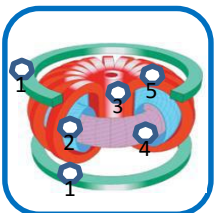




ИТЭР-Центр

От великой идеи
к энергетике будущего



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

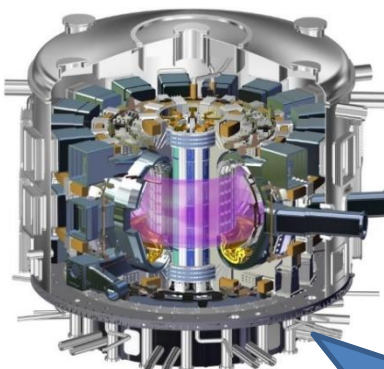
Токамаки

ИАЭ им.И.В.Курчатова,
ФТИ им.А.Ф.Иоффе
1951-наст. время
СССР - Россия

TFTR 1995
11 MBm, США



JET 1997
16 MBm
Европейский Союз



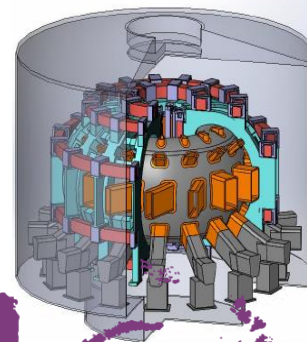
Россия, США, ЕС, Япония,
Китай, Корея, Индия



ИТЭР 2035
500 MBm

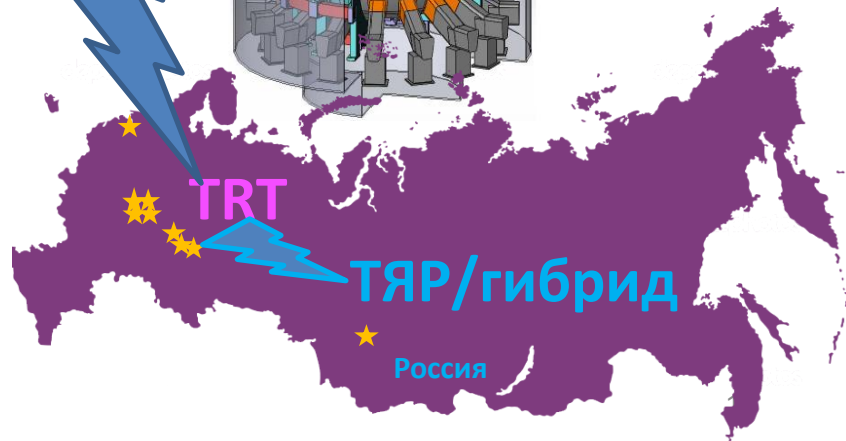
TRT ~2035

Прототип 40 MBm
Россия



**ITER и TRT – технологические платформы
управляемого термоядерного синтеза**

Анатолий Красильников (ИТЭР-Центр)



ФТИ
РАН



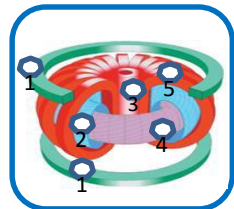
ИЯФ
СО РАН



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.Шафрановым предложена концепция вытянутого сечения с полоидальным дивертором.

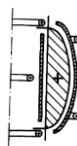


Рис. 2

T-8 1973
T-9 1973

T-12
T-13
ТВД

Вытянутое
поперечное
сечение

Полоидальный
дивертор



Л.А.Арцимович В.Д.Шафранов

ОТР (РФ, 1988)

Термояд в России.
История

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

1955 - 1965

T-3A 1967



T-1 1957
T-2 1959
T-3 1960

T-5 1961, ФТ-1 1965

ТМ-1
ТМ-2 1962
ТМ-3 1965



ТМП - 1955

1967 - 2021

T-10, 1975



T-7 (NbTi)
1979



T-15 (Nb₃Sn) 1988

ТМГ 1982

ТСП 1987



T-11M 1983

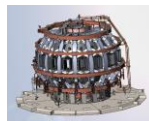
Гибридный
термоядерный
реактор (1978)



Глобус-М 1999
Глобус-М2 2020
КТМ

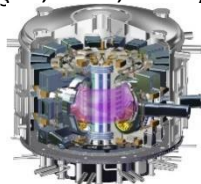
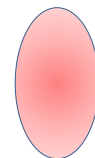


T-15МД
2021

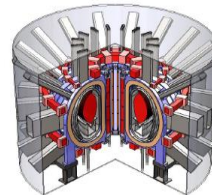


INTOR (1980)

ITER (Nb₃Sn, NbTi, 1985)

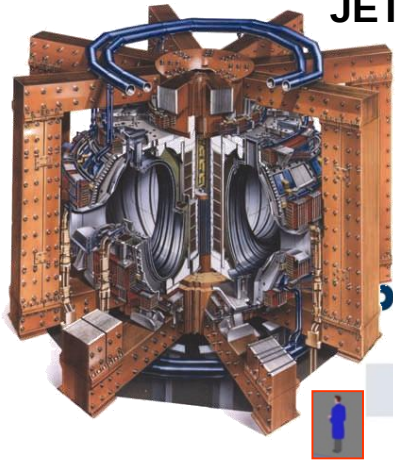


TRT (REBCO) 2020

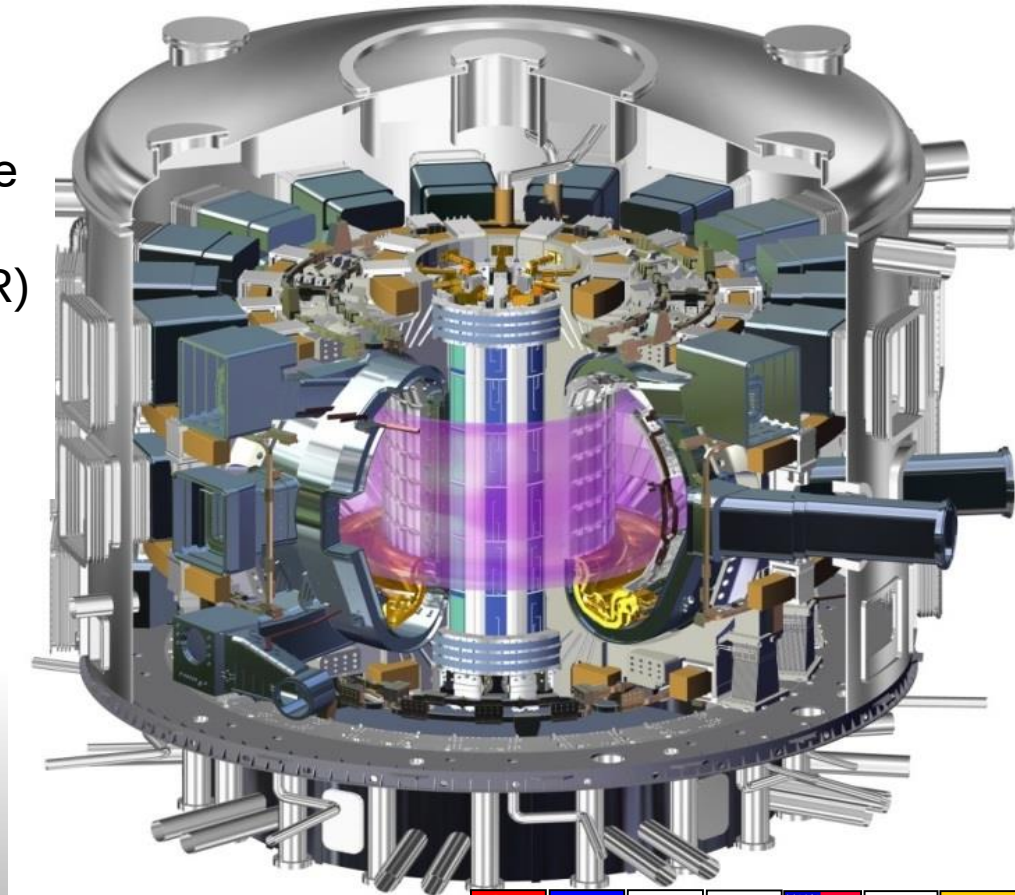
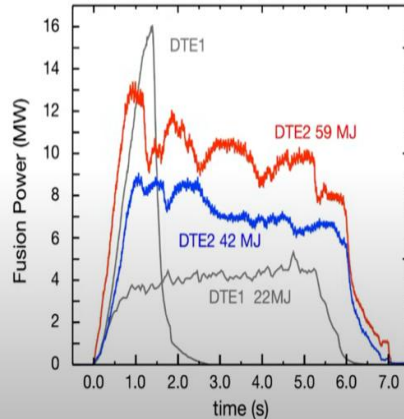


