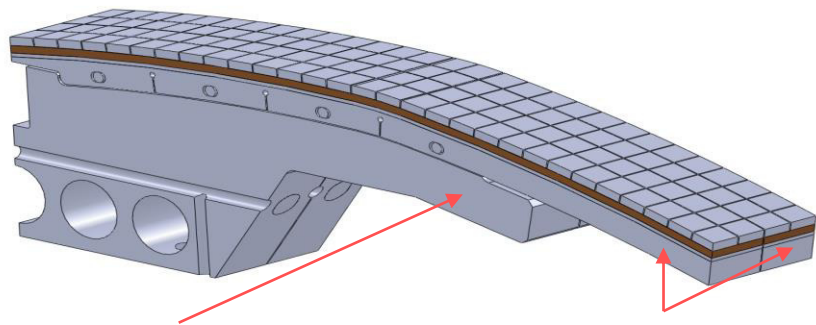
Applying glass tape

- Clamps and closing plates have been installed;
- Cryogenic strapping and diagnostic systems have been installed;
- The results obtained correspond to the schedule, goals and objectives of the ITER Project;
- Delivery scheduled for early 2022.

Blanket First Wall panels

By March, 2019:

1. Beryllium armor tiles have been successfully brazed to the semiprototype fingers of the Enhanced Heat Flux First Wall panels
2. The FW fingers with the brazed Be armour is under High Heat Flux Testing at TSEFEY facility
3. Large scale mock-ups of FW panel beam have been manufactured successfully by use of special equipment for deep drilling



Finger's supporting arms

Two fingers

First wall panel:

Thermal load (nomin./max.) : 2/5 MW/m²;

Number of thermal cycles : 30 000;

Panel dimensions : 2 x 1-1,5 x 0.35 m³;

Weight : 1000 kg;

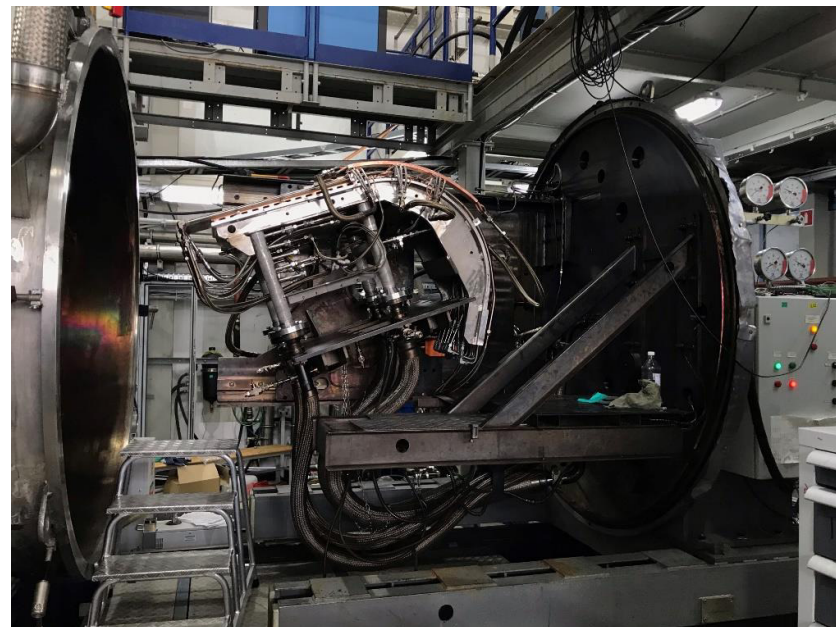
Composition : SS-CuCrZr-Be (8 mm).



Производственно-технологические комплексы по изготовлению элементов первой стенки и дивертора созданы в России !



**Delivery of the European Full-Scale prototype
manufactured by ANSALDO NUCLEARE
to IO for assembly trials onto the
Divertor Cassette Assembly Full Scale prototype**



**Successful High Heat Flux testing
up to 20 MW/m² at Efremov Institute (RF)
of the Test Assembly manufactured by
RESEARCH INSTRUMENTS GmbH.**

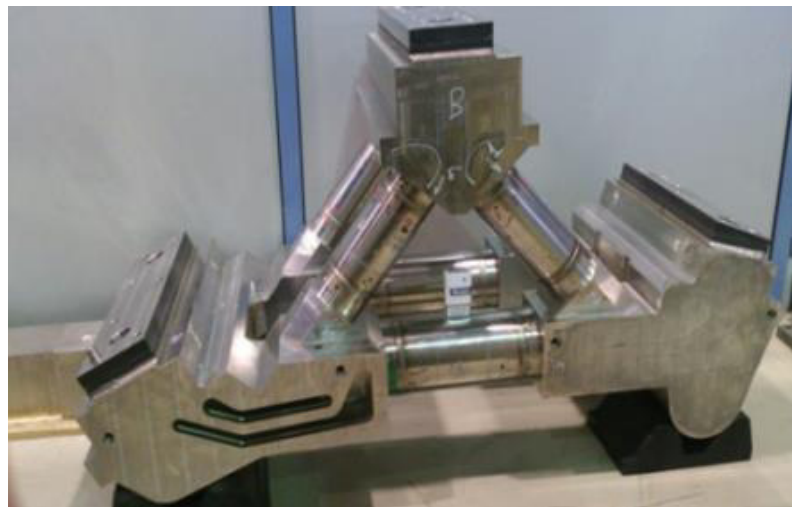
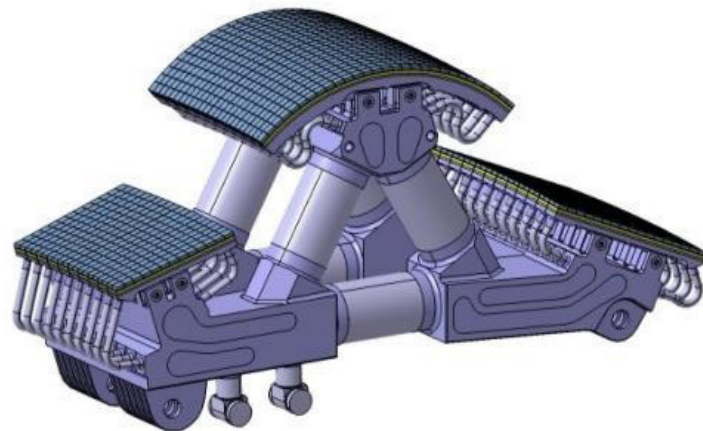


Progress on Divertor

58 (incl. 4 spares) Dome assemblies shall be manufactured and procured

Currently:

- The new Dome design reliable at full-tungsten divertor conditions is developed;
- Several modifications of the design were done following the results of thermo-mechanical analysis of the previous version. Final structural verification of new design demonstrated its reliability for full-tungsten divertor criteria;
- CATIA model of improved Dome design has been developed and approved by IO;
- Manufacturing drawing of new Dome design have been developed and approved by IO;
- Manufacturing of full-scale prototype of Dome new design is in progress.



Steel support structure mockup

Первая стенка и дивертор термоядерного реактора



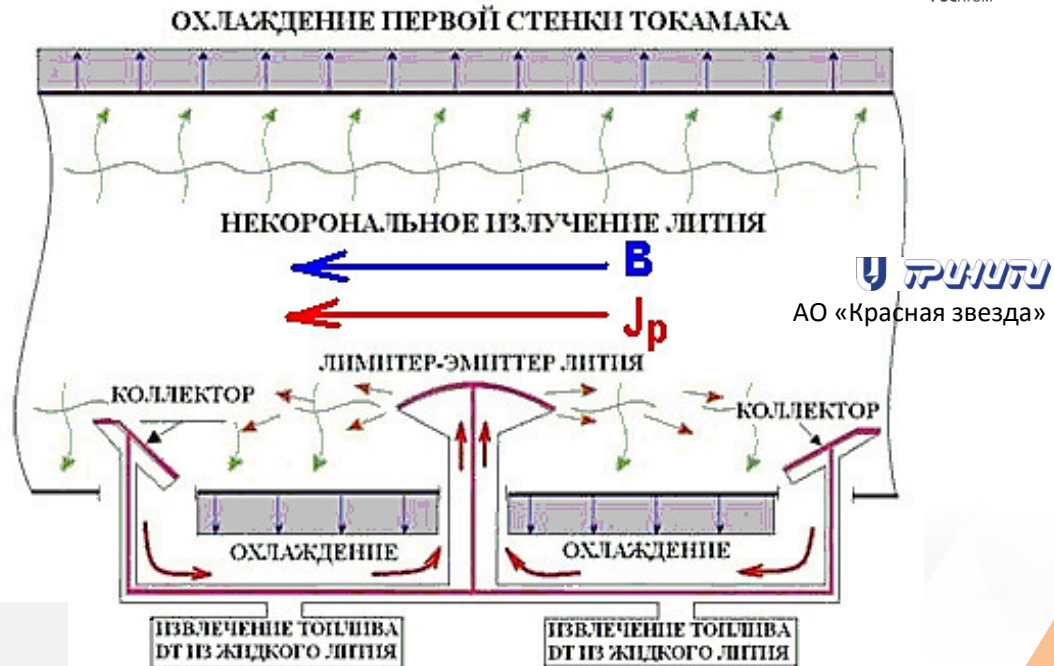
Следующий шаг

**Жидкометаллическая
Литиевая первая стенка**

**TFTR, T-11M, FTU,
EAST, T-10 and others**



**T-15MD с
жидкометаллическими Li
первой стенкой
и дивертором**

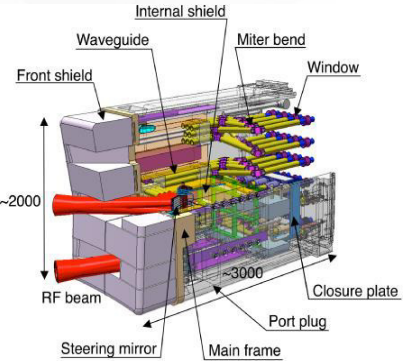


**Разработка жидкометаллической
литиевой первой стенки ведётся в
России
(АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, АО «Красная звезда»)**

Системы нагрева (heating) и увлечения тока (current drive).



ECRH



Electron Cyclotron (EC)

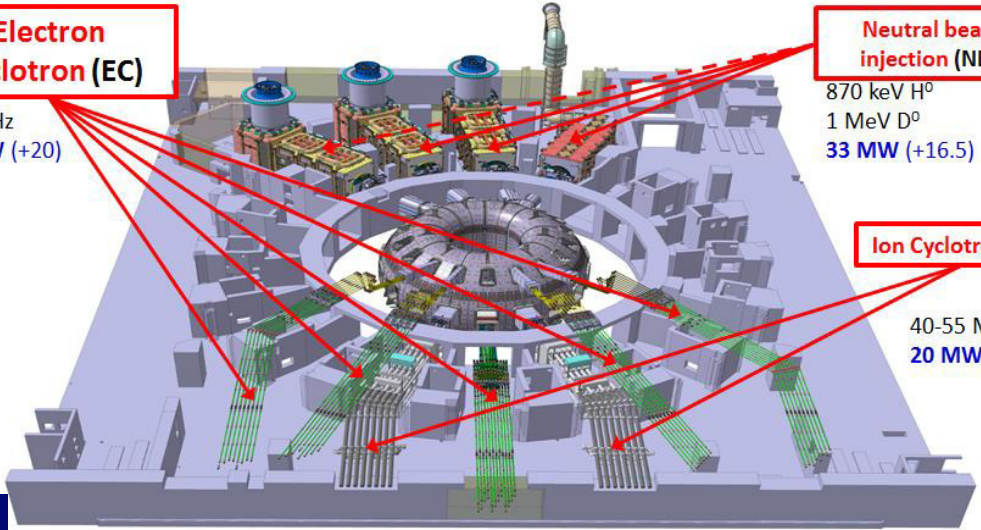
170 GHz
20 MW (+20)

Neutral beam injection (NBI)

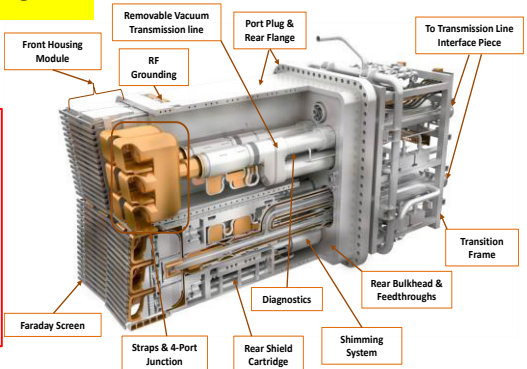
870 keV H⁰
1 MeV D⁰
33 MW (+16.5)

Ion Cyclotron (IC)

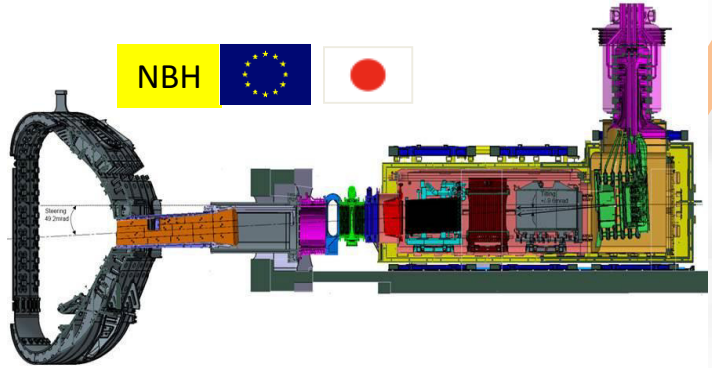
40-55 MHz
20 MW (+20)



