



ТОКАМАК Т-15МД – на пути создания гибридного реактора

П.П. Хвостенко

НИЦ «Курчатовский институт»



ПЛАН ДОКЛАДА

- 1. Курчатовский институт – родина токамаков, основополагающих научных и технологических решений**
- 2. Комиссия НИЦ КИ и Росатома – пути развития УТС**
- 3. Токамак Т-15МД (ТИН-0) – первый шаг на пути создания гибридного реактора**
- 4. Статус токамака Т-15МД**
- 5. Программа научных исследований**
- 6. Стратегия и дорожная карта развития УТС в России**



История управляемого термоядерного синтеза зародилась в стенах Курчатовского института, как и название "токамак", ставшее интернациональным во всем мире.

Июль 1950

Письмо сержанта Олега Лаврентьева в Центральный Комитет Коммунистической партии Советского Союза с предложением о создании термоядерного реактора с электростатическим удержанием



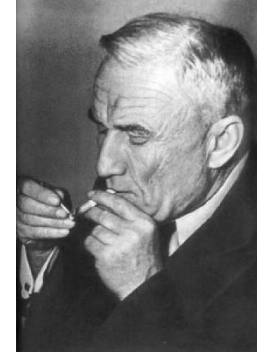
О.А. Лаврентьев

Январь 1951

Утверждение идеи А. Д. Сахарова и И. Е. Тамма о тороидальном термоядерном реакторе с магнитным удержанием



А.Д. Сахаров



И.Е. Тамм

Формирование научно-исследовательской программы по термоядерному синтезу в Курчатевском институте



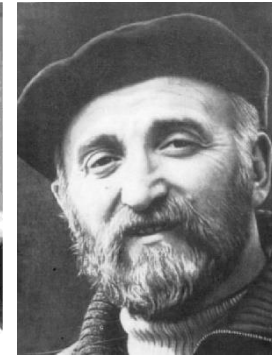
Л.А. Арцимович



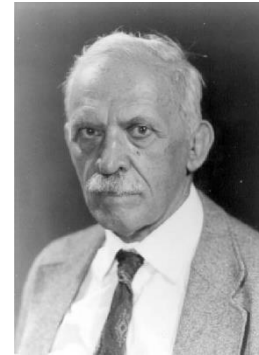
М.А. Леонтович



Б.Б. Кадомцев



Г.И. Будкер



И.Н. Головин

Первый
Заместитель
И.В. Курчатова

ТОКАМАК



ТОроидальная КАмера с МАгнитными КАтушками



ИСТОРИЧЕСКАЯ ХРОНОЛОГИЯ РАЗВИТИЯ УТС



Эра
И. В. Курчатова



Эра
А.П. Александрова



Е.П. Велихов



М.В. Ковальчук

Новая Эра- Гибридный реактор

1954

1960

1970

1980

1988

2005

2020

TMP
80 cm
13 cm
1.5 T
260 kA

T-1
T-2
T-3

T-3A
T-5
TM-1
TM-2

Было построено 21 токамак

TM-1BЧ передан в Чехословакию
TM-4 передан в Сухуми (ТМИ)
T-6 модернизирован в T-11
ТО-1, ТО-2
T-8, T-9
ТМГ; T-12 (дивертор)
ТВ-1 передан в Бешкек (ТФ-2)
T-13
ТВД передан в Иран
T-10;
T-7 передан в Китай (HT-7)

T-15

ИТЭР -2026

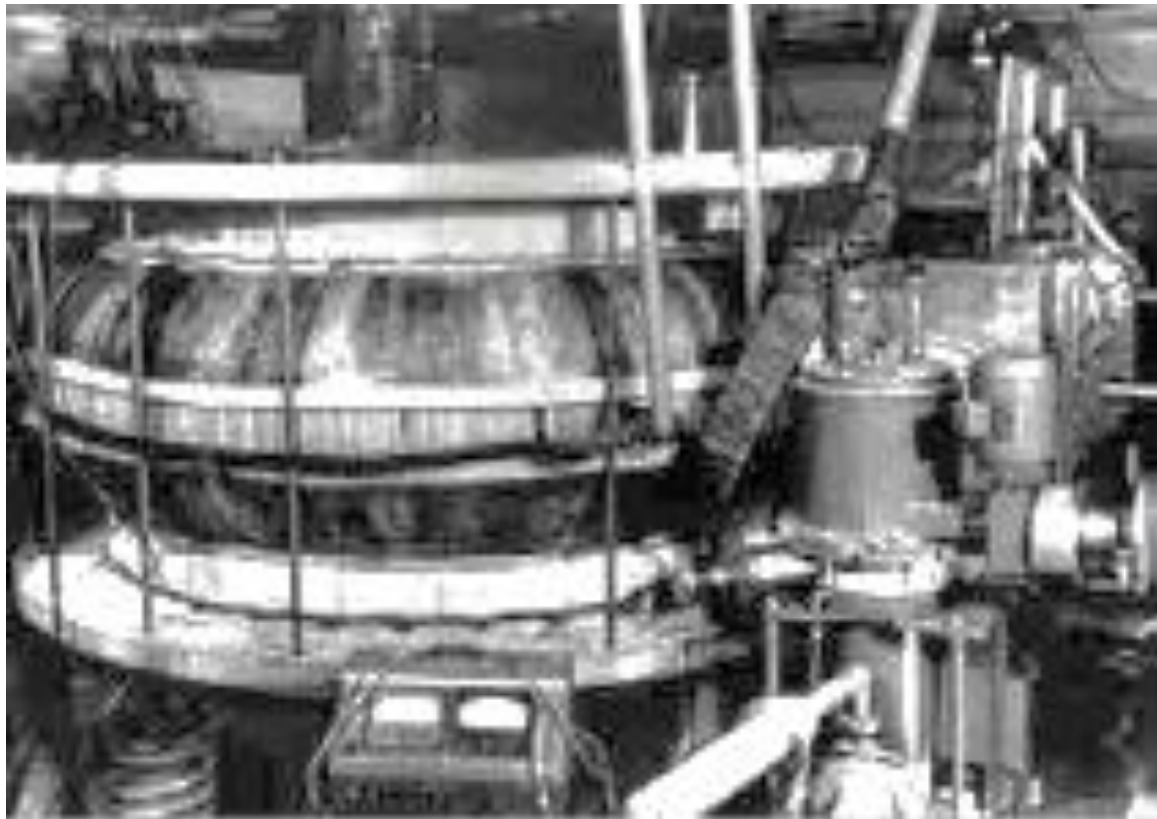
T-15МД-2021

Национальная программа
УТС РФ

До 1969 года токамаки строились исключительно в СССР



Первый в мире токамак Т-1 (1957-1959 гг.)