Достижения термоядерных исследований

JET:



Крупнейшие в мире
токамаки
произвели 11 (TFTR)
и 16 МВт (JET)
термоядерной
мощности



Технологическая платформа ITER

Внутренняя стенка
(опция W + $\text{W}/\text{B}_4\text{C}$ покрытие +
(боронизация в GLD + B dropper)/
 B_4C покрытие в разряде ITER)

экспериментальные
модули бриддерного
бланкета

криостат,
крионасосы,
криогенный комплекс

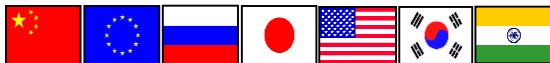
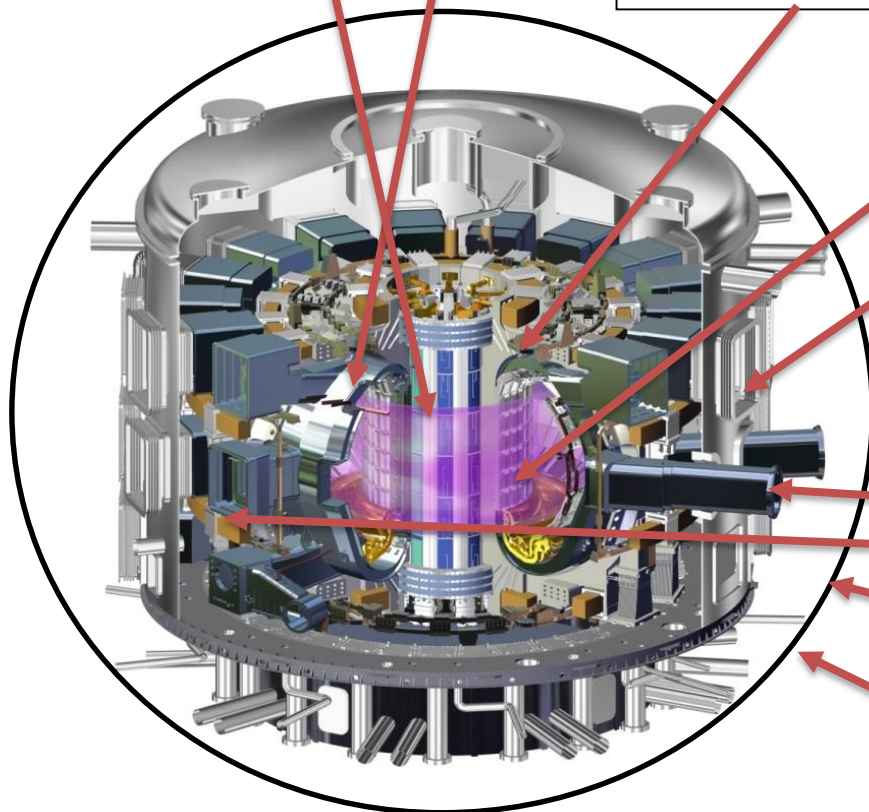
системы нагрева и
безиндукционной
генерации тока:
Инжекторы атомов,
ЭЦН, ИЦН

системы управления

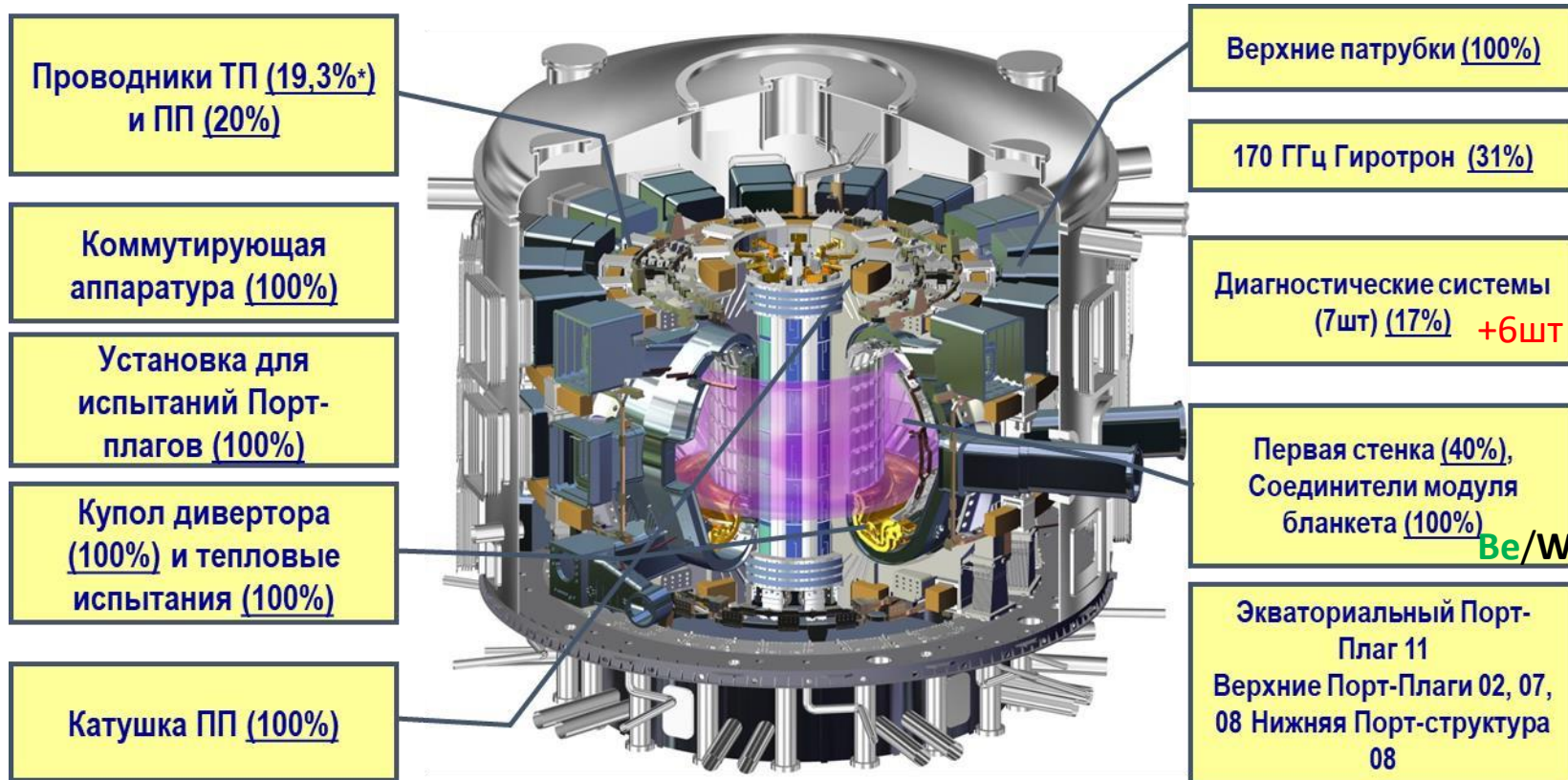
реакторосовместимые диагностики
системы сбора и дистанционной
обработки данных