ICRH



NBH



Гиротроны изобретены и успешно изготавливаются в России

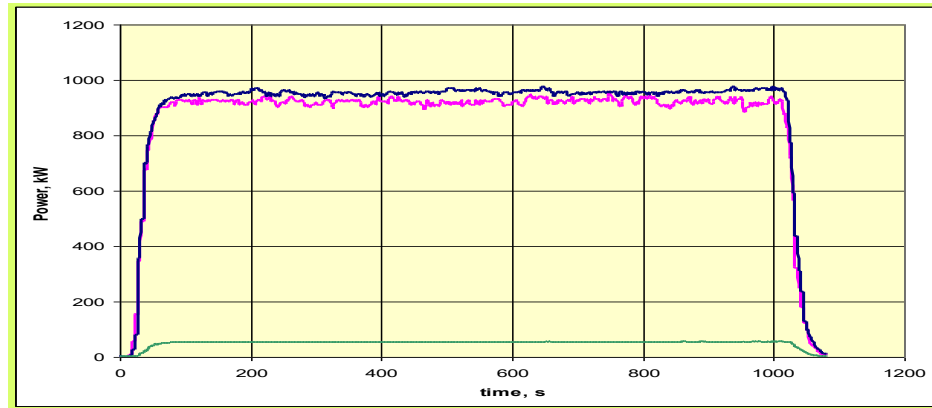
(АО «ГИКОМ», ИПФ РАН)



EC Gyrotrons

By March, 2019:

1. Three Gyrotron sets have been manufactured by the Institute of Applied Physics RAS and the GYCOM Ltd. (Nizhny Novgorod)
2. Facility Acceptance Test for Gyrotron three is scheduled for May, 2019
3. Fourth Gyrotron set is being fabricated now



V-11: Power calorimetry in the 1MW/1000s pulse



Внеосевая генерация тока геликонными волнами с применением Антенны бегущей волны на токамаках D-IIID 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

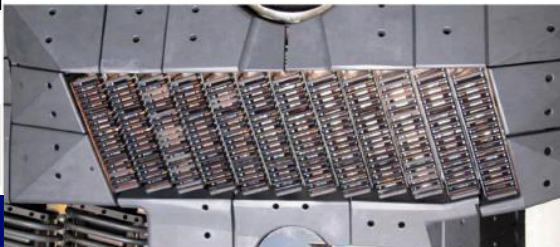
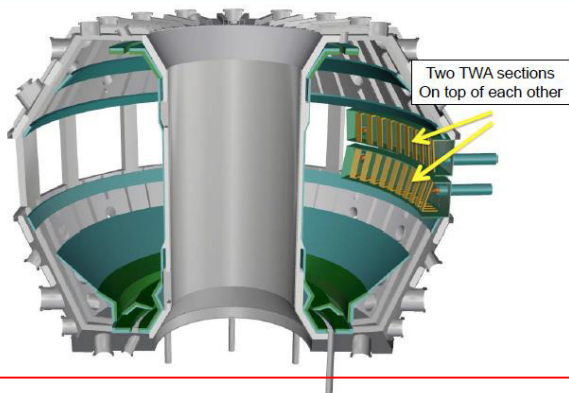
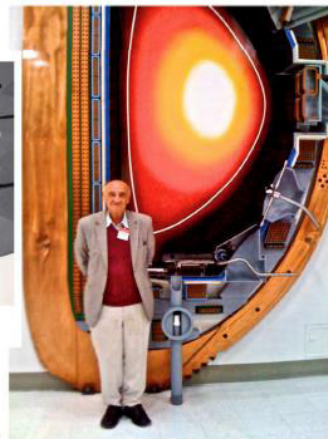


Fig. 1. Photograph of the 12-module low power antenna installed in DIII-D.



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-IIID (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

Следующий шаг в инжекторах атомов



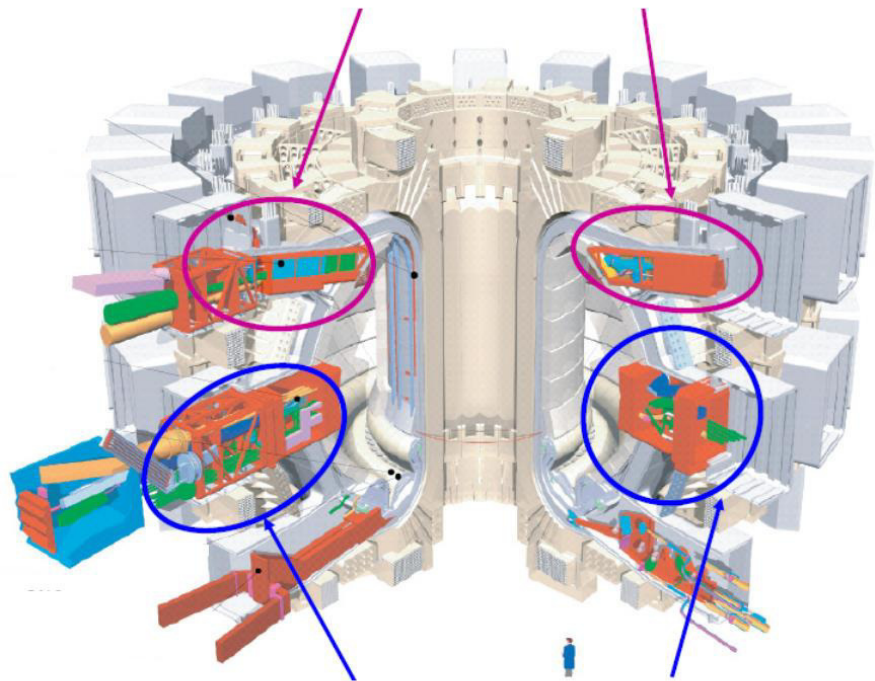
Инжектор имеет важные инновации:

- 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%.

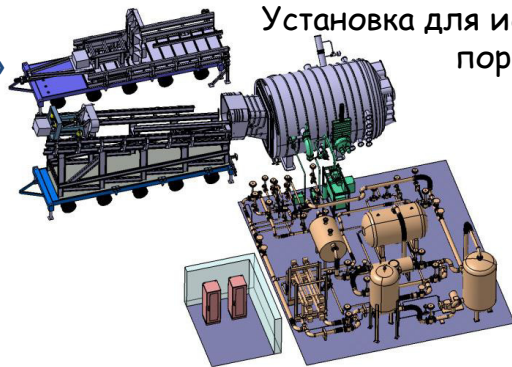
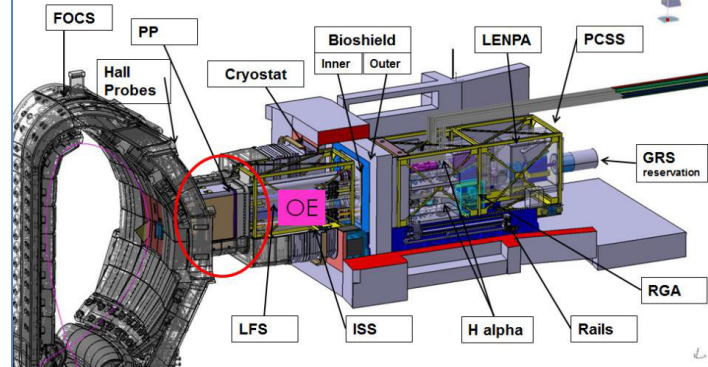


Инжектор атомов с параметрами 1000 keV, 5 MW, 1000 s создан в Институте ядерной физики РАН по заказу Tri Alpha Energy, Inc. (США)

Порт-плаги верхние



Порт-плаги экваториальные



Установка для испытаний порт - плагов

Порт-плаги и Установки для их испытаний создаются в России (ИЯФ СО РАН и АО «ГКМП») !!!

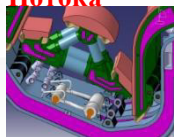


Диагностики ИТЭР, создаваемые в России



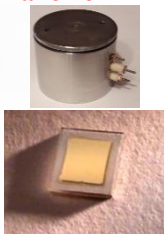
Нейтронные

Диверторный
Монитор
Нейтронного
Потока

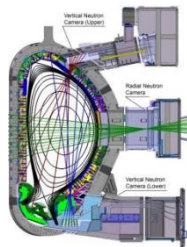


Камеры деления
U-235 и U-238

Алмазный
спектрометр
нейтронов и
быстрых
атомов



Вертикальная
нейтронная камера
для томографии



Томсоновское рассеяние & ЛИФ
в диверторе



Full scale prototype
of in-vessel optics Laser 2J / 100Hz

Spectroscopy equipment:

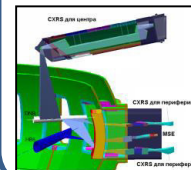
Polichromator 5-200 eV
Polichromator 0.3-200 eV

• Laser systems:

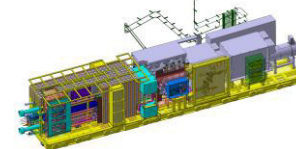
Nd:YAG 1.0645 μ m (2 J, 3 ns, 50Hz)
Nd:YLF laser 1.047 μ m (2 J, 10 ns, 5Hz)
Nd:YAG laser 0.946 μ m (0.1J, 10ns, 100Hz)

Оптические

CXRS

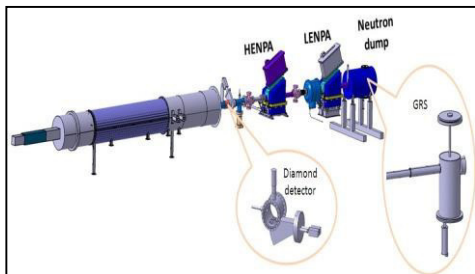


Н-альфа спектроскопия



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

Анализаторы атомов перезарядки (NPA)



Два NPAs:

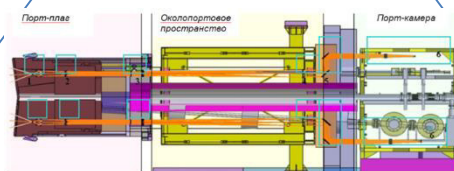
HENPA (0.2 – 2 MeV),
LENPA (10 – 200 keV)

и Алмазный спектрометр быстрых
атомов (0.04 – 8 MeV)

и нейтронов, гамма-спектрометр

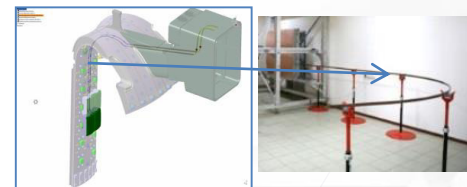
Диагностика
плазмы

Порт-плаги



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

Reflectometry



От 12 до 140 ГГц

13 Диагностик ИТЭР создаётся в России !!!