Параметр	Величина
Большой радиус, м	0.63
Малый радиус, м	0.13
Тороидальное поле, Т	1.0
Ток плазмы, МА	0.04

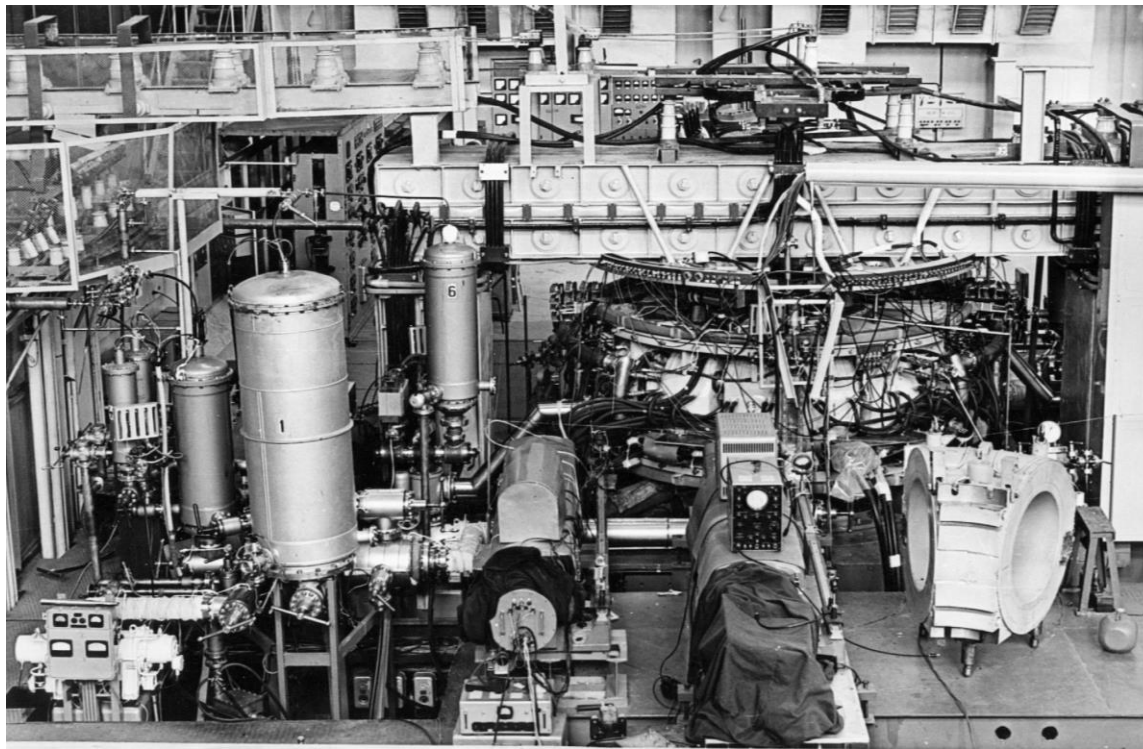
Первая тороидальная установка, получившая название «Токамак».

Не прогреваемая вакуумная камера внутри медного кожуха.

Макроскопическая устойчивость плазмы, $q > 1$. Показано, что излучение примесей в плазме является одним из основных каналов потерь энергии



Токамак Т-3 (позднее ТЗА) – 1961-1970гг.



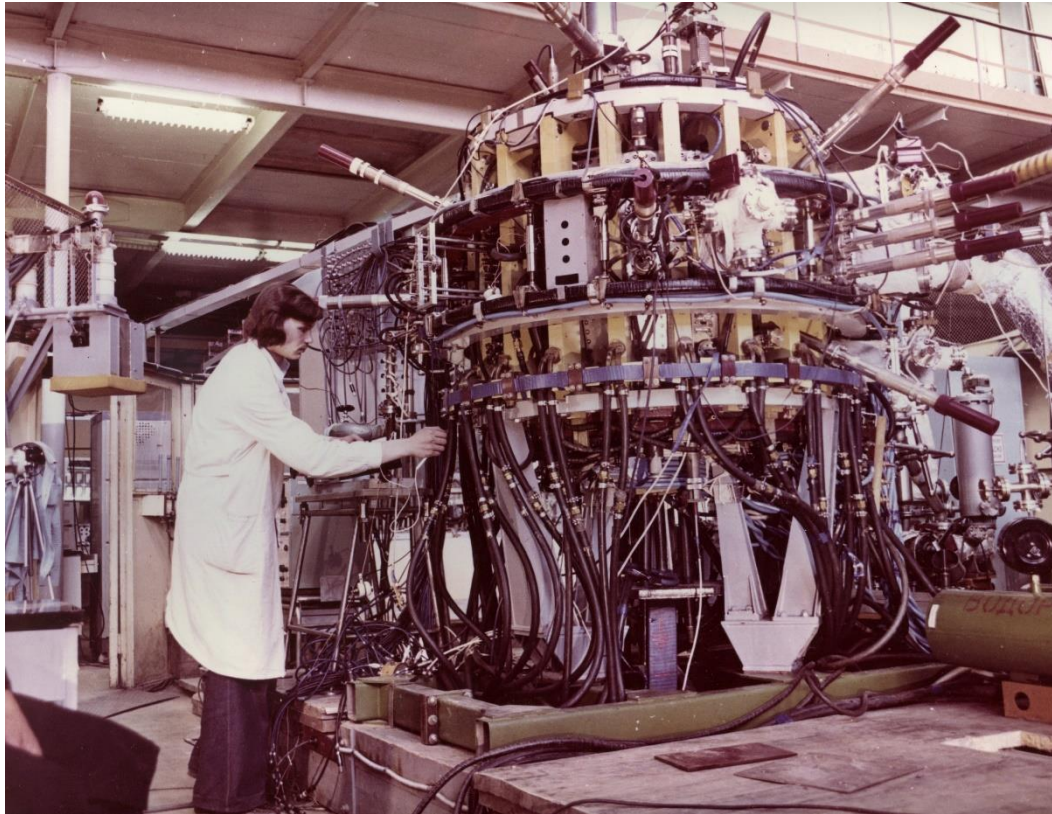
Параметр	Величина
Большой радиус, м	1.0
Малый радиус, м	0.12
Тороидальное поле, Т	3.8
Ток плазмы, МА	0.14

Впервые показана справедливость теории токамака путем достижения температуры плазмы **10 миллионов градусов или 1 кэВ** (Результаты были подтверждены английскими физиками с помощью диагностики томсоновского рассеяния).

Впервые в мире в 1969 г. были зарегистрированы термоядерные нейтроны. После международного симпозиума по тороидальным системам (г. Дубна, сентябрь 1969 г.), который прошел под знаком полного триумфа токамаков, в мире начался «токамачный бум».



Токамаки Т-8, Т-9, Т-12 (1972-1979 гг.)



Т-8, Т-9 — первые в мире токамаки с вытянутым поперечным сечением перстенькового вида (1972 г.) и эффективной системой стабилизации вертикальной неустойчивости плазмы.