Nb-Ti катушки
полоидального поля (PFC)

Nb_3Sn катушки тороидального поля (TFC)
и центрального соленоида (CS)



Вклад России – 23 (+6) системы будущей установки



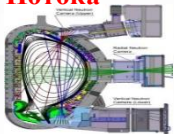


Диагностики ИТЭР, создаваемые в России



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**



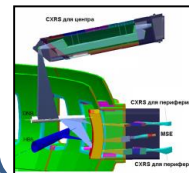
Full scale prototype
of in-vessel optics Laser 2J / 100Hz

Spectroscopy equipment:
Polychromator 5-200 eV
Polychromator 0.3-200 eV

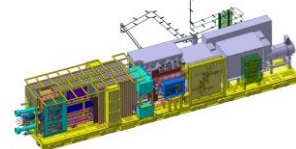
• Laser systems:
Nd:YAG 1.0645μm (2 J, 3 ns, 50Hz)
Nd:YLF laser 1.047 μm (2 J, 10 ns, 5Hz)
Nd:YAG laser 0.946μm (0.1J, 10ns, 100Hz)

Оптические

CXRS



Н-альфа спектроскопия



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

Анализаторы атомов перезарядки (NPA)



Два NPAs:

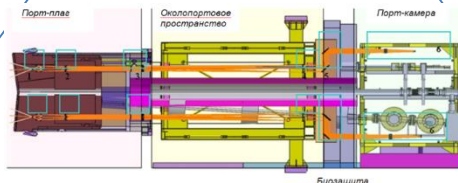
HENPA (0.2 – 2 MeV),
LENPA (10 – 200 keV)

и Алмазный спектрометр быстрых
атомов (0.04 – 8 MeV)

и нейтронов, **гамма-спектрометр**

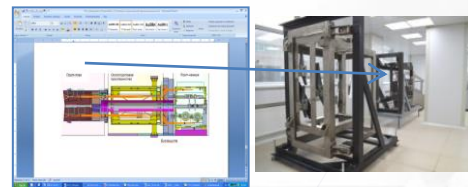
**Диагностика
плазмы**

Порт-плаги



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

Reflectometry



От 12 до 140 ГГц

13 Диагностика ИТЭР создаётся в России !!!



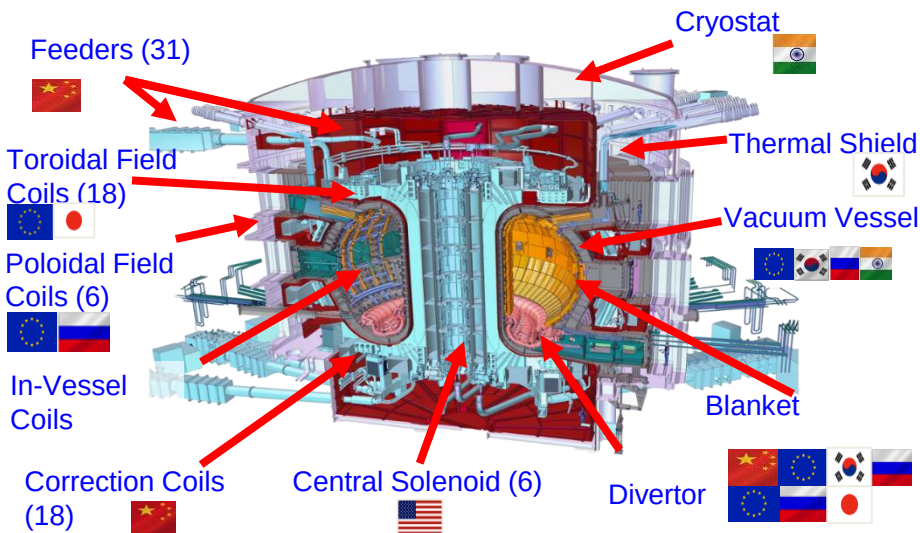
КРИОГЕНМАШ

Основные поставщики

 Госзаказчик	
	
	   JSC "GYKOM"
	АО "НИИТФА" "Луч" АО "ВНИИА"
	 КРИОГЕНМАШ
	 АО "ГКМП"
	  АО «ПСЗ»
	

Более 30 основных поставщиков

ИТЭР – технологическая платформа мировой термоядерной энергетики



Технология ИТЭР	Участие России
Электромагнитная система из низкотемпературных сверхпроводников (TFC & CS - Nb ₃ Sn, PFC – Nb-Ti)	Создано производство Nb ₃ Sn и Nb-Ti сверхпроводников
Первая стенка – Be (W + В покрытие (боронизация GLD + В dropper))	Начато изготовл. Be первой стенки Начато изготовл. В ₄ C покрытий на W Эксперименты по борониз. в разряде
W дивертор с напуском Ne	Начато изготовление W дивертора
Криостат, крионасосы, криог. комплекс	- (право на безвозмездные лицензии)
Нагрев и безиндукцион. генерац. тока	Изготовлено 8 гиротронов ИТЭР
Реакторосовместим. диагностики, сбор и дистанц.обrab. данных и управление	Создание 7+6 диагн.и сист.сбора дан. Создание центра удалённого участия
Эксперим. модули бридерн. blankets	- (нет права на безвозмезд. лиценз.)
Квазистационарный разряд (500 – 3600 сек) термоядерной плазмы с Q=10.	Участие в матмоделировании и проведении экспериментов ИТЭР

Россия получит право на безвозмездные лицензии на все технологии, созданные в рамках Проекта ИТЭР

Но! В Проект ИТЭР включены не все

требуемые реактору термоядерные технологии:

Li первая стенка, генерация стационарного тока,

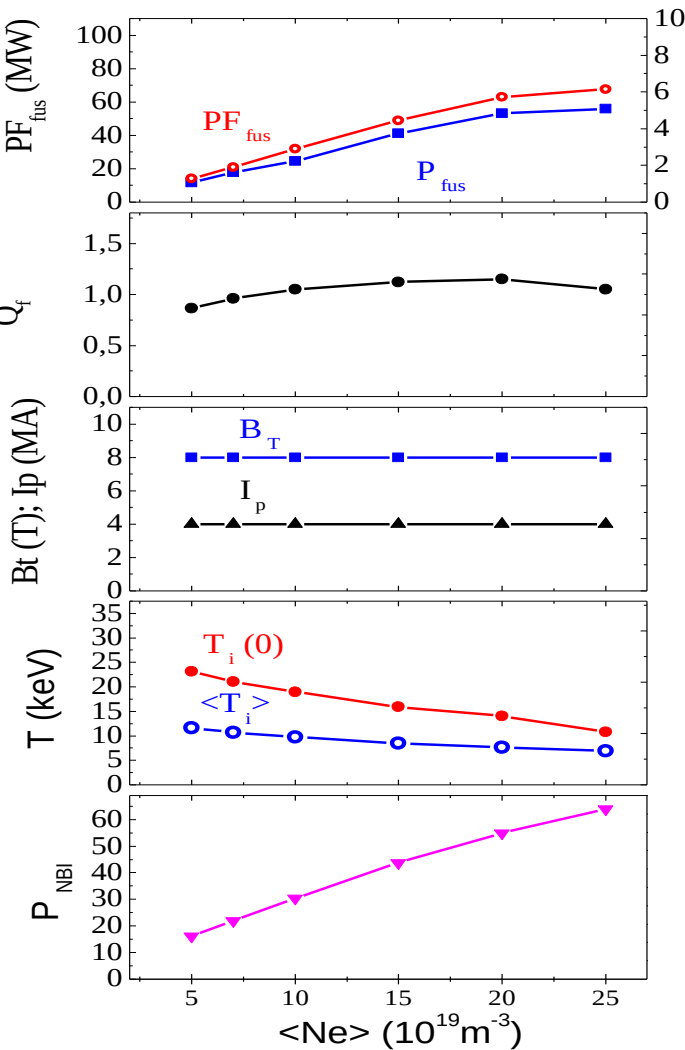
гибридный blanket, ВТСП катушки, испытания материалов т/я реактора

Поэтому

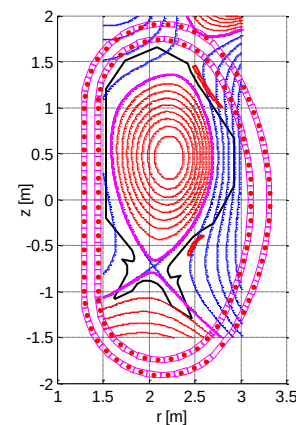
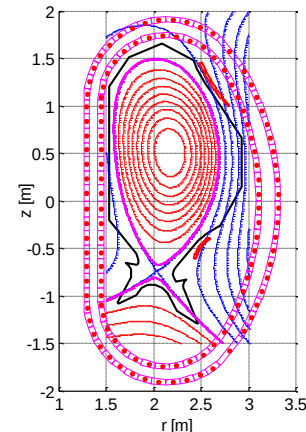
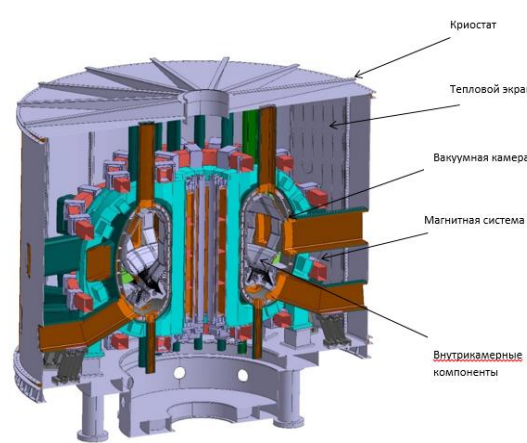
Токамак

с Реакторными

Технологиями (TRT)

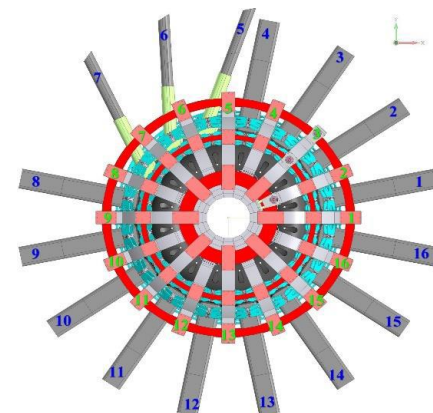


Частным учреждением ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР» в кооперации с ведущими специалистами АО НИИЭФА, НИЦ «Курчатовский институт» по заказу ГК Росатом в 2021-2022 годах разработан концептуальный проект TRT



$Q \sim 1$ примерно во всем рассмотренном диапазоне плотности $0.5 < n_{e20} < 2.5$ и мощности дополнительного нагрева $15 \text{ MWt} < P_{aux} < 60 \text{ MWt}$.

Опубликован в специальных номерах журнала «Физика плазмы» (№11 и №12 в 2021 и №8 и №12 в 2022 году)



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	Реакторосовместимые стационарные системы дополнительного нагрева и генерации тока
Q (DT)	> 1	Реакторная плазма

TRT разрабатывается:

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

Миссии и технологическая платформа TRT состоят в:

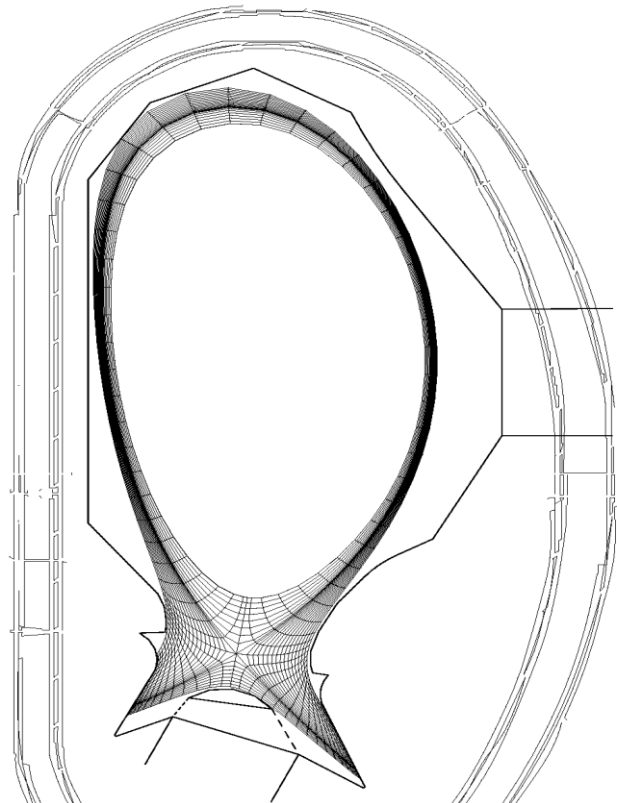
- разработке и интеграции в одной установке ключевых инновационных термоядерных технологий (создание дополнительной к ИТЭР технологической платформы TRT):
 - ВТСП электромагнитной системы, работающей при высоком (8Т на оси плазмы) магнитном поле;
 - металлической, В₄С и литиевой жидкометаллической первой стенки;
 - инновационного дивертора;
 - системы инъекции атомов с энергией 0.5 МэВ и мощностью до 25 МВт;
 - мегаваттных квазистационарных ($t > 100$ с) гиротронов с част. 230 ГГц,
 - ИЦН на частотах 60-80 МГц мощностью несколько МВт;
 - системы неиндуктивной генерации тока;
 - тритиевого комплекса;
 - совместимых с термоядерным реактором диагностик;
 - технологии дистанционного управления;
 - 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.