Центр удалённого участия в экспериментах ИТЭР (RPC) и



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

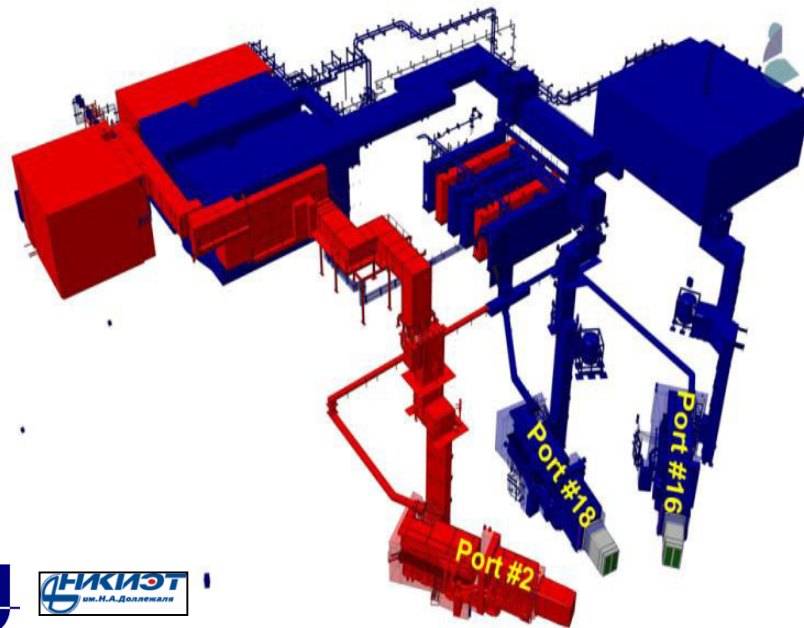
Remote Participation Centre (RPC) и

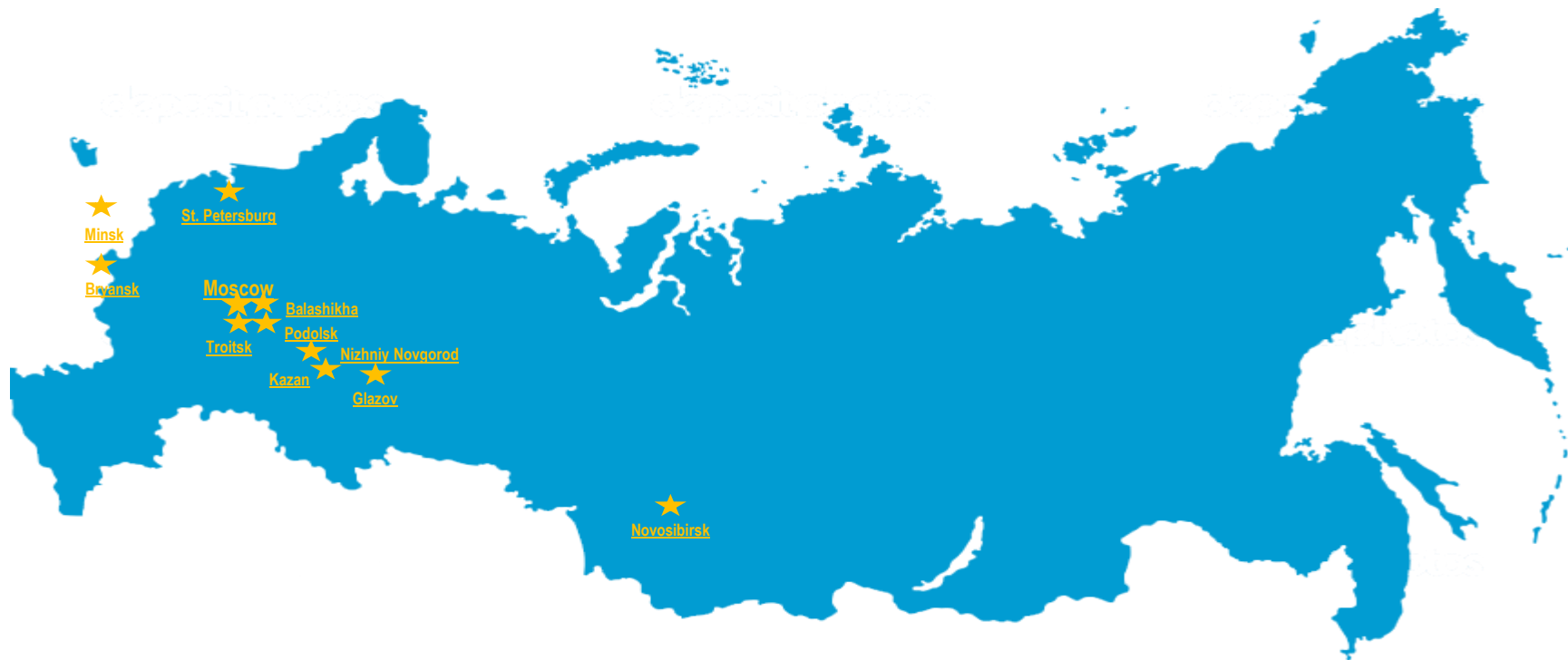
Единого Информационного Пространства УТС исследований

1. *Удаленное участие нтах.*
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*

Прогресс в Программе Испытательных модулей Бланкета (TBM Program)

- В Программе по испытаниям модулей blankets, нарабатывающих тритий будут использованы два экваториальных порта ИТЭР (#16, #18).
- В начальной конфигурации будут испытаны два TBM, охлаждаемые водой и два TBM, охлаждаемые гелием
- Китай, ЕС, Япония, Корея участвуют в Программе TBM в качестве лидеров
- Россия планирует проведение исследований:
 - Экспериментальных с наработкой трития на TRT и
 - гибридных модулей blankets в национальной программе по УТС





Research centers and industries from largest Russian cities – from St. Petersburg to Novosibirsk – involved into the process of the ITER Project implementation

Russia's key contractors

 ROSATOM 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"	 JSC "Cryogenmash"
 Joint-Stock Company "TVEL"	 JSC "GCMР"
 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

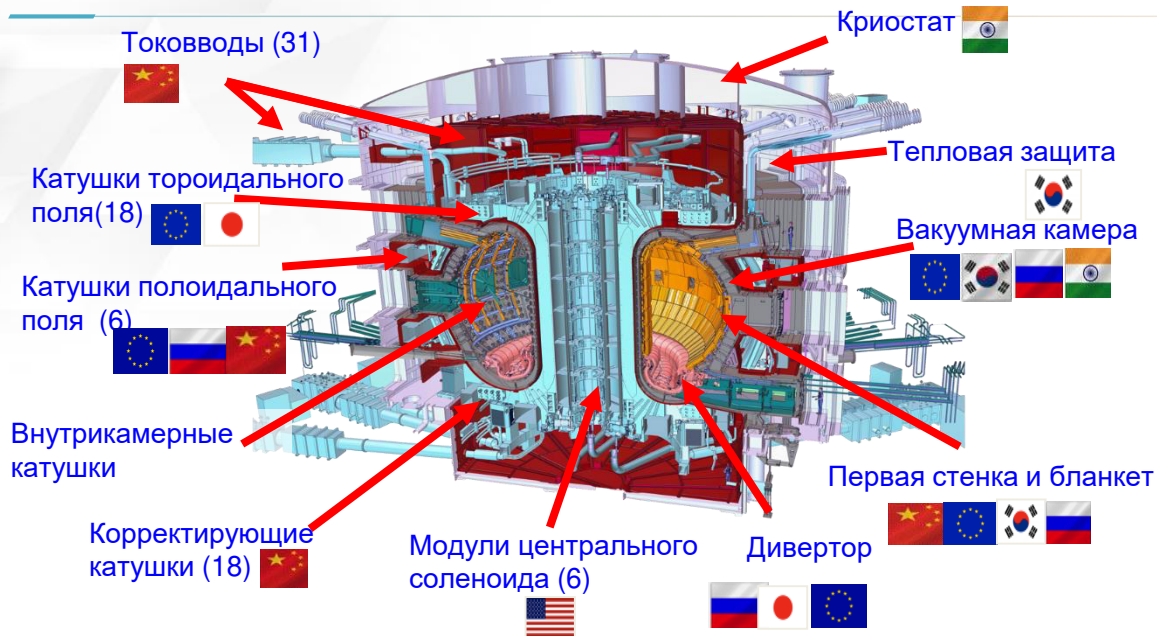
(Технологические системы)

Системы ИТЭР	Результат	Кооперация
1.&2. Nb ₃ Sn и NbTi Сверхпроводники	Создано производство лучших в мире НТСП Nb ₃ Sn и NbTi сверхпроводников (изготовл. 225 т)	ВНИИНМ, ТВЭЛ, ИФВЭ, ВНИИКП, ЧМЗ, НИЦ КИ
3. Обмотка полоидального поля PF-1	Разработана и изготавливается сверхпроводящая полоидальная катушка PF-1	НИИЭФА, СНСЗ
4. Верхние патрубки	Разработана конструкция и изготавливаются верхние патрубки	НИИЭФА, MAN Turbo Diesel
5. Первая стенка	Разработана конструкция и начато изготовление самых энергонапряжённых 40% ПС (Ве до 4 МВт/м²)	НИИЭФА, НИКИЭТ, ВНИИНМ, «Базальт», «Комполит»
6. Соединители модулей бланкета	Разработаны и создано производство механических и электрических соединителей	НИКИЭТ
7. Центральная сборка дивертора	Разработаны и создано производство модулей центральной сборки дивертора (W до 10 МВт/м²)	НИИЭФА
8. Испытания первой стенки и дивертора	Созданы стенды и начаты испытания элементов дивертора и первой стенки из России, Японии и ЕС	НИИЭФА, ГНЦ РФ ТРИНИТИ, ВНИИНМ
9. Коммутирующая аппаратура	Разработаны и начато изготовление 100% коммутирующей аппаратуры	НИИЭФА, Siemens
10. Гиротроны	Изготовлены и испытаны лучшие в мире гиротроны (170	ИФФ РАН, Гиком, НИЦ

(Диагностические системы)

Системы ИТЭР	Результаты	Кооперация
11. Рефлектометрия	Разработан рефлектометр / рефрактометр	УТС–Центр, НИЦ «КИ»
12. Анализатор атомов перезарядки	Созданы лучшие в мире анализаторы атомов, спектрометры нейтронов и гамма-квантов	ФТИ РАН, «Техноэксан» ИТЭР-Центр, ТРИНИТИ
13. Монитор потока нейтронов	Разработаны мониторы потока нейтронов с U-235 и U-238 для управления горением	ИТЭР-Центр, ТРИНИТИ, НИИТФА, ИЯФ СО РАН
14. Томсоновское рассеяние	Созданы уникальные лазеры, первое зеркало, полихроматоры.	ФТИ РАН, «Техноэксан»
15. Спектроскопия водородных линий	Создано уникальное первое зеркало из монокристаллического молибдена	УТС-Центр», «Луч» НИЦ Курчатовский институт
16. Активная спектроскопия	Созданы уникальные спектрометры, Мо первое зеркало, оптоволоконные жгуты	ИТЭР-Центр, «Солар», ТРИНИТИ, ГИПО, «Луч»
17. Вертикальная нейтронная камера	Созданы лучшие алмазные спектрометры нейтронов, U-238 камеры деления, MI-кабели.	ИТЭР-Центр, ТРИНИТИ, ИЯФ СО РАН, НИИТФА
18. γ -спектрометрия	Созданы лучшие спектрометры γ -квантов	ФТИ РАН, «Техноэксан»
19. ЛИФ	Созданы уникальные лазеры	ФТИ РАН, «Техноэксан»
20. Стенды испытаний порт-плагов	Разработаны технологии испытания порт-плагов	«Криогенмаш»
21-25. Порт-плаги E-11, U- 2, 7, 8, L-8	Разработаны технологии изготовления порт-плагов, начата интеграция диагностик	ИЯФ СО РАН «Техноэксан»

ITER - технологическая платформа для всемирной Термоядерной программы. Но !



Россия получит право на безвозмездные лицензии на все технологии, созданные в Проекте ИТЭР, для использования в рамках внутренней Программы УТС, а также информацию о мировой термоядерной промышленности

Но!

Технологическая платформа ITER не содержит все необходимые для создания термоядерного реактора технологии :
Li первую стенку, **Генерацию стационарного неиндуктивного тока**, **ядерные бланкеты**, **ВТСП катушки**, **устройства для радиационных испытаний компонентов реактора** и др.

Технологии термоядерного реактора	Термоядерные технологии ИТЭР	Технологии *Следующего шага*
Вакуумная камера	Двустенная с водяным охлаждением	- // -
Электромагнитная система	Nb ₃ Sn & NbTi ЛТСП СiС ВТСП – Токовводы	Nb ₃ Sn – повышение плотности тока ВТСП - катушки
Первая стенка	Be	Жидкий Li
Дивертор	W	Жидкий Li
Модули blankets	TBM для наработки трития	Наработка трития, ²³⁹ Pt и ²³³ U изготовление Дожигание минорных актинидов Производство тепловой энергии
Инжекция атомов	1 МэВ, 1000с, 16 МВт, обдирка в газе	Протонная и плазменная обдирки
Электрон. циклотронный нагрев	170 ГГц, 1000 с, 1 МВт	230 ГГц, 1000 с, 1 МВт
Ионный Циклотронный Нагрев	40-55 МГц, 10 МВт	Антенна бегущей волны
Генерация стационарного тока	NBI, ECCD низкая эффективность	Геликоны (сильный внеосевой CD)
Диагностика	> 55 диагностик ИТЭР	Совместимость с реактором
Дистанционное управление	Дистанционное управление и CAD	Развитие удалённого участия в работе
Интегральное управление	Магнитное и кинетическое	- // - + Генерация тока и др.
Системы подавл. неустойчивостей	Инжекция крупинки	Разработка продвинутых сценариев

Миссии TRT состоят в:

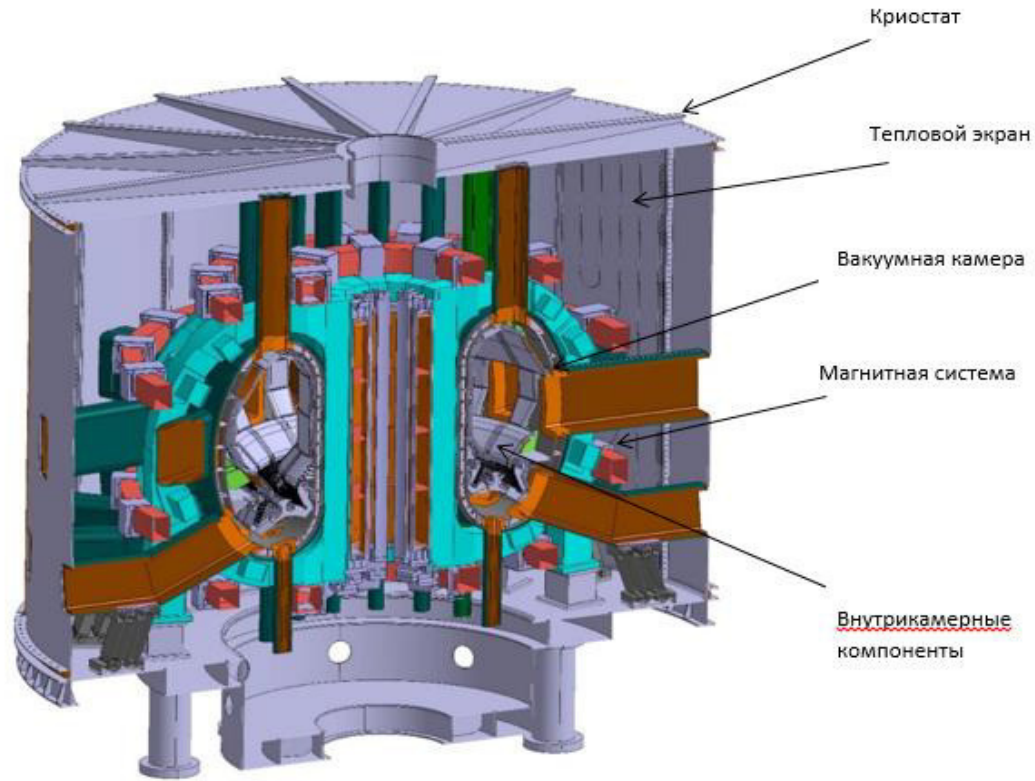
- разработке и интеграции в одной установке ключевых инновационных термоядерных технологий (создание дополнительной к ИТЭР технологической платформы TRT):
 - *ВТСП электромагнитной системы*, работающей при *высоком (8Т на оси плазмы) магнитном поле*;
 - *металлической и литиевой жидкометаллической первой стенки*;
 - *инновационного дивертора*;
 - системы инъекции атомов с *энергией 0.5 МэВ и мощностью несколько десятков МВт*;
 - *мегаваттных квазистационарных ($t > 100$ с) гиротронов с частотой 230 ГГц*,
 - ИЦН на частотах *60-80 МГц мощностью несколько МВт*;
 - системы *неиндуктивной генерации тока*;
 - *тритиевого 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-тритиевых экспериментах;
- 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.