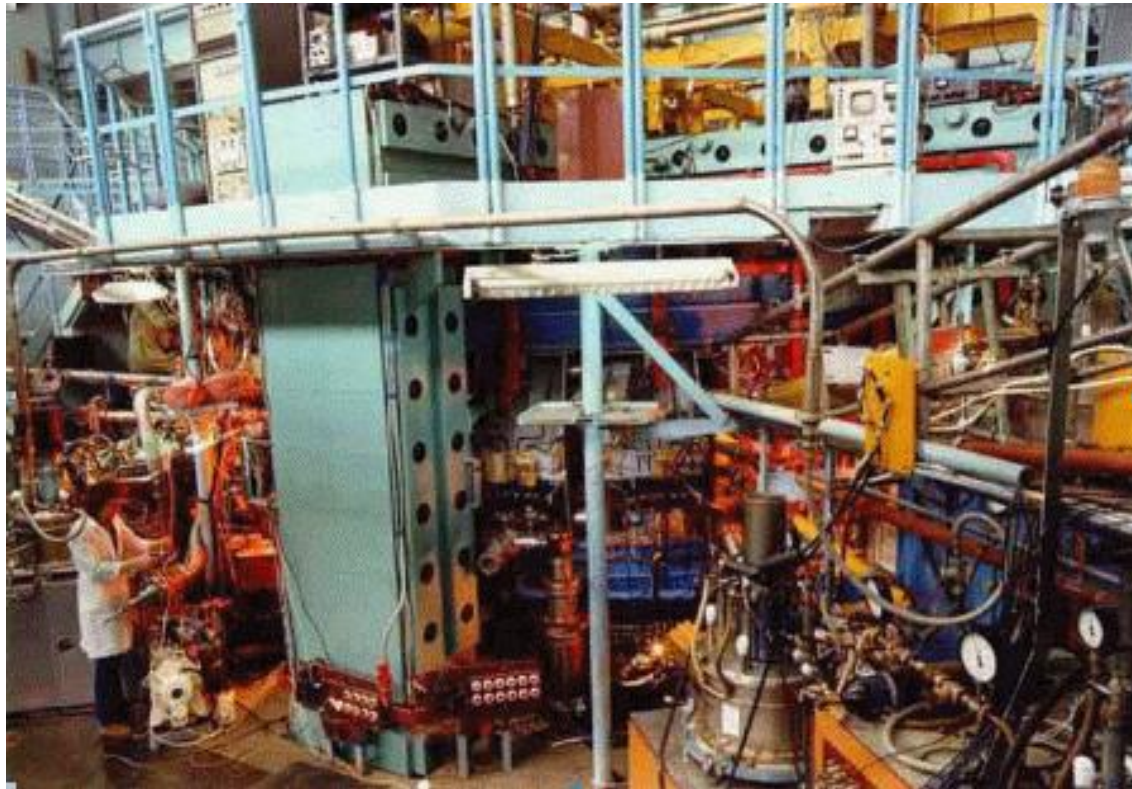
Т-12 — первый в мире токамак с некруглым сечением и двухнулевым полоидальным дивертором (1979 г.).

Продемонстрирована устойчивость плазмы по вертикали с эллиптичностью 2.

Благодаря пионерским работам на токамаках Т-8, Т-9 и Т-12 дальнейшие инженерно-физические проекты токамаков, в т.ч. реакторного типа, включая сооружаемый ИТЭР, ориентированы на конструкции с вытянутым сечением плазмы и использованием дивертора.



Токамак Т-10 (1975г. - н/в)



Параметр	Величина
Большой радиус, м	1.5
Малый радиус, м	0.36
Тороидальное поле, Т	4.0-2.5
Ток плазмы, МА	0.4-0.6
Мощность ЭЦР-нагрева, МВт	3.5

Исследован СВЧ нагрев плазмы на первой и второй гармониках ЭЦР при мощности до 3-х МВт

Впервые в мире получена электронная температура $T_e = 100$ млн. град

Продемонстрирована генерация тока с помощью ЭЦ волн ($I_{эц} = 110$ кА)

Продемонстрирована возможность стабилизации крупномасштабных МГД возмущений с помощью ЭЦ волн



Токамак Т-7 – (1979-1987 гг.)



Параметр	Величина
Большой радиус, м	1.22
Малый радиус, м	0.3
Тороидальное поле, Т	3.0
Ток плазмы, МА	0.3
Мощность НГ-нагрева, МВт	2.0

Первый в мире токамак со сверхпроводящей тороидальной обмоткой на основе ниобий-титанового проводника. Исследовано влияние стационарного магнитного острова $m=2$ на процессы переноса в плазме. Исследованы режимы с безиндуктивным поддержанием тока плазмы нижегибридными волнами.



Параметр	Величина
Большой радиус, м	2.43
Малый радиус, м	0.7
Тороидальное поле, Т	3.5
Ток плазмы, МА	1.0
Мощность инжекции, МВт	9.0
Мощность СВЧ-нагрева, МВт	10.0

Первый в мире токамак с циркуляционной сверхпроводящей магнитной системой на основе ниобий-олово. Получено тороидальное поле на оси плазмы 3.6 Тл, ток плазмы до 1 МА. Продемонстрирована возможность применения ниобий-оловянных сверхпроводников в токамаках реакторного масштаба, в частности ИТЭР. Развита промышленность по производству сверхпроводниковых кабелей.



В 2009 году, по инициативе Е.П. Велихова была создана комиссия под руководством С.В. Мирнова для анализа состояния и перспектив работ по физике и технологии токамаков в России.

Заключение Комиссии:

«Комиссия считает крайне актуальной скорейшую демонстрацию положительного практического выхода программы УТС, и отмечает, что реальной возможностью этого в ближайшее время может стать разработка и создание ТИН – «гибридной» системы УТС, объединяющей преимущества реакций синтеза и деления и нацеленной на решение проблем, стоящих перед атомной энергетикой».

«Комиссия рекомендует приступить к работам, по созданию водородного (без нейтронного) прототипа термоядерного источника нейтронов ТИН-0 на базе токамака Т-15МД и параллельно приступить к эскизному проектированию демонстрационного ТИН-1, чтобы, по возможности, ускорить внедрение управляемого термоядерного синтеза в атомную энергетику».