ВТСП ЭМС

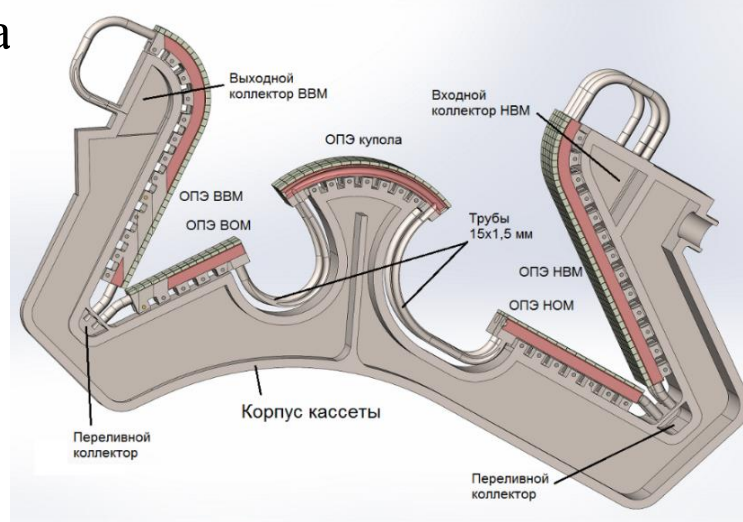
Разработка,
создание,
стационарная эксплуатация

МЕГА-размерной ВТСП (REBCO) электромагнитной системы токамака TRT
с высоким (8Т на оси плазмы) магнитным полем

Общий вид первой стенки и дивертора в начале работы TRT



ДИВ#1 и ДИВ#2 – катушки
для качания сепаратриссы на +/- 75 мм с частотой 1 Гц



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

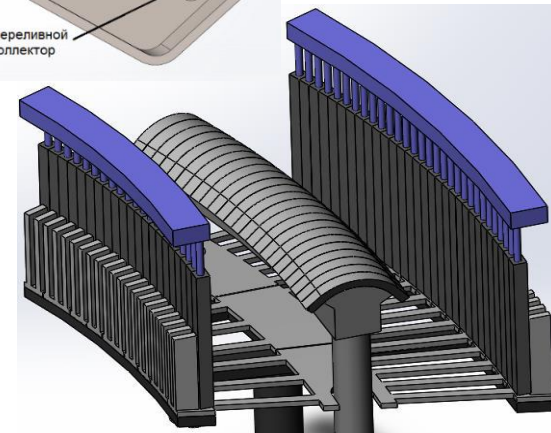


Рис 5. Модели “традиционного” (слева) и
варианта TRT дивертора с качающимися
вертикальными пластинами (справа).

Режимы работы «традиционного» дивертора TRT

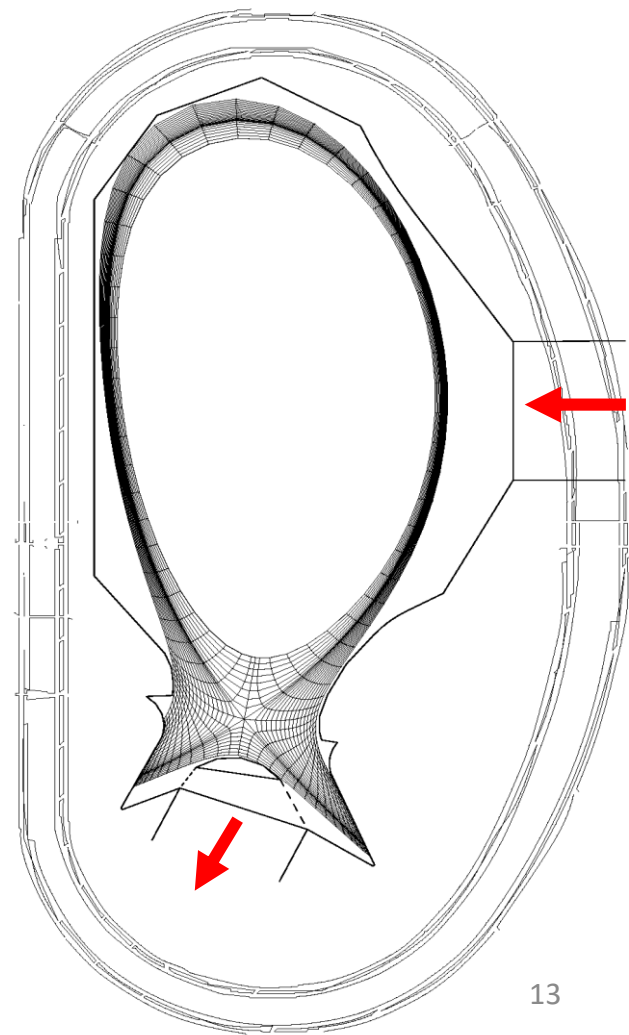
Моделирования SOLPS4.3 показало:

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).

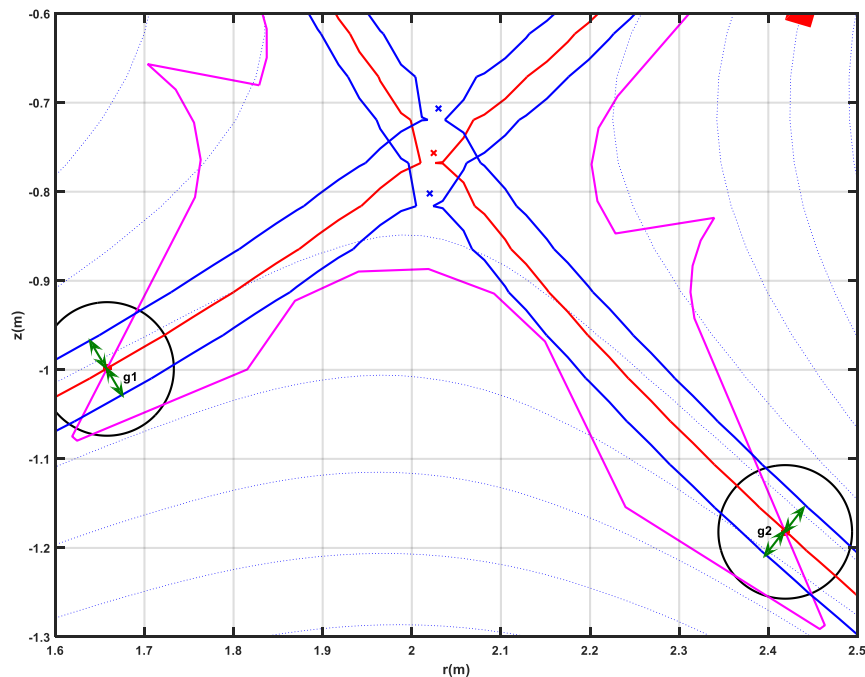
Рекомендации – понизить ток и/или плотность и/или доп. нагрев плазмы.

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 !

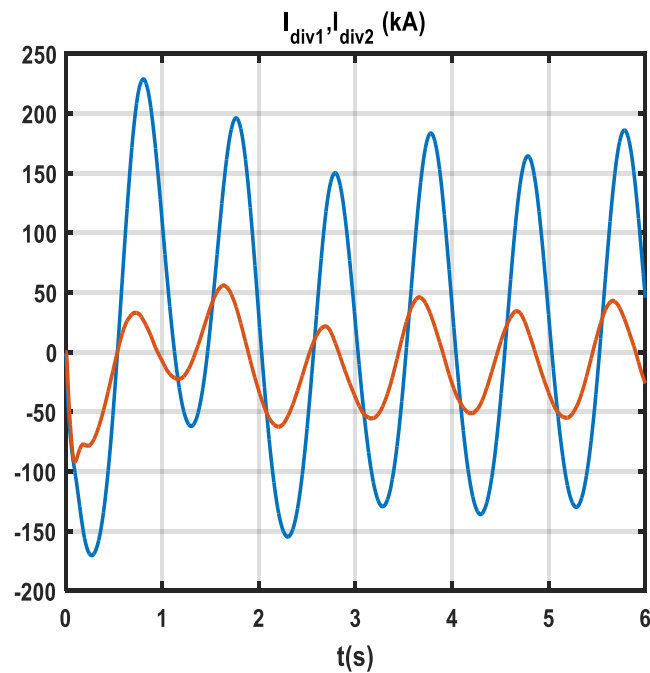
(А.С.Кукушкин и др: «Физика плазмы №12, 2021)



Качание сепаратрисы в TRT (И.В.Мазуль и др.)