Концептуальный проект TRT на конец 2021

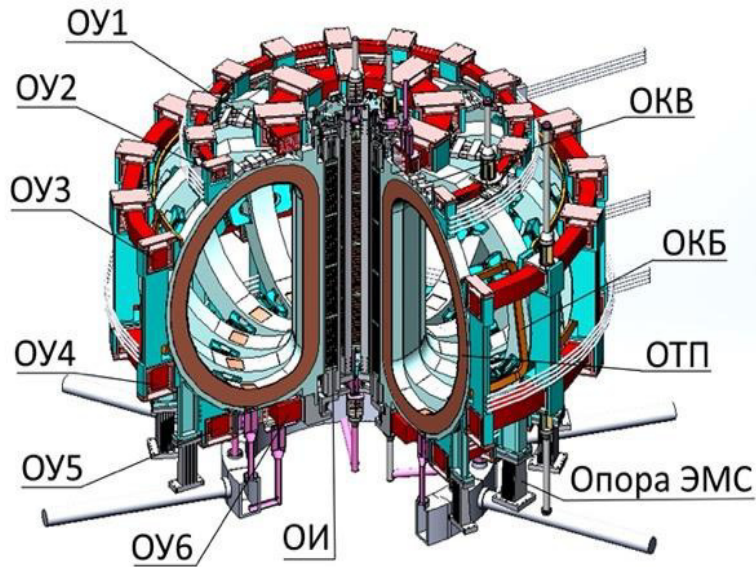
Основные параметры и особенности TRT

B (Т)	8	Высокое поле, ВТСП
R/a	2.15/0.57	Классич. компакт. цена
Δt (с)	>100	Квазистационарный
I_p (МА)	4-5	Высокий ток
$n_e (10^{20} \text{м}^{-3})$	1-2	Высокая плотность
P_{aux} (МВт)	30 ~ 40	Реакторосовместимый нагрев и генерация тока
Q (DT)	> 1	Реакторная плазма



Концептуальный проект TRT разработан Частным учреждением ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР» в кооперации с ведущими специалистами АО НИИЭФА, НИЦ «Курчатовский институт» по заказу ГК Росатом в 2019-2021 годах

и опубликован в специальных номерах (№11 и №12) журнала «Физика плазмы» в 2021 году.

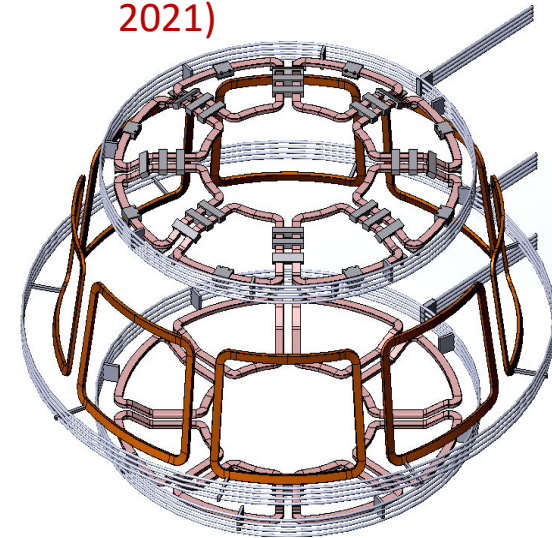


TFC – 16 ВТСП катушек (ОТП)

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)

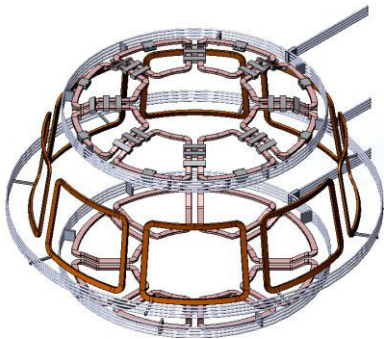
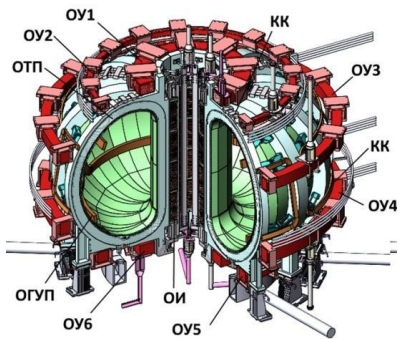
Рабочий ток проводников – 60 кА

Максимальный ток – до 80 – 100 кА при 4.2 К

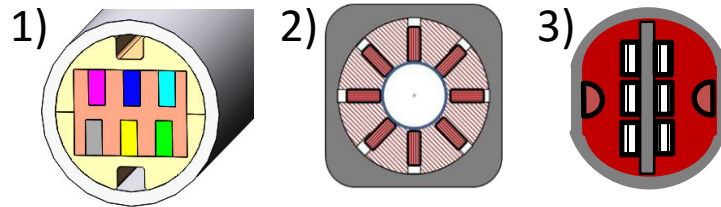
Конструктивная плотность тока (по металлу) провода ОТП не менее 113 А/мм²

Конструктивная плотность тока (по металлу) провода ЦС не менее 89 А/мм²

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, Втах, 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

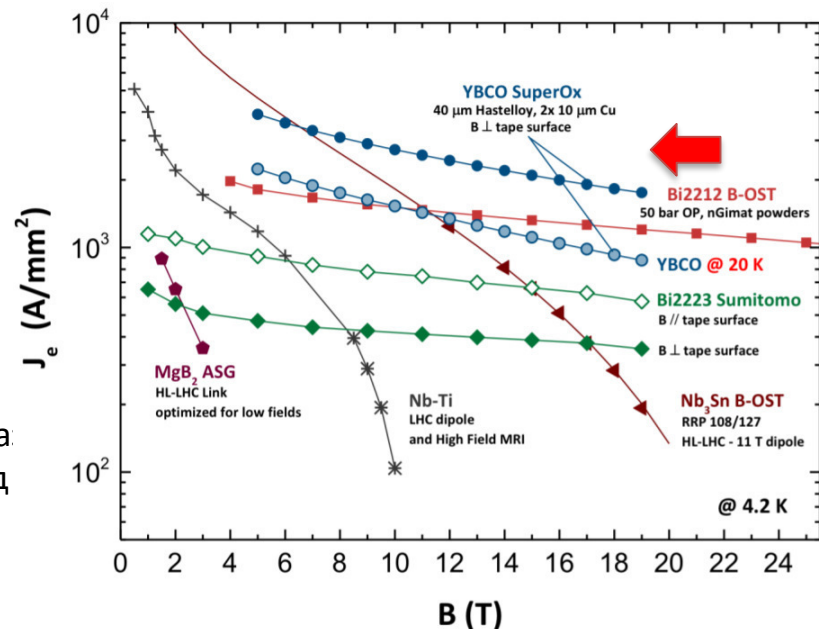
В мире пока не созданы проводники на параметры обмоток ОТП и ОИ

В 2022 будут результаты для SPARC (MIT) и ST-40 (Токамак Energy) и первые результаты тестов наших образцов 2) и 3)

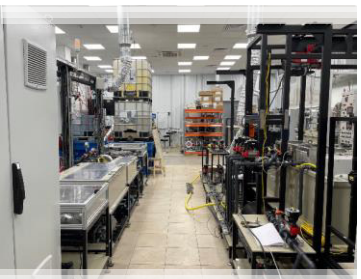
ВТСП-лента для высоких магнитных полей

- Патент на изобретение RU2761855 от 21.07.2021
- I_c (20K, 20Тл) = I_c (77K, 0Тл) = 130-200 А/4 мм
- Стандартный продукт – J_e (20K, 20Тл) > 600 А/мм²
- Рекордные результаты – J_e (20K, 20Тл) > 1500 А/мм²
- 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 м²

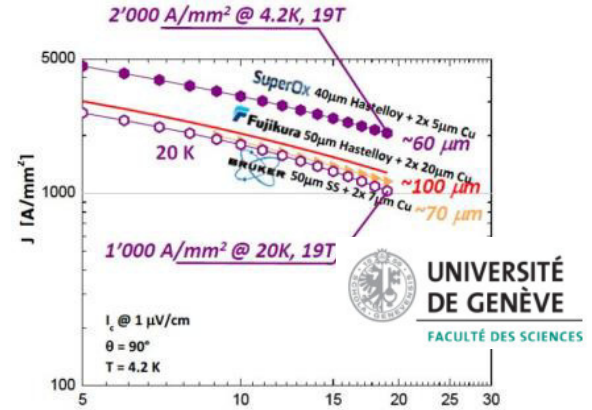
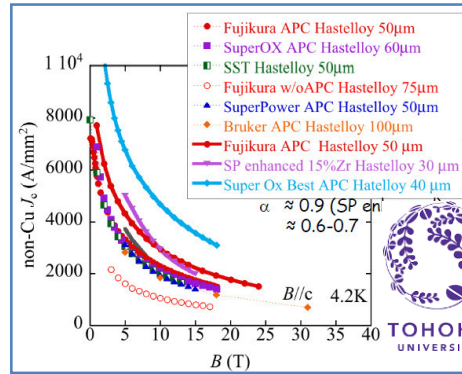
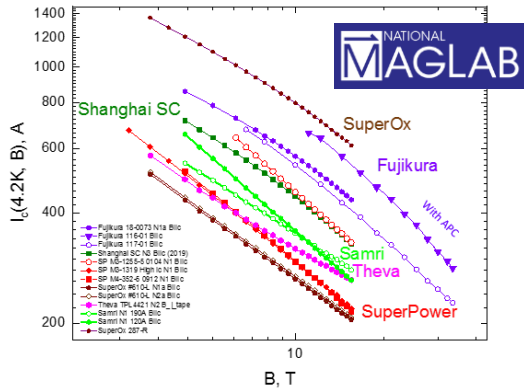


European Strategy for Particle Physics Accelerator R&D Roadmap
CERN, 2022 <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2201/2201.07895.pdf>

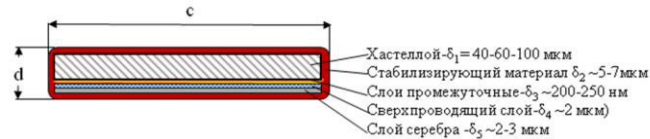
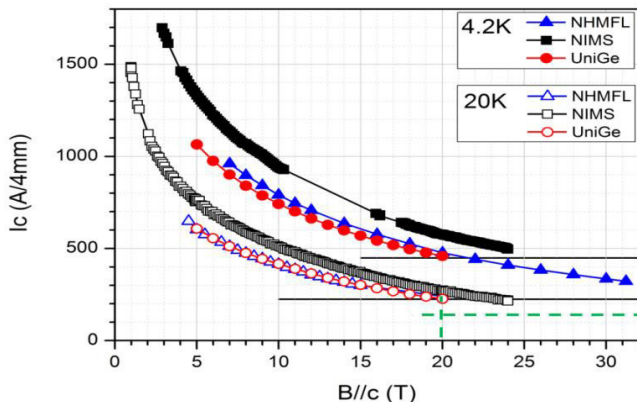