Задачи стоящие перед ТИН как источника термоядерных нейтронов

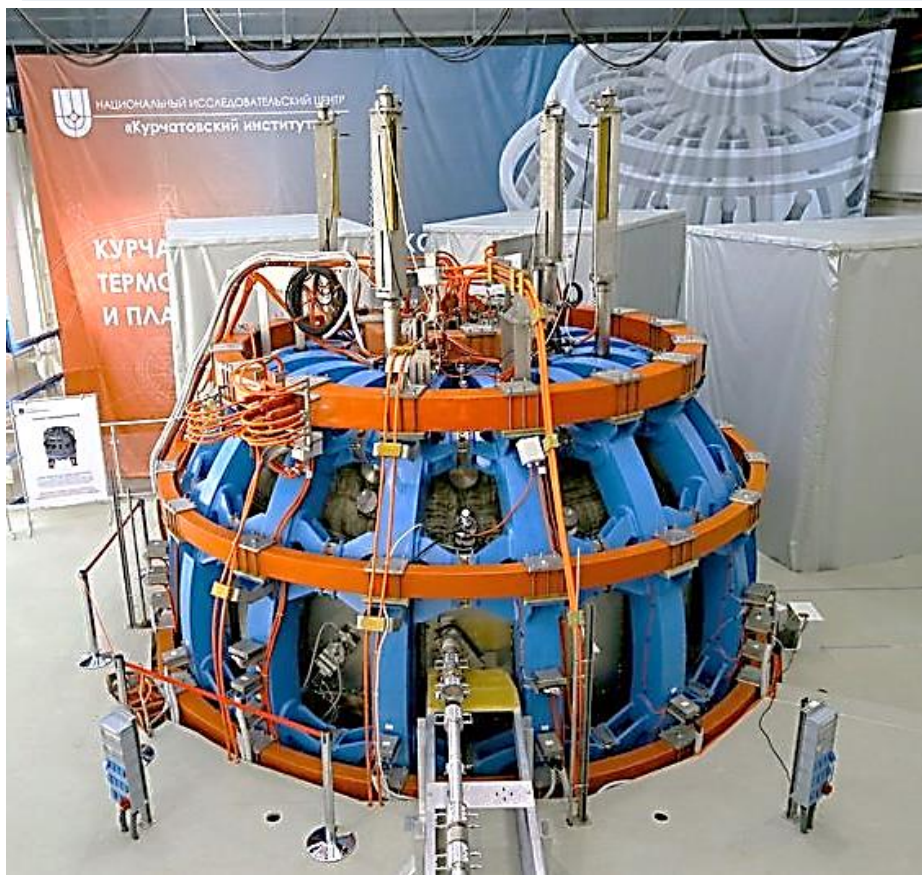
- 1. Гибридный токамак-реактор для наработки топлива.**
- 2. Гибридный токамак-реактор для трансмутации МА.**
- 3. Стенд для отработки реакторных технологий (ТРТ).**
- 4. Гибридный токамак-реактор с подкритической активной зоной.**
- 5. Интенсивный источник нейтронов для научных и технологических целей.**





Работы по созданию ТИН планируется выполнить в три этапа:

- 1 этап. Создание и исследования физического прототипа ТИН-0 – установки Т-15МД; разработка технологий обеспечивающих стационарную работу токамака; разработка и испытания бланкетов для ТИН.
- 2 этап. Разработка и создание демонстрационного ТИН-1 со стационарной нейтронной нагрузкой на бланкет $0,1-0,2$ МВт/м², термоядерная мощность 10-20 МВт. Отработка ядерных и термоядерных технологий наработки ядерного топлива (несколько десятков кг урана-233 или плутония) и трансмутации МА.
- 3 этап. Разработка и создание опытно-промышленного ТИН-2 для наработки ядерного топлива со стационарной нейтронной нагрузкой на бланкет $0,3-0,5$ МВт/м², для обеспечения топливом 1-2 ВВЭР-1000 и для трансмутации МА от работы 3-6 ВВЭР-1000 (до 250 кг/год МА).



Целью исследований на токамаке Т-15 МД являются поддержка проекта ИТЭР и получение физико-технологической базы для обоснования создания стационарных термоядерных реакторов и перспективных гибридных систем на основе токамаков.

Основные параметры

Большой радиус тора R, м	1.48
Аспектное отношение	2.2
Ток плазмы I_p , МА	2.0
Вытянутость, k	1.9
Конфигурация плазмы	SN,DN
Длительность импульса, сек	30
Тороидальное магнитное поле, Т	2
Запас магнитного потока в центральном соленоиде, Вб	6
Дополнительный нагрев плазмы: мощность (МВт)/длительность (сек.)	
Система инжекции быстрых атомов	6/Ст-р
Система ЭЦР- нагрева	7/30
Система ИЦР- нагрева	6/30
Система НГ- нагрева	4/Ст-р

1. Некруглое сечение плазмы ($\kappa \geq 1$, δ – возможность получения разрядов с нулевой, положительной и отрицательной треугольностью) при $R \sim 1,5$ м
2. Длительность разряда до 10 секунд с током плазмы $I = 1.5$ МА
3. Мощность дополнительного нагрева > 15 МВт
4. Нагрев как ионной, так и электронной компоненты
5. Дивертор
6. Умеренное аспектное отношение ($A \sim 2.2$)

При реализации всех перечисленных факторов установка Т-15МД – новый шаг в развитии отечественных токамаков: крупная установка с дивертором, с возможностью комбинированного нагрева ионной и электронной компоненты