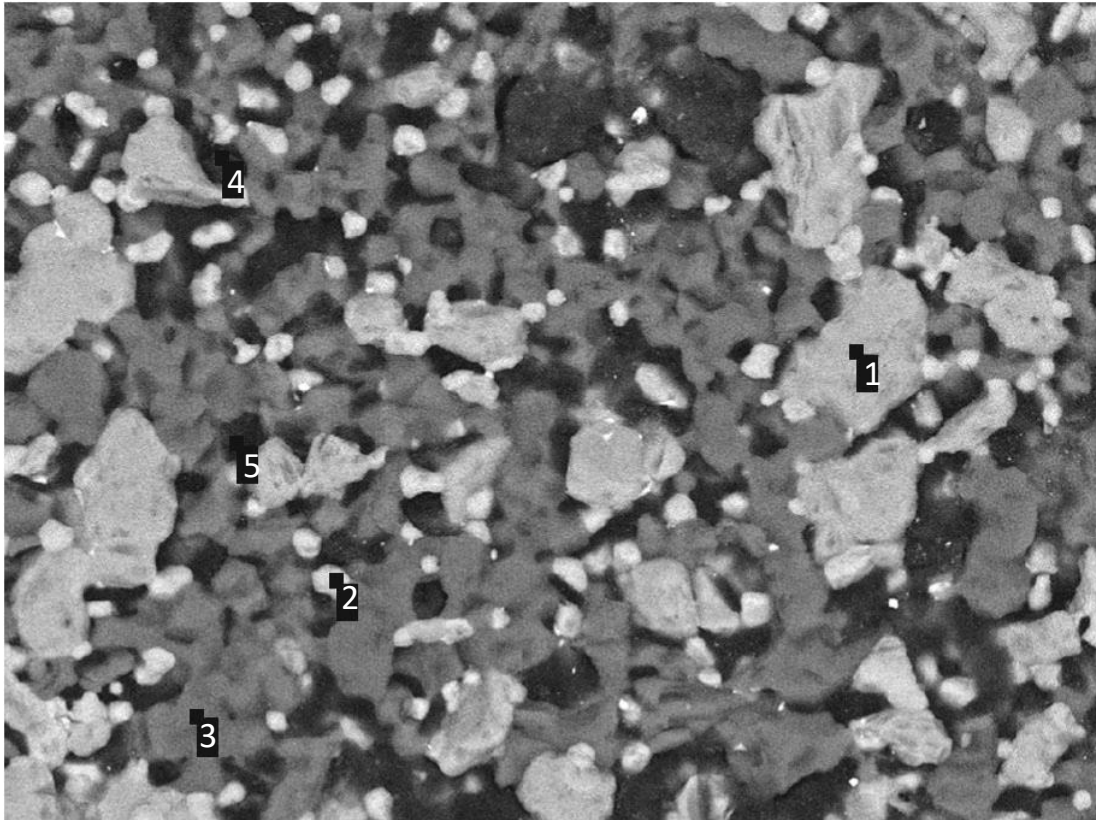
Ветви сепаратрисы для базовой конфигурации (красный цвет) и ветви сепаратрисы (синий цвет), смещенные на величины $d_{sep} \approx \pm 75$ мм с частотой $f_{sep} = 1$ Гц, $g1, g2$ – управляемые параметры для качания ветвей.



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

Таблица 1. Основные свойства рассматриваемых материалов первой стенки

	Мет.	Мет.	Мет + покрыт		Керамика		Композит	
	Be	W	W + B	W + B ₄ C	AlN	TiB ₂	TiB ₂ -AlN [6] TiB ₂ -AlN-Al [7]	TiB ₂ -AlN-BN-TiN [8]
Z	4	74	74 + 5	74 + 5/6	13/7	5/22	5/7/13/22	5/7/13/22
Плотн. г*см ⁻³ (%соотн)	1.85	19.3	2.34	2.52	3.255	4.52	3.5 (40/60) [6] (95/5 CVD) [9] (28/65/7(Al)) [7]	3.5 (36/54/4/6)
T _{плав} , К	1551	3695	2348	2620	2770	3498	2770 / 3498	2770 / 3498
Тепло- провод. Вт/(мК)	200	174	27 (300К)	121 (300К) 62 (970К)	>170 (керам)	66 (293К) 80 (1200К) 30(273К) [6]	135(273К) – 70(600К) [6] 149 (CVD) [9] 170-230 (300К)	
Элект. резист. нОм*м	36	53	~10 ¹³	8*10 ⁵ (500С)	~10 ²⁰	90-140	2(293К)-9(1200К) *10 ³ (28/ 65/7(Al)) [7]	7(293К)-15(1200К) *10 ³ (36/ 54/4/6)
К лин расш, К ⁻¹ *10 ⁻⁶					5.3/4.2 анизатроп.	5.9-9.2 (300-1300К)		
Поглощ. трения / перепылен.			?	? / ?	? / ?	? / ?	? / ?	? / ?
Особен- ность					Порист.~ 20-25%[6]	Окисл, при Т>1273К Большие гранулы, порис.~10%	TiB ₂ гранулы в AlN матрице Снижен размер TiB ₂ гранул, Снижение порист до 5-1%, Снижение окисления	



100 μm

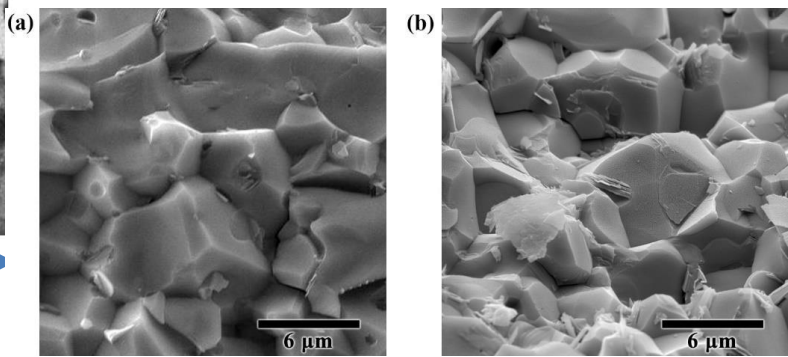
Microstructure of the TiB₂-AlN-BN-TiN (29/40/18/13%, 7.6% porous) energy dispersion analysis (EDS) data.

TiB₂ d=10-15μm grains in AlN matrix (<10μm). TiN and BN are smaller (3-6 μm)

TiB₂-AlN-BN-TiN composite structure

point	B	N	Al	Ti	Phase
1	40.2	0	0.5	59.3	TiB ₂
2	0	33.4	4.7	61.9	TiN
3	0	39.8	59.4	0.8	AlN
4	52.1	37.6	9.2	1.1	BN

SEM fractographs (SE mode) of (a) monolithic TiB₂ and (b) TiB₂-AlN (5%) ceramics.