Лента YBCO компании SuperOx

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

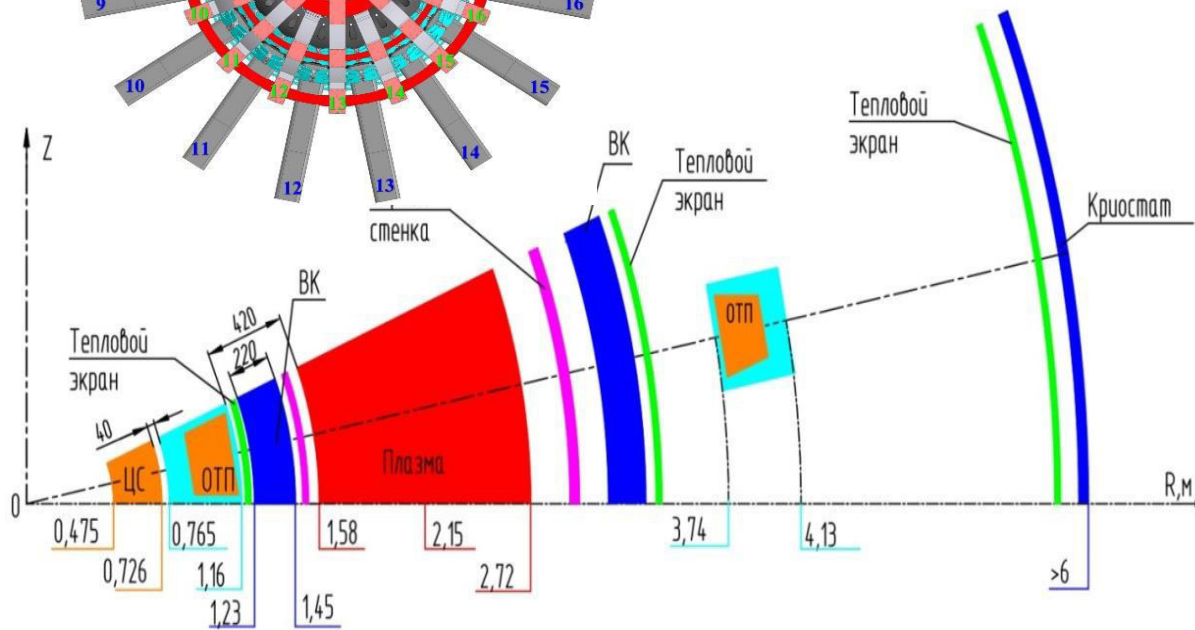
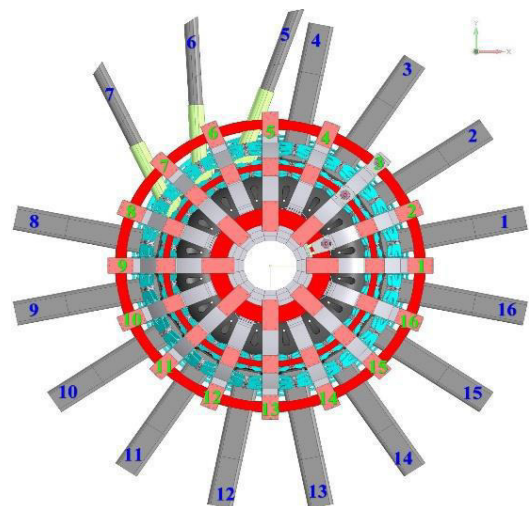
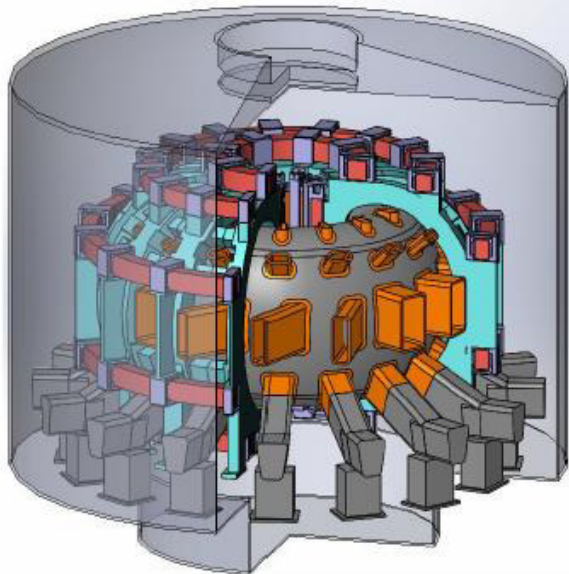


Критический ток ленты SuperOx при 4,2 и 20 K выше чем у ближайших конкурентов на 30%



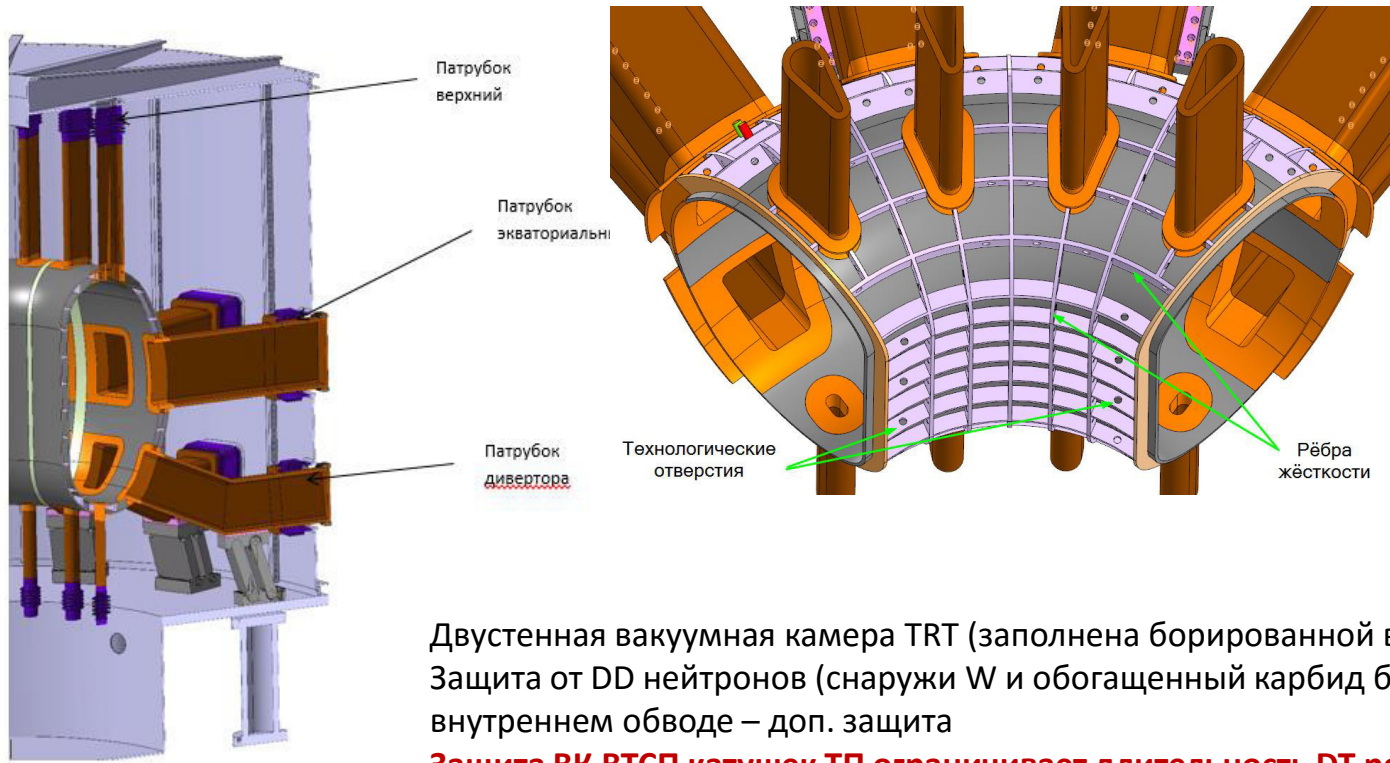
Критические характеристики ленты компании SuperOx при 4,2 K и 20 K, в сильных магнитных полях, измеренные в различных лабораториях и принятые за базовые при разработке проводников для катушек TRT.

TRT 2021 – Вакуумная камера и криостат



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

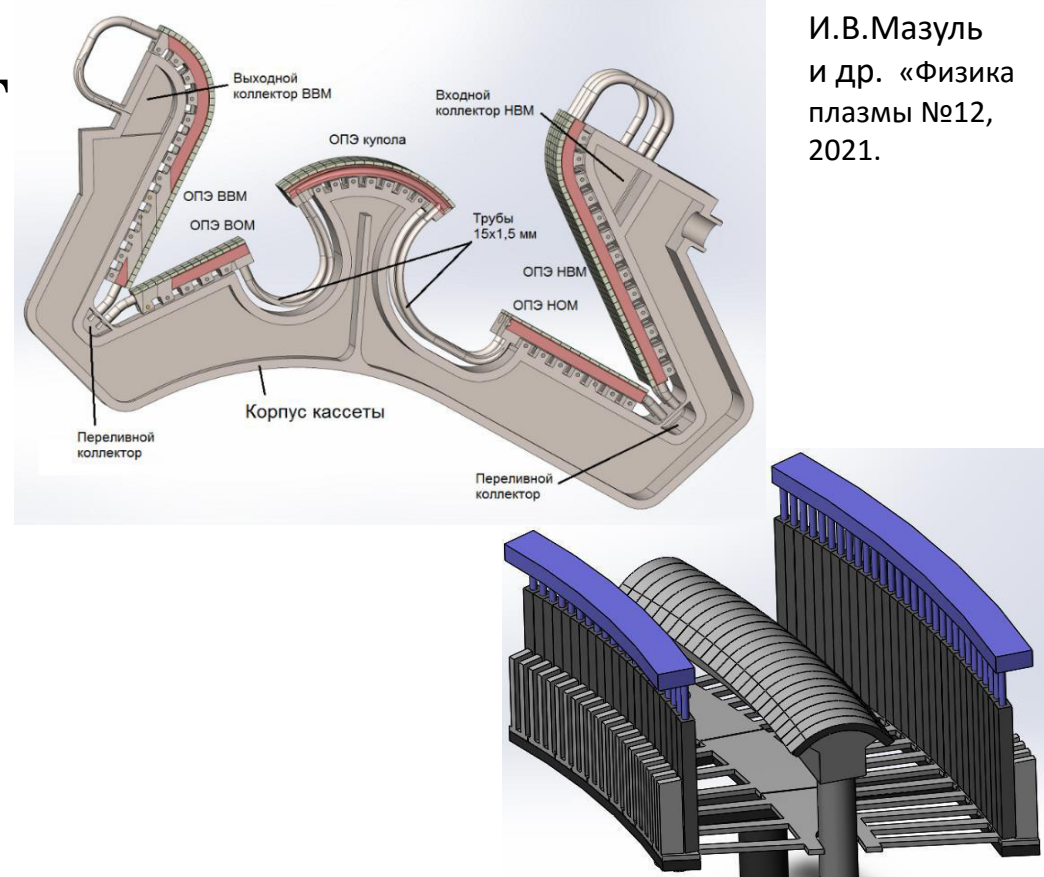
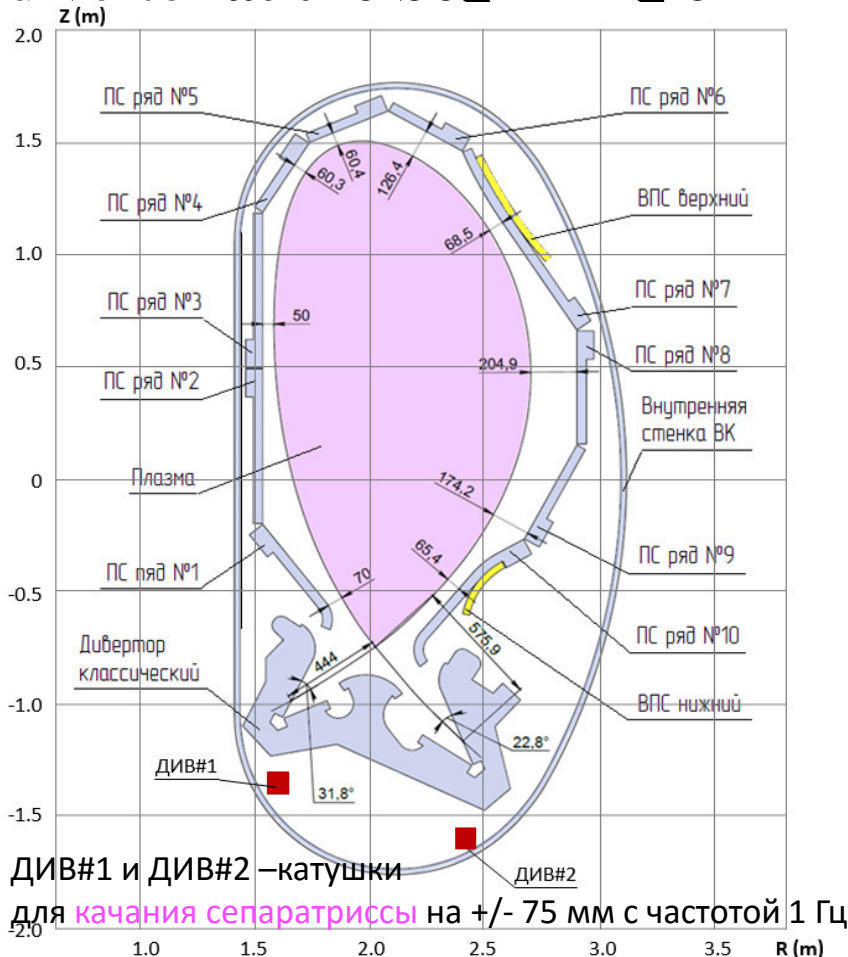
TRT 2021 – Вакуумная камера



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).