Система высоковакуумной откачки

Суммарная эффективная скорость
откачки не менее 3000 л/с

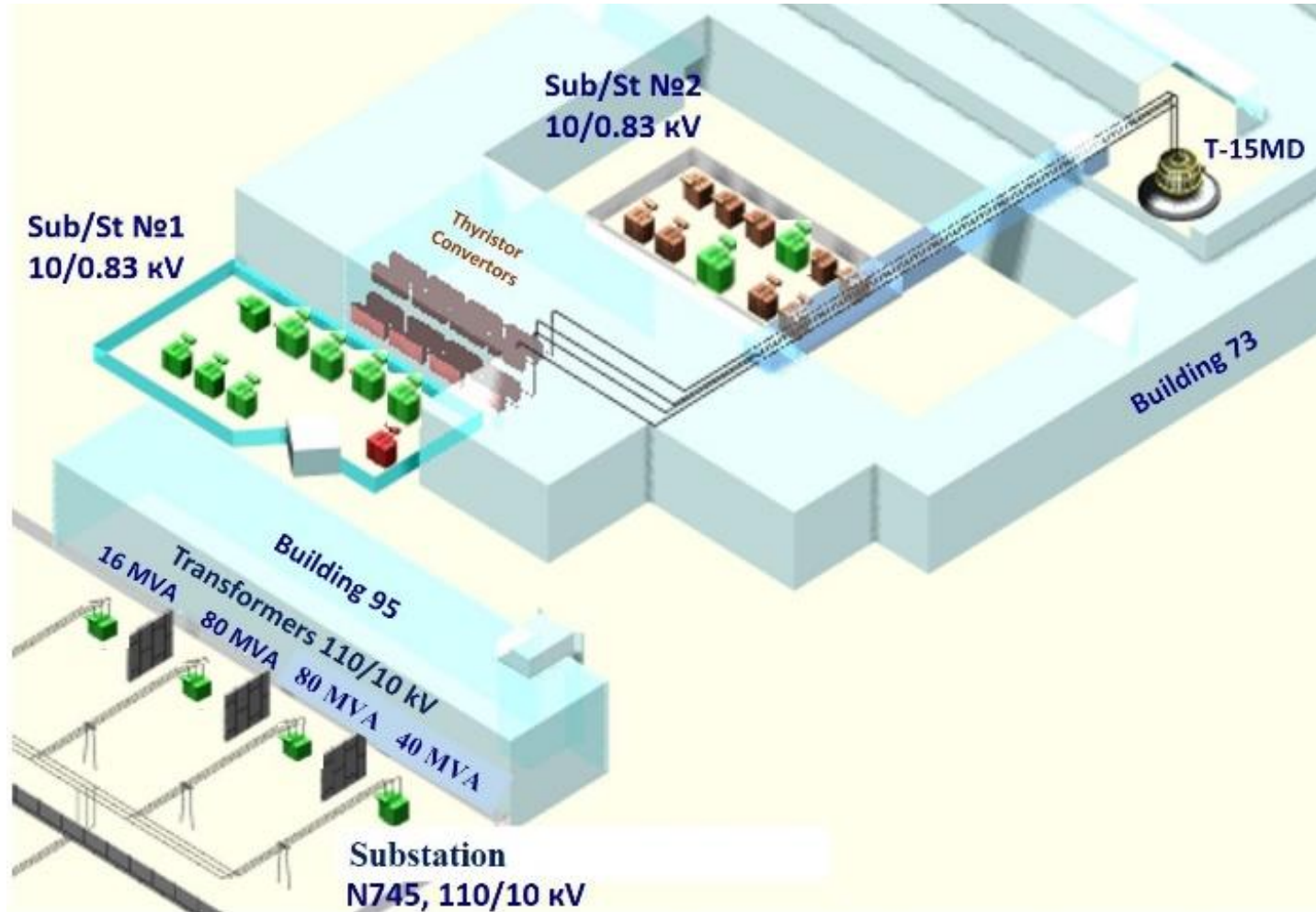
Под установкой на
отметке -5.6 м

Откачная
ячейка
(всего 6)



Монтаж датчиков электромагнитной диагностики внутри вакуумной камеры





Расположение оборудования (зеленым цветом отмечены новые трансформаторы)

Открытое распределительное устройство – 110кВ, 300 МВА





Трансформаторы и КРУ - 110/10 кВ



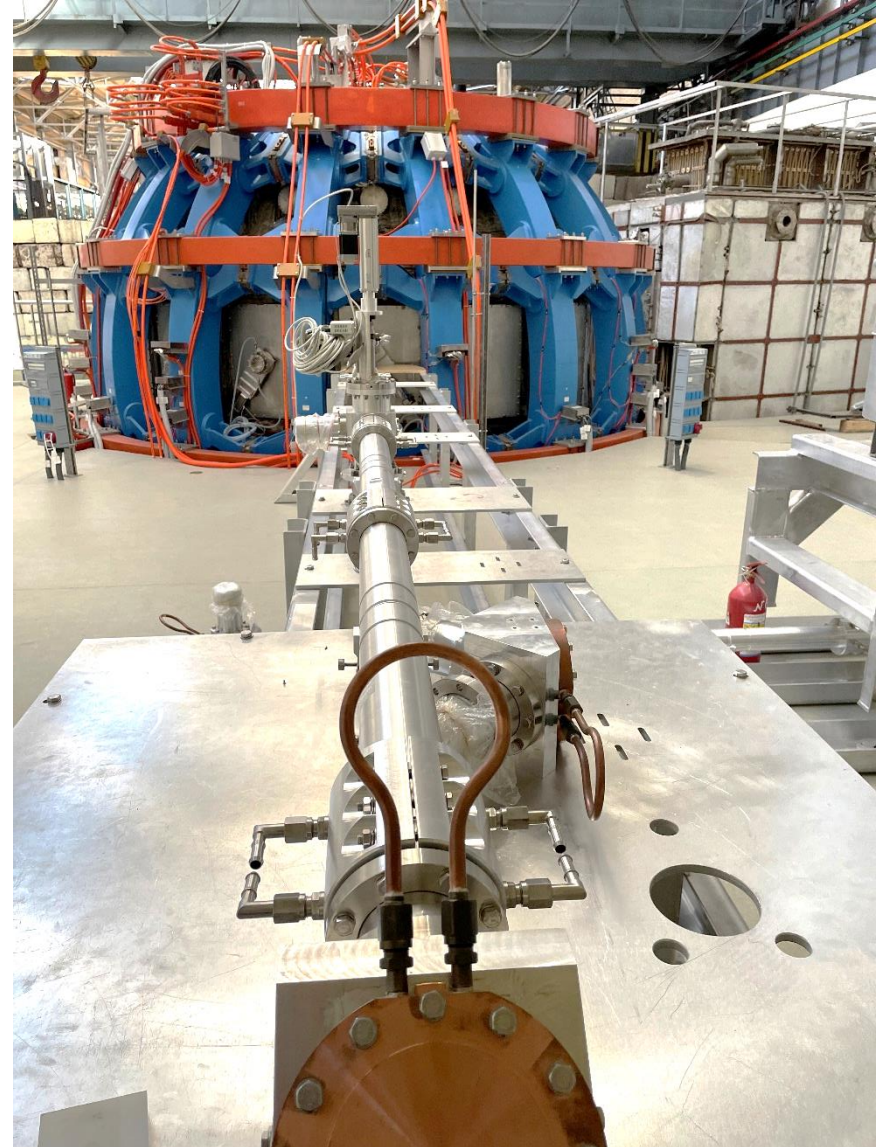


АЗОТНАЯ СТАНЦИЯ - 1000 кг/час LN_2





В зале установки токамака Т-15МД







Гиротрон 82.6 ГГц для предыонизации на штатном месте

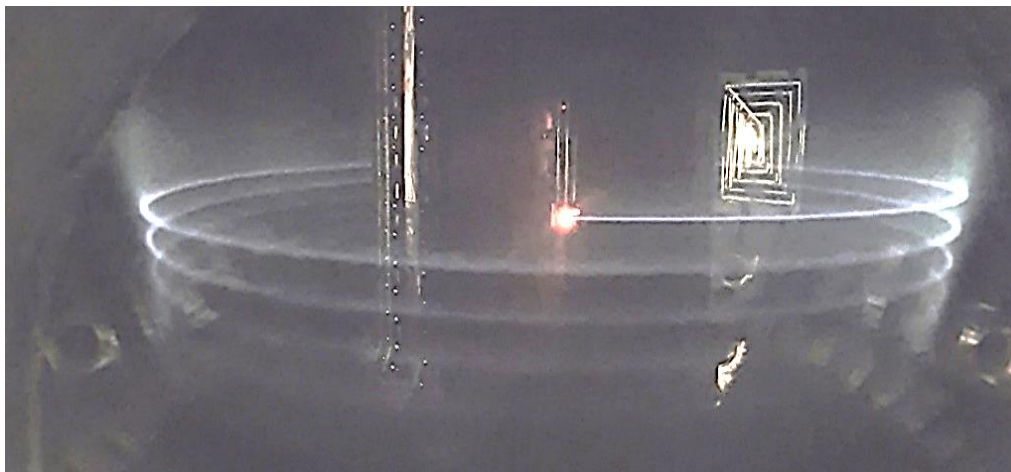
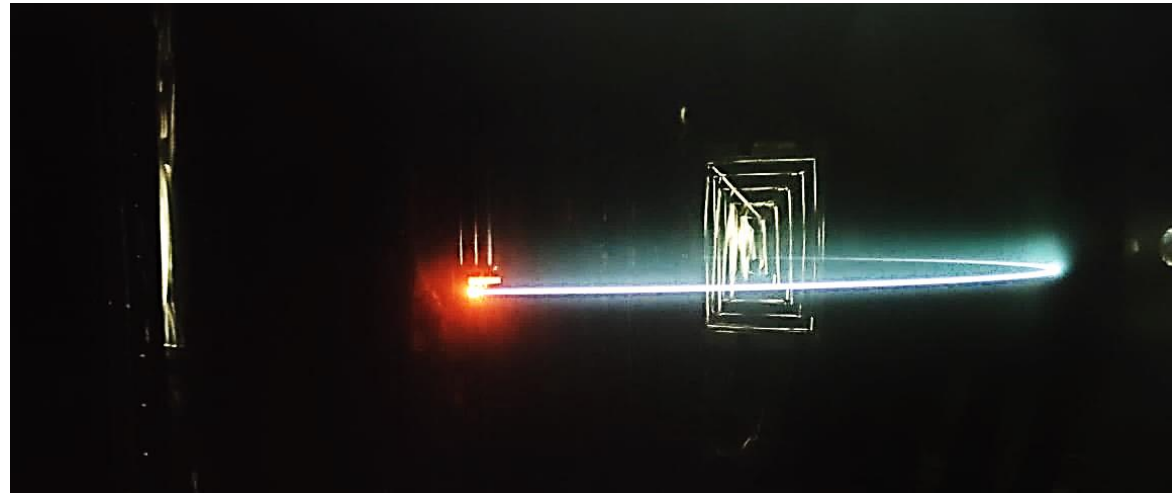