5% of AlN diminish TiB₂ grain size from 9.2 to 5 μm And porous from 10 down to ~1%

Разработка технологий изготовления металлических (**Be** или **W**, **нерж.ст.**, **сплав W-Mo, ...**) элементов первой стенки TRT (и для ITER) с покрытием из материалов с низким Z (**B₄C, B**) и анализ керамик и композитов (**TiB₂, AlN, Be₁₂Ti, TiB₂-AlN-BN, ...**) и исследование их свойств

I. Покрытие материалом с низким Z

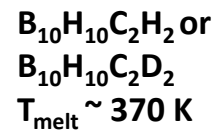
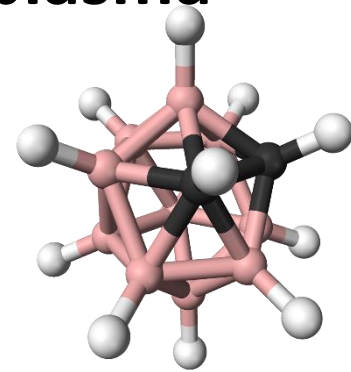
Требования к покрытиям в условиях первой стенки реактора:

- Низкое Z
- Высокая температура плавления;
- Низкое распыление;
- Хорошая адгезия;
- Низкое сорбирование водорода;
- Высокая теплопроводность
- Высокая электропроводность
- Скорость изготовления

Method of manufacture (B ₄ C foil, composite) / study of characteristics	Manufacture / Researcher	Coverage/ Composit parameters	Test results	Plans
Atmospheric plasma spray (APS)	ITAM SB RAS (Novosibirsk)	+ 50 mcm B ₄ C		
Electron beam evaporation	ISE SB RAS (Tomsk)	+ 50 mcm B ₄ C		
Magnetron evaporation	ISE SB RAS (Tomsk)			
CVD from plasma discharge	Verial (S-Petersburg)			
Detonation spray (DS)	Institute of Hidrodinamics SB RAS	+/- 6 mcm B ₄ C		
Самораспространяющийся высокотемпературный синтез	ISM RAS (Chernogolovka)	TiB ₂ -AlN		
study of characteristics	INP SB RAS Efremov Institute SRC TRINITI		+ B ₄ C (APS,DS) + B ₄ C (APS,DS) + B ₄ C (APS,DS)	EAST KSTAR
Ceramics and Composite analysis (TiB ₂ , AlN, Be ₁₂ Ti, TiB ₂ -AlN-BN, ...)				

II. Боронизация/Бериллизация/Литиезация первой стенки в процессе разряда(разработка и реализация)

Restoration of B₄C coverage during ITER discharge using Carborane (B₁₀H₁₀C₂H₂) steam puff into ITER plasma



- Carborane non toxic, not detonating, not burning steam
- Carborane steam sublimates from volume with solid Carborane to tokamak at temperature 300-450 K
- Energy of plasma electrons is enough (>few tens of eV) to destroy B₁₀H₁₀C₂H₂ molecules totally, further B and C are depositing on FW in the form of B₄C crystals without porous.
- Very successful B₄C coverage at T-11M and T-10 tokamaks and PISCES (US). Coverage rate ~1 mcm/min.
- The technology of during plasma shot B₄C coverage using Carborane could be further developed and tested at big tokamaks like EAST and KSTAR. Technology and required equipment could be developed and manufactured by RF DA
- Plasma spray equipment could be considered to be used inside ITER VV for B₄C coverage restoration during ITER shutdown

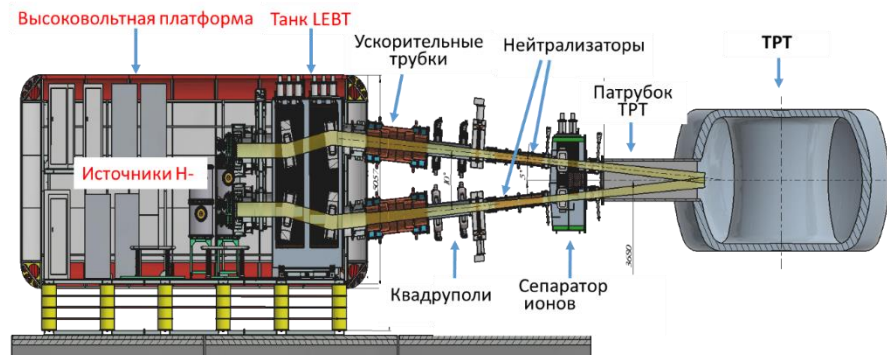
Стратегическое направление в проблеме ПС: Li

- Концепция, включающая **стабилизацию поверхности жидкого металла с помощью КПС**, имеет существенные преимущества и должна быть положена в основу базовой концепции литиевого варианта первой стенки TRT.
- Элементы первой стенки, испытывающие воздействие тепловых потоков до 1МВт/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 10МВт/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)

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).

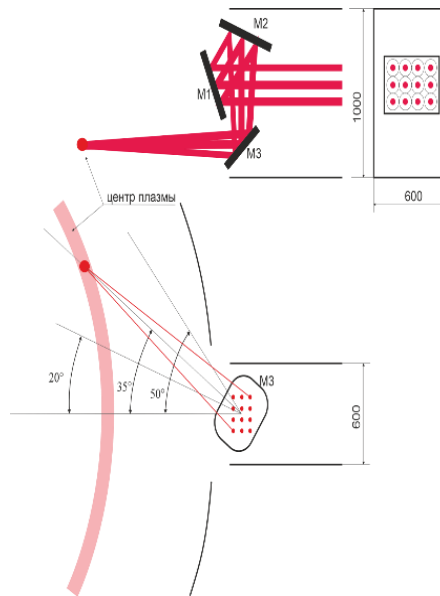
(Ю.И.Бельченко и др: «Физика плазмы №11, 2021)

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%.

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

10 МВт, >100 с ЭЦР, 230 ГГц
~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 предложенной В.Л.Вдовиным несколько-мегаваттной 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)

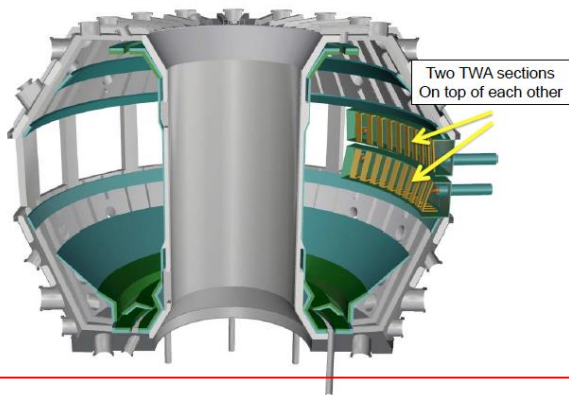
Внеосевая генерация тока геликонными волнами с применением Антенны бегущей волны на токамаках D-IIID и KSTAR предложена В.Л.Вдовиным



*** Следующий шаг***

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

Proposal for TWA in T15-MD: inside view



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 Т-15МД Геликонными волнами разрабатывается в

НИЦ «Курчатовский институт совместно с ФТИ РАН и АО НИИЭФА

Диагностический комплекс TRT



1 Зонды и ЭМ диагностика

2 СВЧ диагностики (рефлектометрия, рефрактометрия, ЭЦ излучение)