Режимы работы «традиционного» дивертора TRT

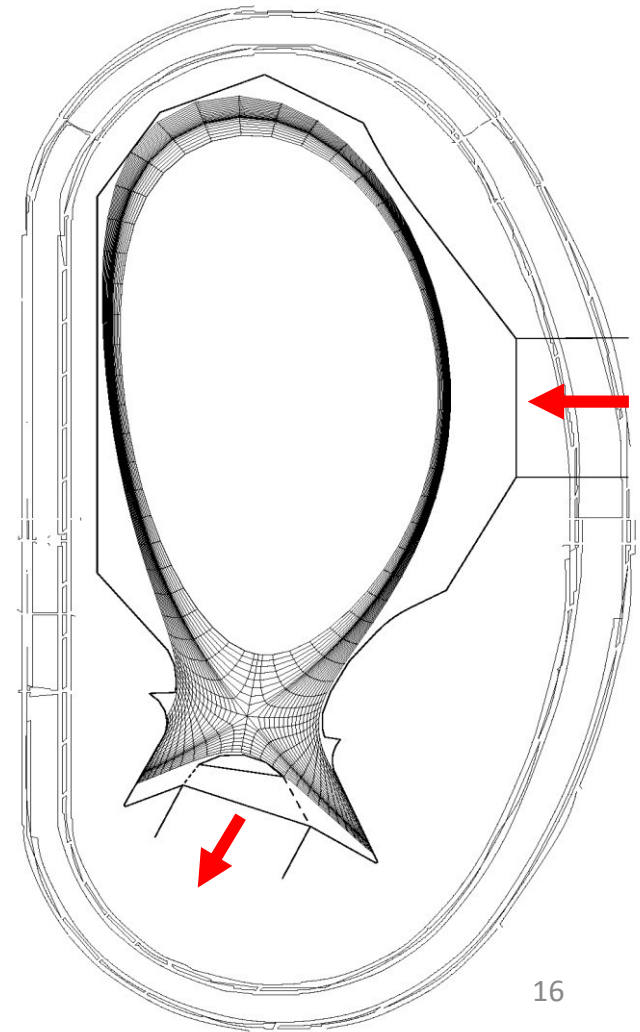
Моделирования SOLPS4.3 показало:

При полной проектной величине тока в плазме ~ 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).

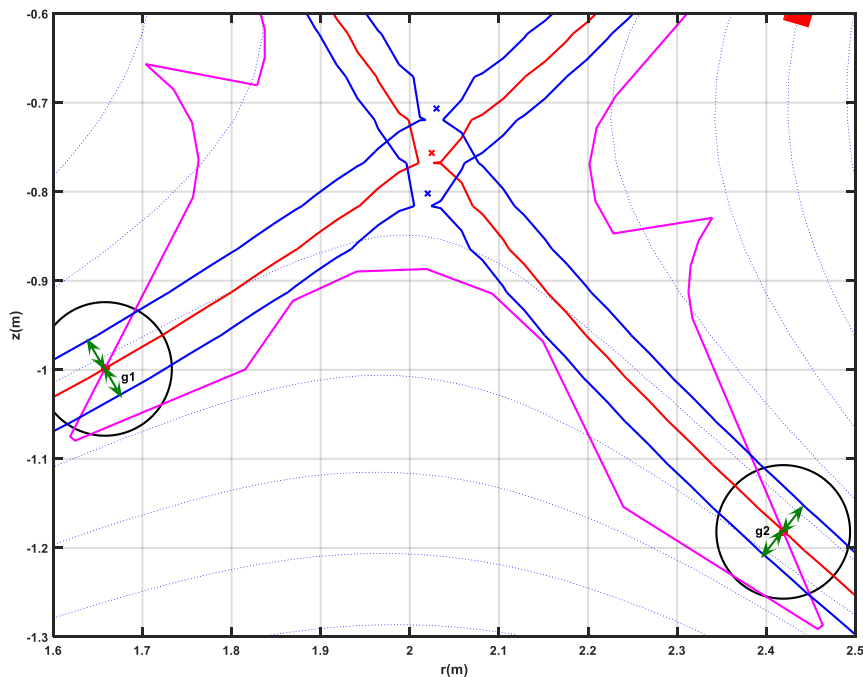
Рекомендации – понизить ток и/или плотность и/или доп. нагрев плазмы.

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 !

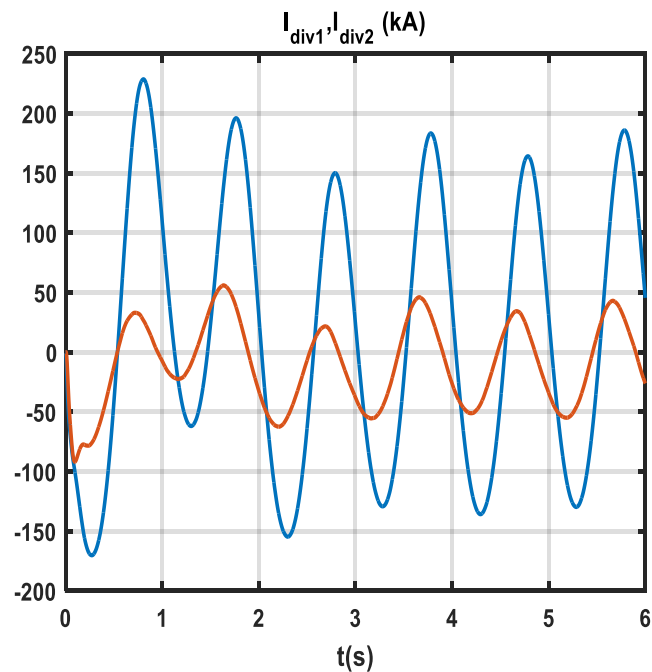
(А.С.Кукушкин и др: «Физика плазмы №12, 2021)



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.

Стратегическое направление в проблеме ПС: Постепенное увеличение содержания Li

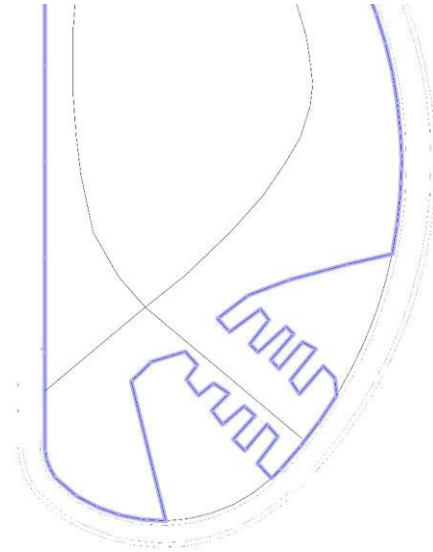
- Концепция, включающая стабилизацию поверхности жидкого металла с помощью КПС, имеет существенные преимущества и должна быть положена в основу базовой концепции литиевой первой стенки TRT.
- Элементы первой стенки, испытывающие воздействие тепловых потоков до $1\text{МВт}/\text{м}^2$ могут, быть созданы на основе конструкции ИТЭР-подобных элементов с водяным охлаждением. Кондиционирование первой стенки путем напыления лития с целью улучшения параметров плазменного разряда может быть осуществлено с помощью испарителей или/и эмиттеров.
- Защита первой стенки на начальной стадии инициирования разряда и на стадии его гашения может осуществляться с помощью охлаждаемых защитных лимитеров. Конструкция таких лимитеров должна строиться на основе использования литиевой КПС
- При соответствующем выборе конструкционных материалов, системы охлаждения и теплоносителя возможно обеспечить стационарный режим работы при тепловых потоках $10\text{МВт}/\text{м}^2$ и более. На основе такого подхода могут быть созданы и приемные элементы дивертора.

Li в TRT – объединение концепций апробированных на T-11, T-10 и запланированных на T15-МД

(А.В.Вертков и др: «Физика плазмы №12, 2021)

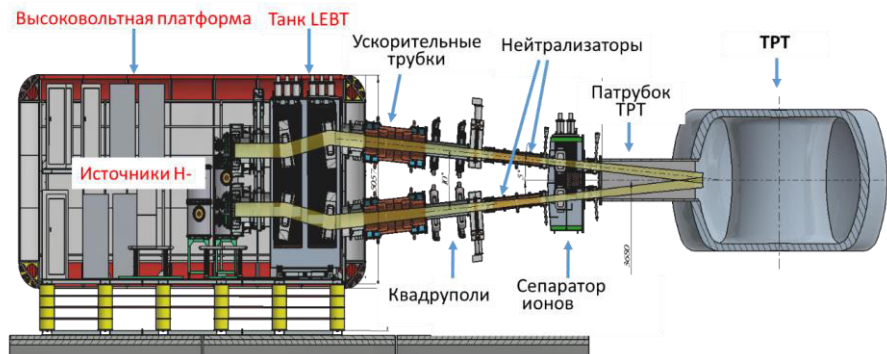
Следующий этап: анализ жидкометаллического дивертора

- Концепция в стадии разработки
- Необходимо предусмотреть возможность полной замены дивертора
- Совместимость материалов и системы охлаждения с Li (Sn?)
- Магнитная система: х-точка выше на 0.5 м
- Цель: исследовать возможность существенного увеличения длительности разряда за счёт возобновляемого покрытия стенки



Вариация на тему
"Li box" [R. Goldston]

Системы дополнительного нагрева и генерации тока TRT



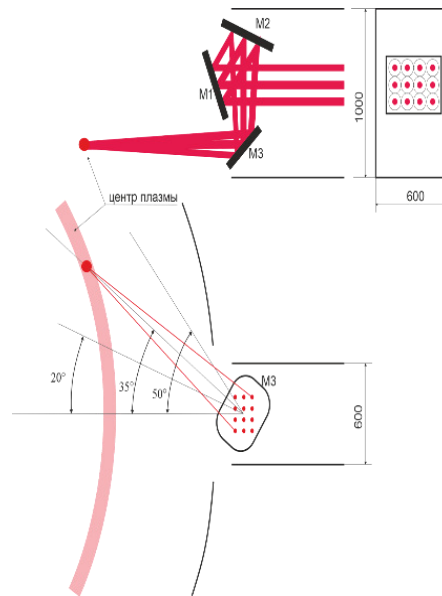
500 кэВ D- NBI на TRT (проект ИЯФ СО РАН)

мощность двухпучковой инъекции нейтралов в каждый порт
 ~ 7 МВт (Н) и ~ 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
 ~ 12 гиротронов – ИФФ РАН



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

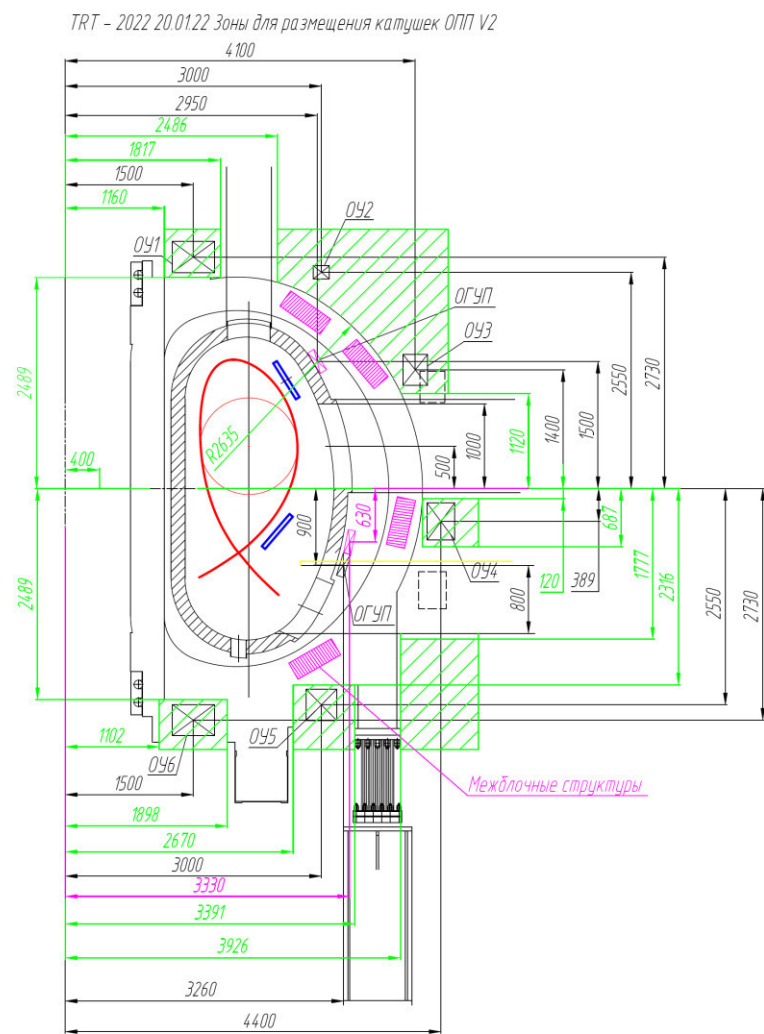
ИЦН и генерация тока геликонами

- * В частотном диапазоне 60 - 80 МГц будет реализовано несколько схем ICRH ($^3\text{He}^{2+}$, плазменные T^+ и пучковые T^+ на частоте 80 МГц и плазменные D^+ и $^9\text{Be}^{4+}$ и пучковые 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..