**Импульс гиротрона $P \geq 0.7$ МВт
передача СВЧ-мощности на
расстояние 42 метра**

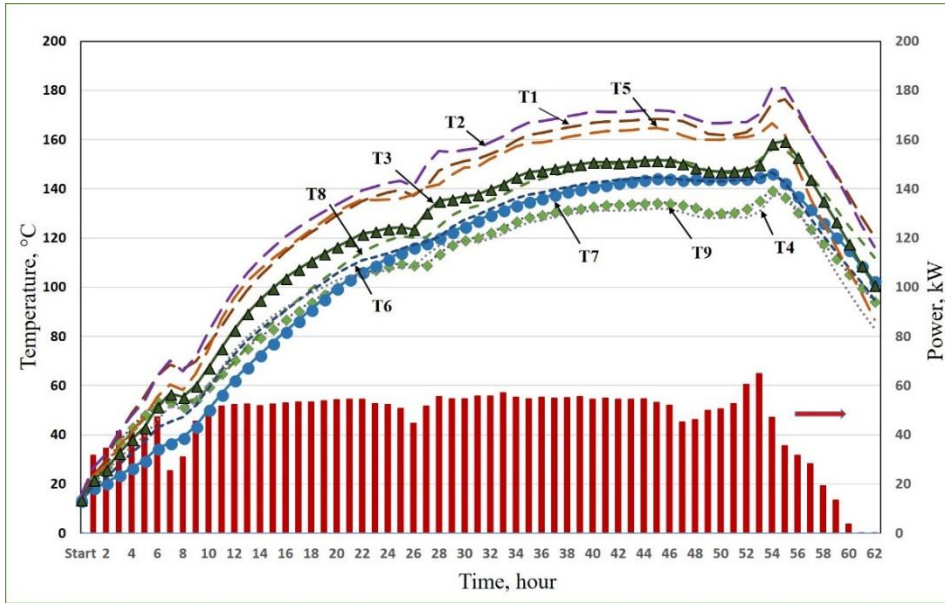


ПОДГОТОВКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ФИЗИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИК К ПОЛУЧЕНИЮ ОМИЧЕСКОГО ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА

Измерения рассеянных магнитных полей, связанных с возможной неточностью установки катушек тороидального поля и эффективности полоидальных обмоток с помощью электронного пучка в аргоне

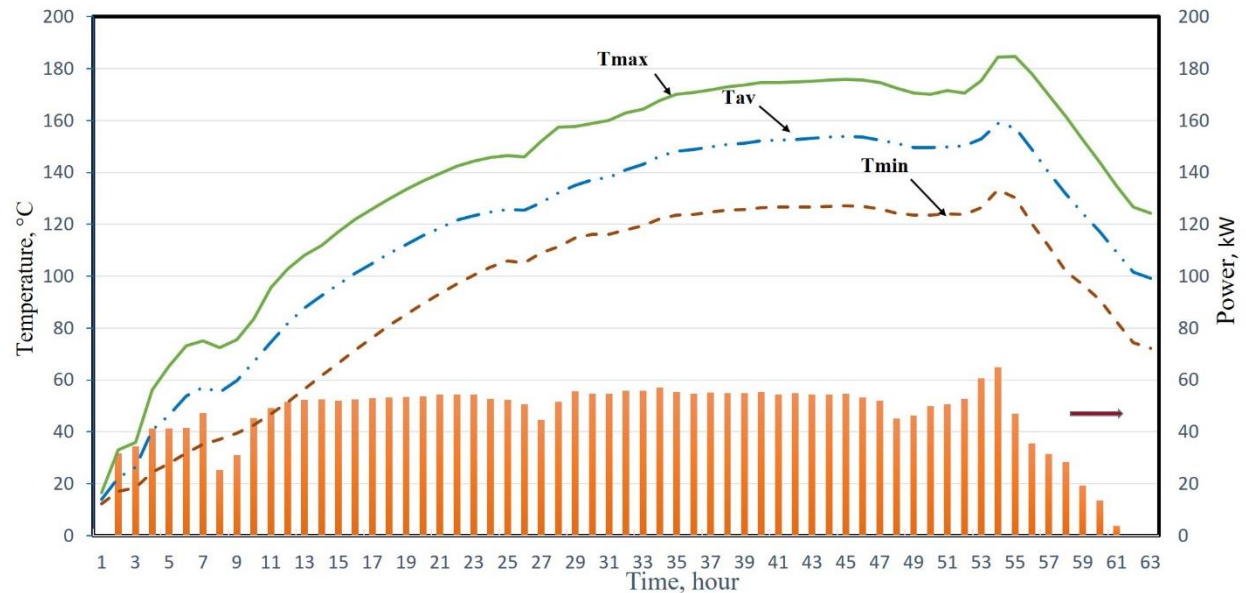
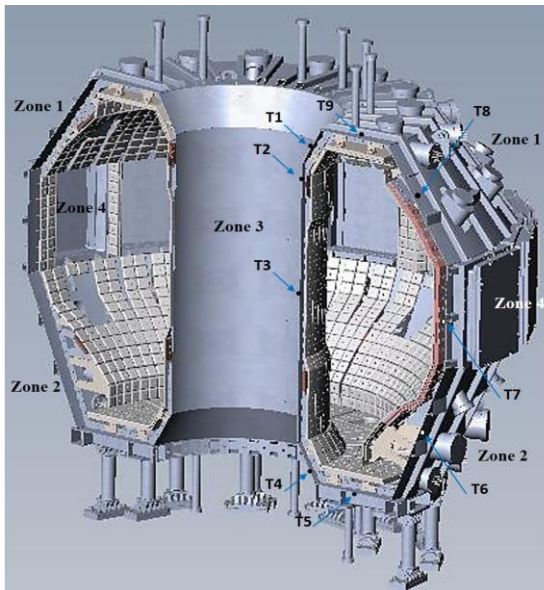