3 Оптические диагностики (обзорная спектроскопия, примеси, H_a -монитор, Томсоновское рассеяние, Активная спектроскопия, MSE)

4 Диагностики радиационных потерь (болометрия + вуф + мягкий рентген)

5 Корпускулярные диагностики (анализаторы атомов, нейтронные диагностики, гамма диагностика)

6 Диагностический инжектор атомов

Управление плазмой и установкой TRT

с разработкой и реализацией продвинутых сценариев

- Управление квазистационарной термоядерной плазмой:
 - составом (H , D , T , 3He , 4He , примеси);
 - профилями (n_e , T_e , тока, вращения, ввода мощности нагрева, быстрых ионов);
 - транспортными барьерами;
 - развитием и стабилизацией неустойчивостей;
 - разработка продвинутых сценариев
 - ...
- Управление установкой:
 1. Центральная система управления установкой (включая разработку ПО)
 2. Локальные вычислительные сети для обмена данными, синхронизации и взаимодействия систем
 3. Система хранения данных (долгосрочное и оперативное хранилище с резервированием)
 4. Система обработки данных, моделирования и подготовки импульса
 5. Центральная пультовая установки (включая средства коллективного и удалённого доступа и визуализации данных)
 6. Развитие удалённого участия в работе
- ...

Разработка, создание и испытания прототипов экспериментальных модулей blankets

- Наработка трития,
- прототипы систем гибридного blankets

Миссии TRT

* 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 должна обеспечить 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 бланкета
 - Разработка технологий тритиевого топливного цикла
 - Разработка дистанционного управления т/я реактором и роботизация

Технологическая платформа TRT

ВТСП ЭМС, работающая при высоком (8Т на оси плазмы) магнитном поле

Металлическая с покрытием с низким Z / Композит с низким Z и литиевая жидкометаллическая первая стенка

Инновационная система инъекции атомов с энергией 0.5 МэВ и суммарной мощностью до 25 МВт

инновационный дивертор

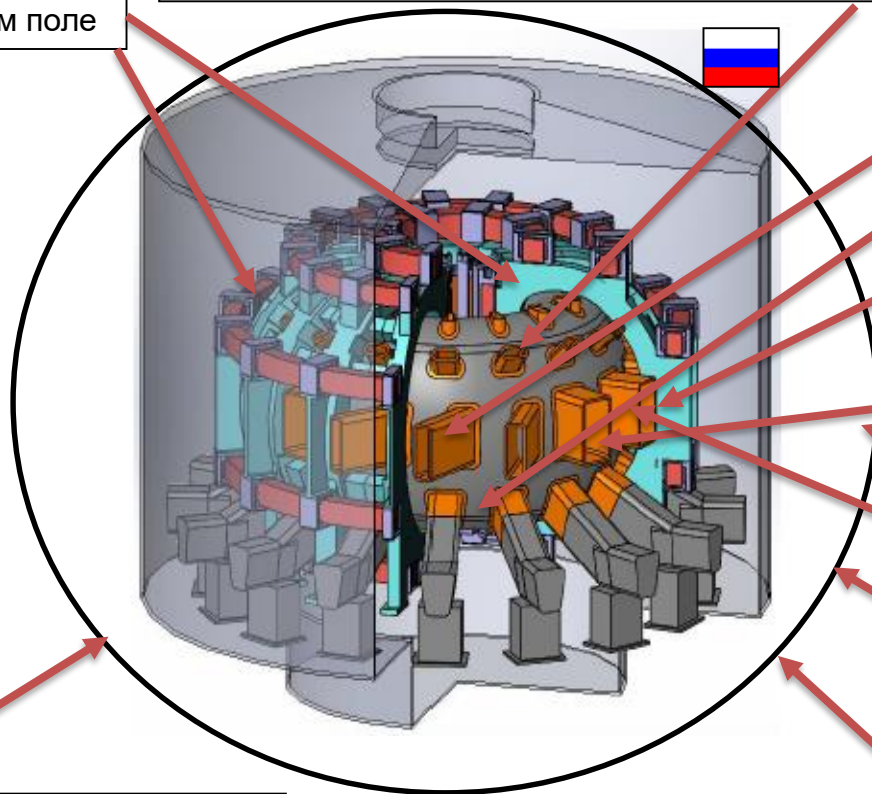
Мегаваттные квазистационарные ($t > 100$ с) гиротроны с частотой 230 ГГц

Инновационные системы ИЦН на частотах 60-80 МГц мощностью несколько МВт и неиндуктивной генерации тока геликонами

тритиевый комплекс

Экспериментальные модули бридерного и гибридного blankets

технологии дистанционного управления



совместимые с термоядерным реактором диагностики

технологии поддержания квазистационарных разрядов в плазме с термоядерными параметрами



Заключение: Термоядерные технологические платформы ИТЭР и TRT

Технологии термоядерного реактора	Термоядерные технологии ИТЭР	Технологии TRT (*Следующего шага*)
Вакуумная камера	Двустенная с водяным охлаждением	- // -
Электромагнитная система	Nb ₃ Sn & Nb-Ti ЛТСП C/C ВТСП – Токовводы	Nb ₃ Sn – повышение плотности тока ВТСП - катушки
Первая стенка	Be (W+ В/В ₄ С покрытие? + боронизация?)	Be (W? + В ₄ С покрытие? + боронизация?) (Композит с низким Z) Жидкий Li (анализируются альтернативы)
Дивертор	W	W? + В ₄ С покрытие? + боронизация? Композит с низким Z? Жидкий Li
Модули blankets	TBM для наработки трития	Наработка трития, прототипы гибридного blankets
Инжекция атомов	1 МэВ, 1000с, 16 МВт, обдирка в газе	Фотонная или плазменная обдирка, сдвиг источника с оси ускорителя
Электрон. циклотронный нагрев	170 ГГц, 1000 с, 1 МВт	230 ГГц, 1000 с, 1 МВт
Ионный Циклотронный Нагрев	40-55 МГц, 10-20 МВт	Антенна бегущей волны
Генерация стационарного тока	NBI, ECCD низкая эффективность	Геликоны (сильный внеосевой CD)
Диагностика	> 55 диагностик ИТЭР	Совместимость с реактором
Дистанционное управление	Дистанционные управление и CAD	Развитие удалённого участия в работе
Интегральное управление	Магнитное и кинетическое	- // - + Генерация тока и др.
Системы подавления неустойчивостей	Инжекция крупинки	Разработка продвинутых сценариев

Заключение

- Технологические платформы **сооружаемого ITER** и **проектируемого TRT** вместе содержат практически полный, по современным представлениям, набор технологий, требуемых для реализации **будущего термоядерного реактора**.
- Особую важность для термоядерного реактора в проектах ITER и TRT представляет **разработка и испытание комплексов плазменных технологий и реакторных компонентов и материалов** в обеспечение: **термоядерного зажигания и горения**, **генерации стационарного неиндуктивного тока** и **стационарного взаимодействия термоядерной плазмы с первой стенкой и дивертором** токамака реактора.
- Создание и экспериментальная эксплуатация технологических платформ **ITER** и **TRT**, **с учётом опыта реализации других крупных термоядерных экспериментов партнёров по ITER**, позволит на следующем шаге реализовать сооружение как чистого термоядерного, так и гибридного (синтез-деление) реактора.
- Крайне целесообразно международное сотрудничество (WEST, ASDEX-U, JET, EAST, RSTAR, SPARC, **BEST**, CFETR etc.)

Спасибо за внимание