(А.В.Красильников и др: «Физика плазмы №11, 2021)

TRT на конец января 2022

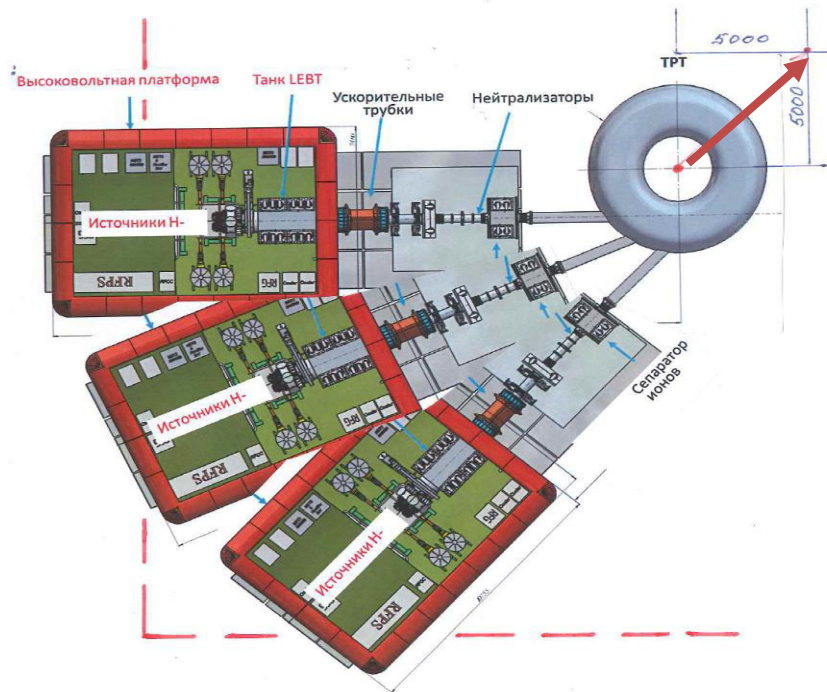
- Диагностическая конференция Сочи - 2021. Начата подготовка спец. Выпуска Физики плазмы по диагностике TRT в 2022 .
- По результатам совещаний по диагностике TRT меняется конструкция вакуумной камеры и ЭМС– экваториальные патрубки смещаются вверх к центру плазмы, обсуждается возможность «выпрямления» диверторных патрубков



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 ~ 7 м вдоль диагонали зала.
2. Наряду с этим анализируется возможность уменьшения размеров высоковольтной платформы вдоль пучков.

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
δ_{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
Φ_{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
τ_ϵ	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

Table 2.

Basic TRT (2020, HTS)

with $P_{aux/CD} = \text{up to } 40 \text{ MW}$

and

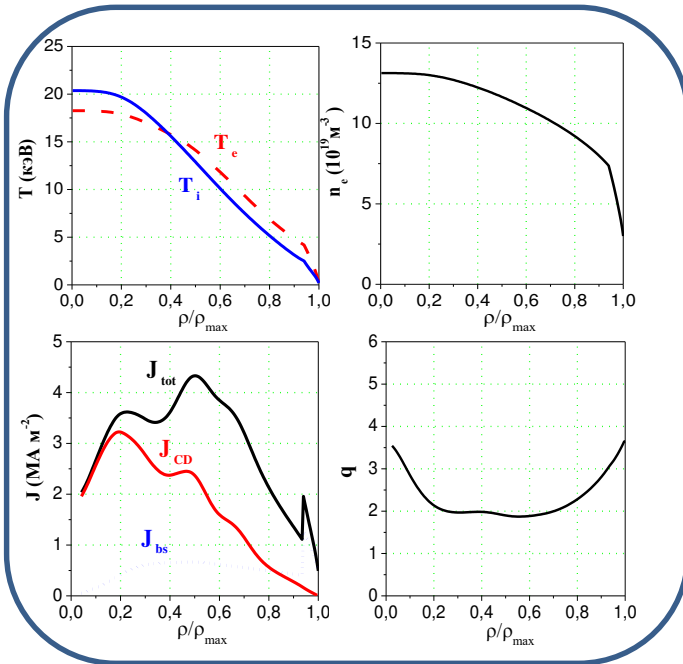
$n_e = 2 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ (code PART,

H-mode)

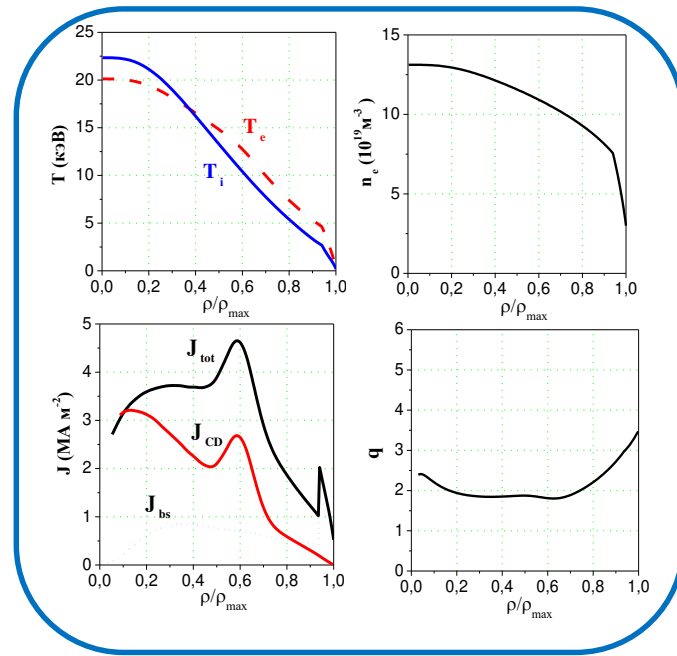
$R_0 / a,$	m	2.15 / 0.57		
A		3.77		
$B_t / B_{tc},$	T	8 / 15		
$I_{p,r}$	MA	4.0 - 5.0		
k_{95} / d_{95}		1.8 / 0.3		
Plasma configuration		SN (option DN)		
$V_{pL,r} / \text{Plasma surface } S_{//},$	m^3 / m^2	25 / 70		
$d_{\text{ripple},r}$	%	0.5		
N_{TF}		16		
$\langle j_{TFi} \rangle,$	MA/m ²	? 30		
Inner size of TFC ($R_{TFii}, R_{TFie},$)		0.77 , 1.17		
Plasma – TFC distance $D_{PL-TF},$		0.4		
$D \gg_{\text{ext},r}$	Vs	33		
Fuel		D	D + 1%T	D + T
$Dt_{\text{pulse},r}$	s	100 - 150	~ 100	<10
$P_{aux/CD},$ (NBI+ECRH+ICRH)	MW	40 (25+10+5)	40 (25+10+5)	40 (25+10+5)
$n_e,$	10^{20} m^{-3}	2	2	2
$T,$	keV	6 – 8	6 - 8	7 – 8
$H_{Y,2}$		1.0 – 1.2	1.0 – 1.2	1.0 – 1.3
b_N		1.4	1.4	1.6
q_{95}		3.3	3.3	3.3
t_{Er}	s	0.3	0.3	0.3
Maximum neutron yield $Y_n,$		0.5	1	up to 20
P_{fus}	MW	0.3	0.6	up to 50
P_{sep}/R	MW/m	14	14	16
Q		0.01	0.02	> 1

Сценарии разряда TRT – 5MA в D и DT

$B_0=8T, I_p=5MA, \langle n_e \rangle = 1 \cdot 10^{20} m^{-3}, P_{NB}=20MBT, P_{EC}=10MBT, HH=1.2, \Delta\psi = 4 \text{ В сек}$



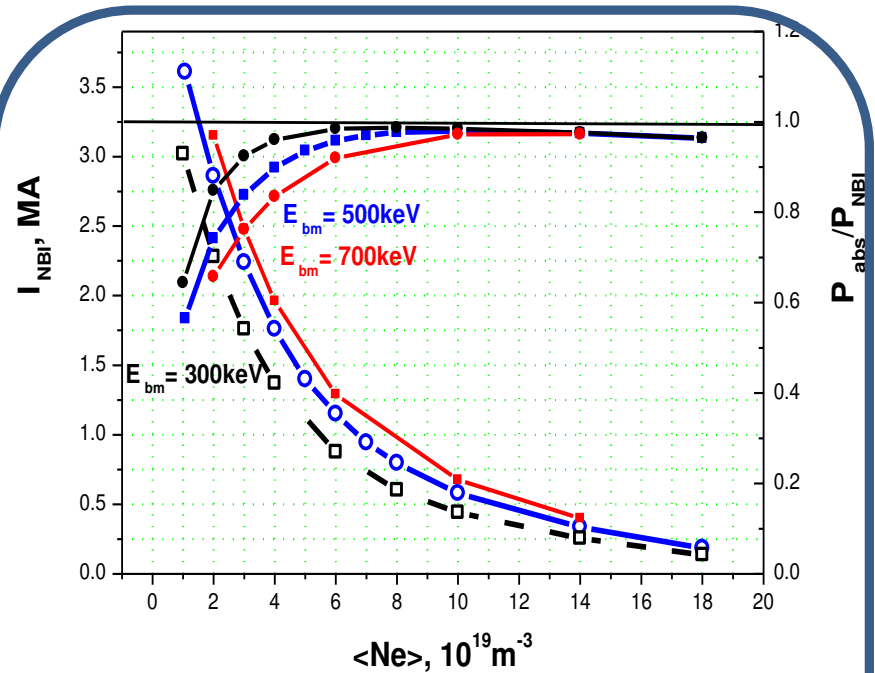
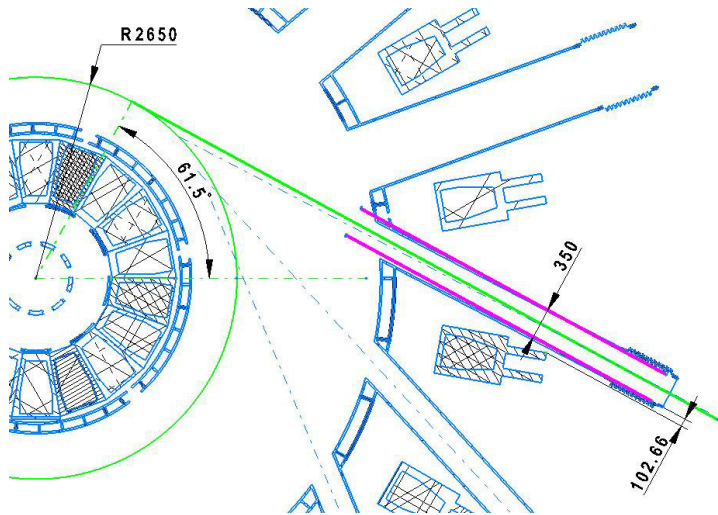
**D/D: $\Delta t = 102c P_{dth} \sim 2.2 \cdot 10^{17} 1/s,$
 $P_{df} \sim 1.0 \cdot 10^{18} 1/s$**



**D/T: $\Delta t = 157.3c P_{dt} = 33.8MBT, Q=1.13$
 $P_{dtf}=37.3MBT, Q_f=1.24$**

ЭМС и доп. системы ТРТ способны обеспечить разряды проектной длительности в плазме с реакторными (гибрид) параметрами при плотности $1 \cdot 10^{20} m^{-3}$. Одновременное достижение «табличных» характеристик – ток, плотность, длительность – возможна за счет оптимизации стадии подъема тока. Но! Проблема дивертор

NBI CD in TRT



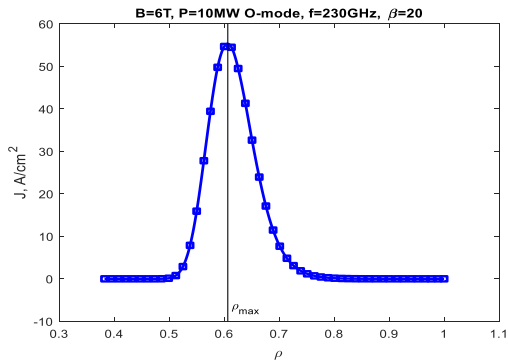
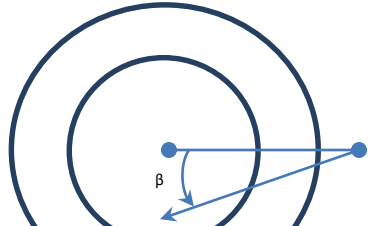
Зависимость эффективности захвата пучков и генерации пучкового тока в ТРТ от плотности плазмы и энергии пучков NBI, $P_{beam}=20MW$

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

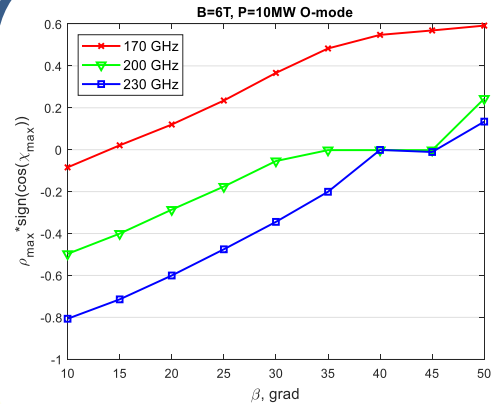
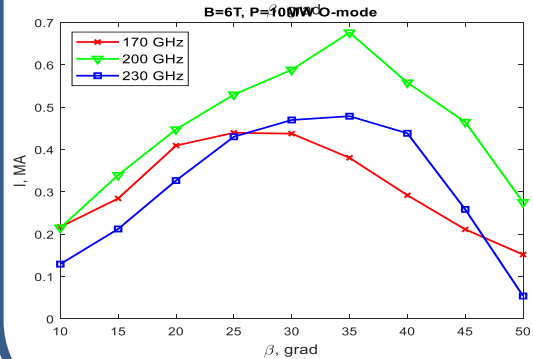
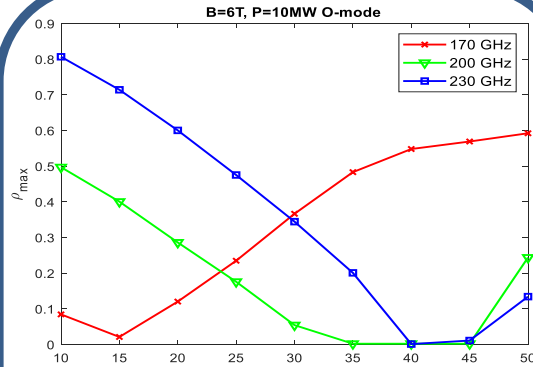
Эффективная генерация тока возможна при плотности плазмы $5 - 10 * 10^{19} m^{-3}$.