Электронная пушка



Омический прогрев

95 омических нагревателей
102 термодпары
Скорость подъема температуры –
7 град/час
Максимальный градиент - 60°C





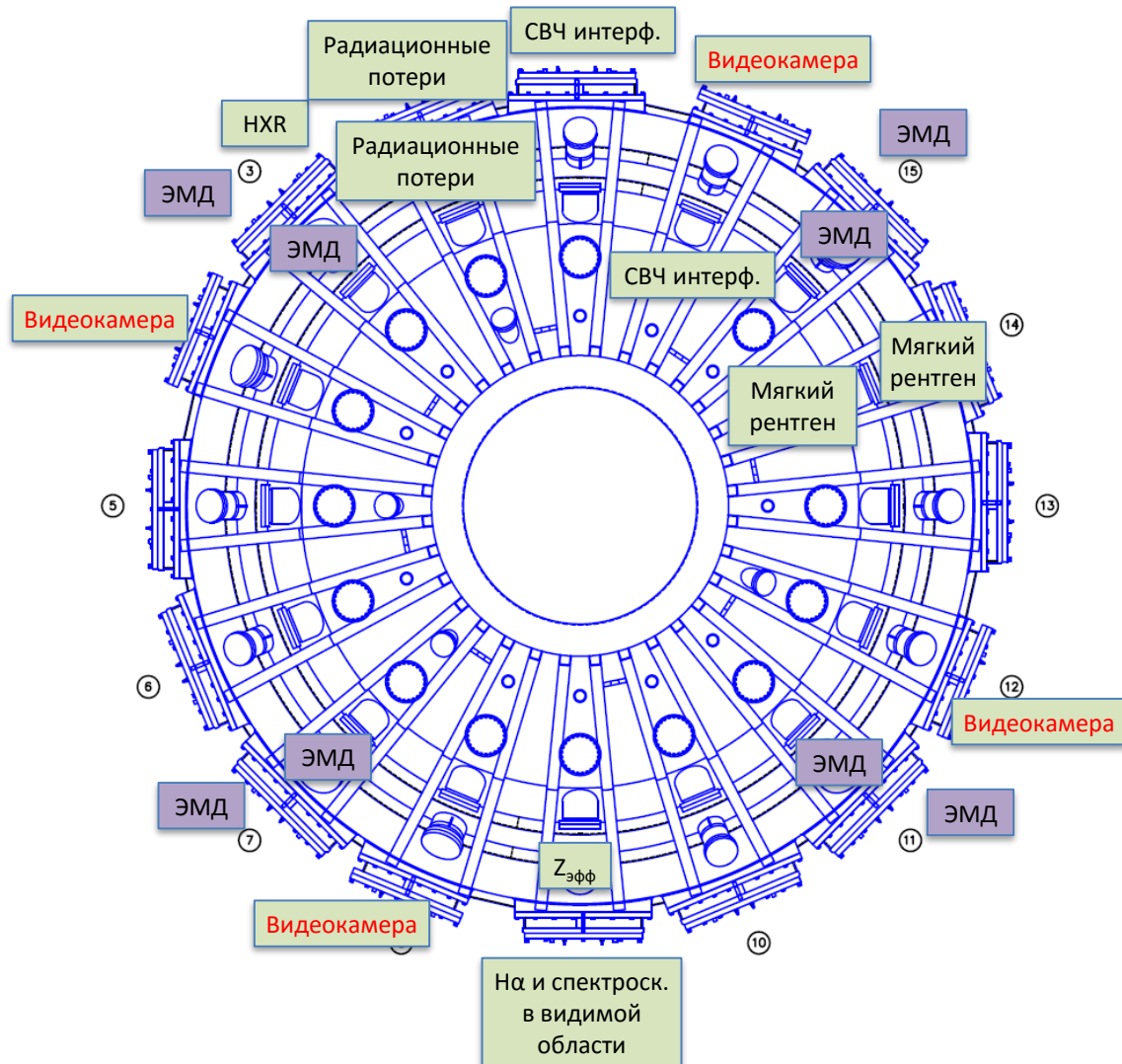
Проведение режима тлеющего разряда



Тлеющий разряд в аргоне



Схема размещения диагностик на камере Т-15 МД во время физического пуска





Техническое перевооружение комплекса дополнительного нагрева плазмы установки токамак Т-15МД 2022-2024

ЦЕЛИ:

- ❑ Поддержание тока разряда ~ 1 МА в течение 30 секунд и нагрева плазмы до температур 5-7 кэВ - необходима модернизация существующих систем дополнительного нагрева плазмы и поддержания тока плазмы, а также создание новых:
 - Система инъекции быстрых атомов
 - Система электронно-циклотронного нагрева
 - Система ионно-циклотронного нагрева (создается вновь)
 - Система нижнегибридного нагрева и поддержания тока (создается вновь)
- ❑ Обеспечение работы инжекторов нейтралов - необходима модернизация системы криогенного обеспечения.
- ❑ Обеспечение работы систем дополнительного нагрева - необходима модернизация системы энергоснабжения и инженерных систем.



**Три инжектора
быстрых атомов (6
ионных источников)**

**Энергия источников – до 75
кэВ**

**Мощность пучков быстрых
атомов – 6 МВт**

**Длительность импульса
ионных источников -
стационар**

**СКО Т-15МД должна
обеспечить
Мощность на один инжектор
- 300Вт.
Температурный уровень –
3.6К.
Режимы работы -
стационарный
Автономная работа
инжекторов
Криогенная откачка
дивертора
Интегрированная в систему
новая азотная станция**



**Четыре + Три гиротрона
Рабочая частота - 102-110 ГГц.**

**Мощность СВЧ-излучения – 5
МВт.**

**Длительность импульса – 30
секунд**

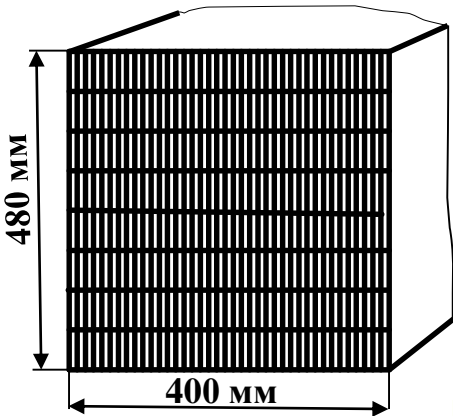


В/В комплекс «Виктория»