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

ЭЦР Нагрев и Генерация Тока



Ввод в $Z=0$ под углом β , ρ_{\max} – центр области локализации поглощенной мощности

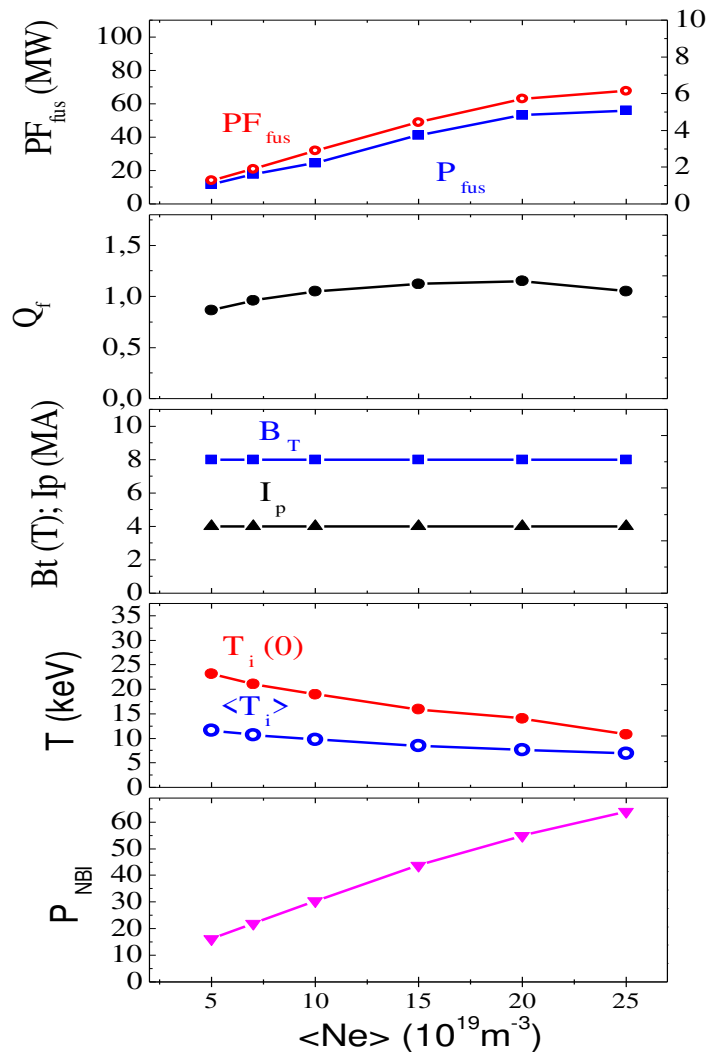


Поглощение во внутренних областях более эффективно для CD – нет запертых, греем «токонесущие»

Моделирование OGRAY.
P_{EC}=10МВт, O-mode

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

Ожидаемые режимы разряда



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

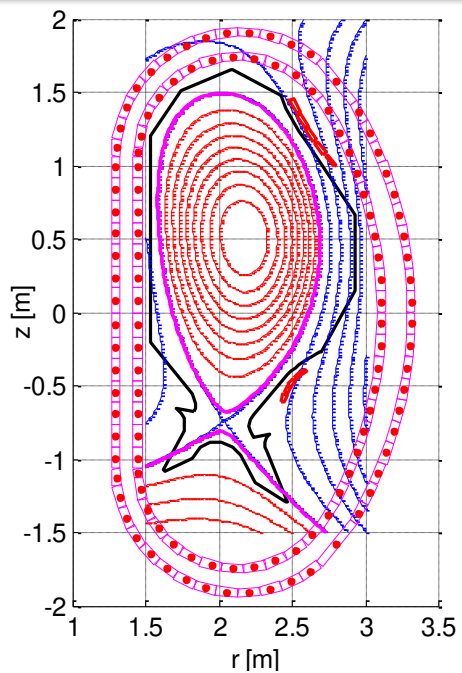
$Q \sim 1$ примерно во всем рассмотренном диапазоне плотности $0.5 < n_{e20} < 2.5$ и мощности дополнительного нагрева

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

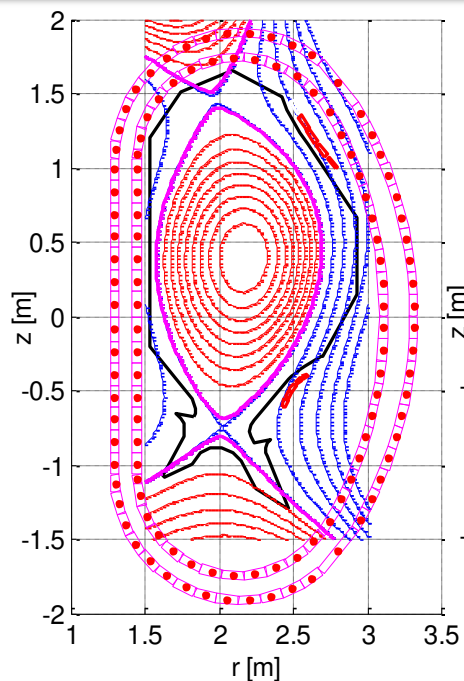
Даже на нижней границе рассмотренного диапазона мощность термоядерных реакций $>15 \text{ МВт}$, что обеспечивает $\sim 0.2 \text{ МВт/м}^2$ нейтронного потока на стенку, т.е. удовлетворяет потребности нейтронного источника в гибридной схеме.

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

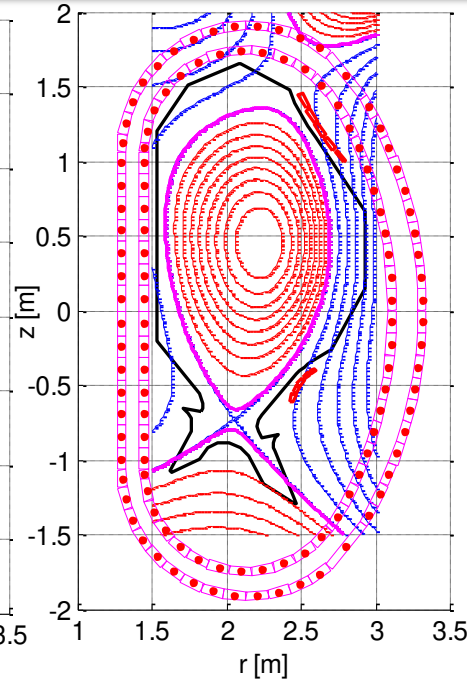
Возможности по равновесным конфигурациям TRT



Для анализа
процессов в SOL
(область $SOL \geq 5$
см)



2-х нулевой дивертор



Верхняя
отрицательная
треугольность (-
0.16)



Основные компоненты ТРТ, которые в настоящее время могут быть реализованы кооперацией российских предприятий



Компонент проекта	Особенности	Кооперация создателей	Межд. сотрудр.
Проект (Размеры, магнитное поле, ток)	$R_0 \sim 2.15 \text{ м}$, $a \sim 0.57 \text{ м}$ $B_T = \sim 8 \text{ Тл}$, $I_p \sim 4 - 5 \text{ МА}$	«ИТЭР-Центр», НИЦ «КИ», НИИЭФА, ТРИНИТИ, НИКИЭТ	
Вакуумная камера, криостат	ВК–двустенная охлаждаемая водой	НИИЭФА, Брянск	
Криогенная система	Жидкий гелий	АО Гелиймаш, АО Криогенмаш	
Электромагнитная система	Сверхпроводящая: ВТСП	АО «ТВЭЛ», АО «ЧМЗ», ВНИИКП, ВНИИНМ, НИЦ «КИ», АО ТРИНИТИ, АО НИИЭФА	Великобритания ЕС, США
Первая стенка	Be / Li	НИИЭФА, НИКИЭТ / ТРИНИТИ, «Красная звезда»	
Дивертор	W / Li	НИИЭФА, НИКИЭТ / ТРИНИТИ, «Красная звезда»	
Дополнительный нагрев плазмы	$\sim 40 \text{ МВт. } (>100 \text{ sec})$ (Инжекц. атомов $\sim 500 \text{ keV}$, 20 МВт , ЭЦН 230 ГГц , $\sim 10 \text{ МВт}$, ИЦН $60-80 \text{ МГц}$, $\sim 5 \text{ МВт}$)	«ИТЭР-Центр», ИЯФ СО РАН, ИПФ РАН, ФТИ РАН	ИЦН - ЕС
Генерация стационарного тока	$\sim 20-30 \text{ МВт}$ (ИН, Геликоны)	«ИТЭР-Центр», ИЯФ СО РАН, НИЦ «КИ», ИОФ РАН, ФТИ РАН	Геликоны – Корея, ЕС, США
Диагностика плазмы	Совместим. с термояд. реактором	«ИТЭР-Центр», НИЦ«КИ», ФТИ РАН, ТРИНИТИ, ИЯФ СОРАН и др	ЕС
Дистанционное обслуживание	Замена первой стенки, бланкета, дивертора	«ИТЭР-Центр» + ?	ЕС
Экспериментальный бридерный бланкет	TBR ~ 1 (следующая стадия)	НИЦ «Курчатовский институт», АО НИИЭФА, АО НИКИЭТ	

Заключение - миссии

* TRT обеспечивает реализацию всех трёх миссий :

- Адаптация в российскую программу УТС технологий и разработок ИТЭР
 - Дополнительная к ИТЭР технологическая платформа
 - Реализация $Q>1$ в ДТ разрядах
-
- **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
 - Разработка дистанционного управления т/я реактором и роботизация

Заключение - режимы

- $V_t = 8T$ – обеспечивает необходимый запас по q и β – МГД устойчивые и, следовательно, потенциально управляемые стационарные режимы (ток и профили)
- ЭМС позволяет работу ~ 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)
- DT режимы – вполне реальны. Отработка базовых тритиевых технологий, технологий топливного цикла – вписывается в круг задач TRT.

Основные планируемые результаты разработки TRT в 2022–24	
Программа исследований на TRT.	ИТЭР-Центр, НИЦ КИ
Эскизный проект TRT внутри криостата	АО НИИЭФА
Концептуальный проект системы нейтральной инжекции TRT.	ИЯФ СО РАН
Концептуальный проект системы ионного циклотронного нагрева TRT	Конкурс
Концептуальный проект системы электронного циклотронного нагрева TRT	ИПФ РАН
Концептуальный проект диагностического комплекса TRT	ИТЭР-Центр, НИЦ КИ, ФТИ РАН, ИЯФ СО РАН
Разработана концепция системы сбора данных и управления установкой TRT.	ИТЭР-Центр
Разработан Концептуальный проект экспериментального модуля бланкета TRT.	АО НИКИЭТ
<i>НИОКР по созданию ВТСИ сверхпроводников для TRT.</i>	Конкурс
Будет создана кооперация предприятий – разработчиков, изготовителей и поставщиков основных систем Проекта	Все

Основные результаты разработки TRT в 2025–2030 гг

Программа исследований на TRT.

ИТЭР-Центр, НИЦ КИ

Технический проект выполняется в 2025 - 2026 годах.

НИИЭФА, ТРИНИТИ

Изготовлены смонтированы и испытаны в рамках комплекса TRT и на созданных стендах компоненты установки TRT– прототипы для т/я и гибридного реакторов :

ВТСП электромагнитная система, Вакуумная камера

Конкурс

Первая стенка и дивертор

АО НИИЭФА

Система нейтральной инжекции TRT (1 этап).

ИЯФ СО РАН

Система ионного циклотронного нагрева TRT (1 этап)

Конкурс

Система электронного циклотронного нагрева TRT (1 этап)

ИПФ РАН

Пусковая часть диагностического комплекса TRT

ИТЭР-Центр, НИЦ КИ,
ФТИ РАН, ИЯФ СО РАН

Система сбора данных и управления установкой TRT.

ИТЭР-Центр

Прототип экспериментального модуля blankets TRT.

АО НИКИЭТ

В Росатоме создана подотрасль по изготовлению электромагнитных систем из ВТСП (REBSO).

В России создана кооперация научных центров, университетов и предприятий промышленности по созданию термоядерного и гибридного реакторов

Великий путь к новой энергии

ТЯР

ТРТ

ИТЭР

Токамаки

МТР

Спасибо за внимание