**12 источников питания
60 кВ, 1 МВт , стационар**

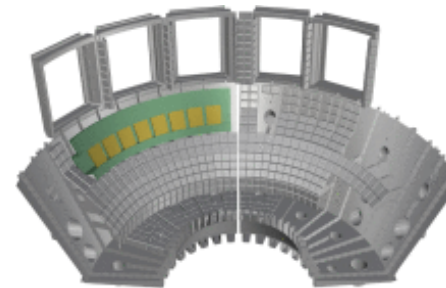


Система НГ-нагрева и поддержания тока плазмы



Частота – 2.45 ГГц
мощность 4 МВт
режим генерации-
стационар
20-40 клистронов
по 200-100кВт

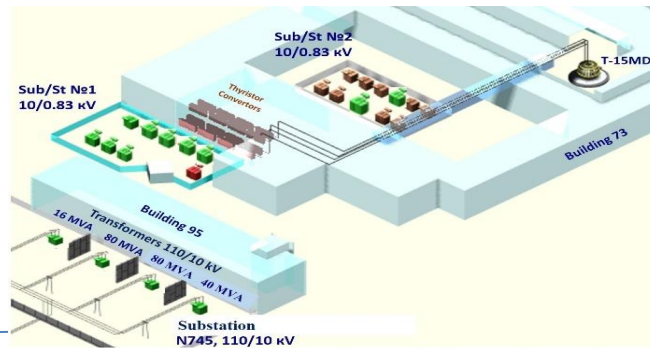
Система ИЦР-нагрева



Диапазон частот –
20 - 60 МГц
Полная ВЧ мощность
- до 6 МВт
Длительность ВЧ
импульса
- 30 сек



4 км



**ВКЛ 110 кВ, 230 МВА от ТЭЦ 16
до подстанции №745
(протяженность 4км.)**

- **Поддержка проекта ИТЭР в решении ключевых физических и технологических задач.**
- **Физическое и технологическое обоснование демонстрационного термоядерного источника нейтронов для гибридного реактора.**
- **В качестве прототипа ТИН токамак Т-15МД будет использоваться как стенд, на котором будут отрабатываться стационарные инжекторы нейтралов, стационарные системы ВЧ, СВЧ и НГ нагрева и поддержания тока плазмы, испытываться материалы и технологии первой стенки (**в частности литиевые**), дивертора и др.**



Задачи в поддержку первой стадии работы ИТЭР и ТИН

1. Изучение механизмов СВЧ-пробоя на второй (и, возможно, третьей ?) гармонике ЭЦР
2. Предотвращение срывов, восстановление разряда
3. Разработка алгоритмов подавления генерации пучков ускоренных электронов

Основная долгосрочная задача установки:

получение устойчивого режима с улучшенными характеристиками удержания и длительностью импульса $t_{imp} > t_{res}$ (Advanced tokamak regime)

1. физика переносов,
2. Получение режимов улучшенного удержания
3. SOL, дивертор
4. взаимодействие методов нагрева с плазмой,
5. устойчивость, срывы, убегающие электроны
6. материал первой стенки (в т.ч. литий)
7. алгоритмы управления,
8. неиндукционное поддержание тока (увеличение эффективности генерации тока, увеличение f_{bs})
9. разработка диагностик (расширение списка измеряемых параметров, разрешение)

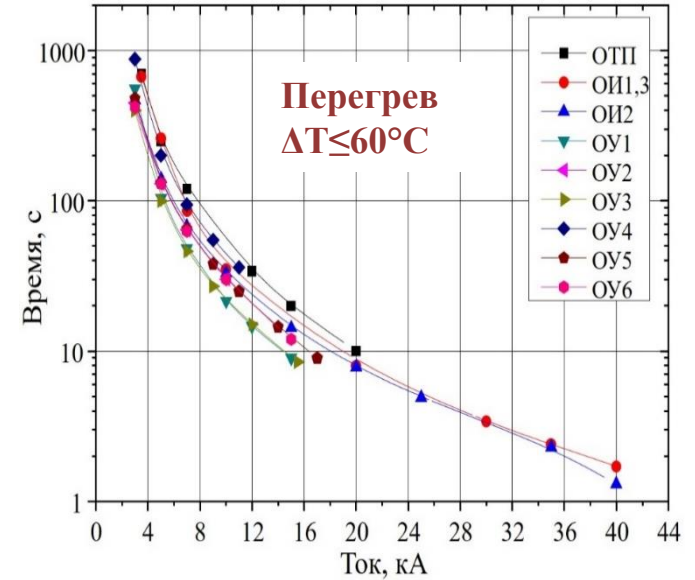
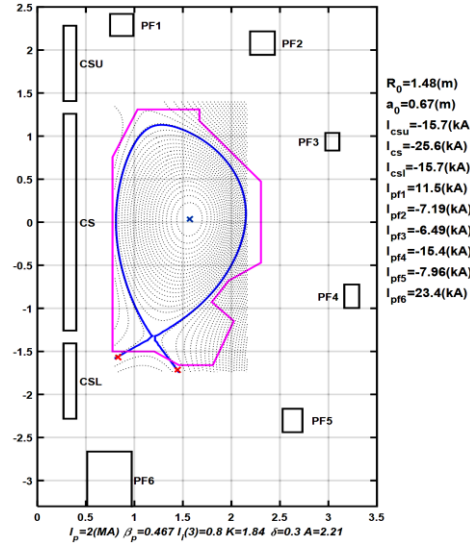
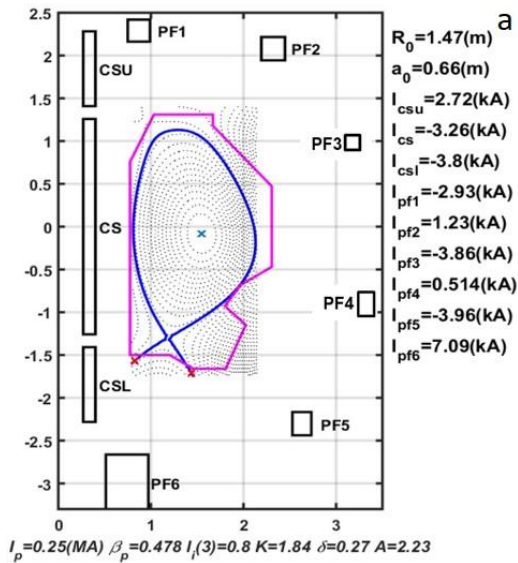
“Локальная” задача установки:

Научиться работать с плазмой нового (для нас) типа (итероподобная конфигурация)

- Подбор сценария разряда
- Оработка алгоритмов контроля разряда
- Создание и контроль формы
- Управление устойчивостью



Одной из главных целей, стоящих при создании термоядерных и гибридных реакторов на основе токамаков является обеспечение работы в стационарных или квазистационарных режимах. Длительность разрядов современных токамаков (EAST, KSTAR) с термоядерными параметрами плазмы ограничивалось временем порядка ста секунд. Понимание процессов, приводящих к ограничению длительности разрядов, представляет собой актуальную задачу. В этой связи, очень важно знать возможности токамака Т-15МД для осуществления квазистационарных плазменных режимов.

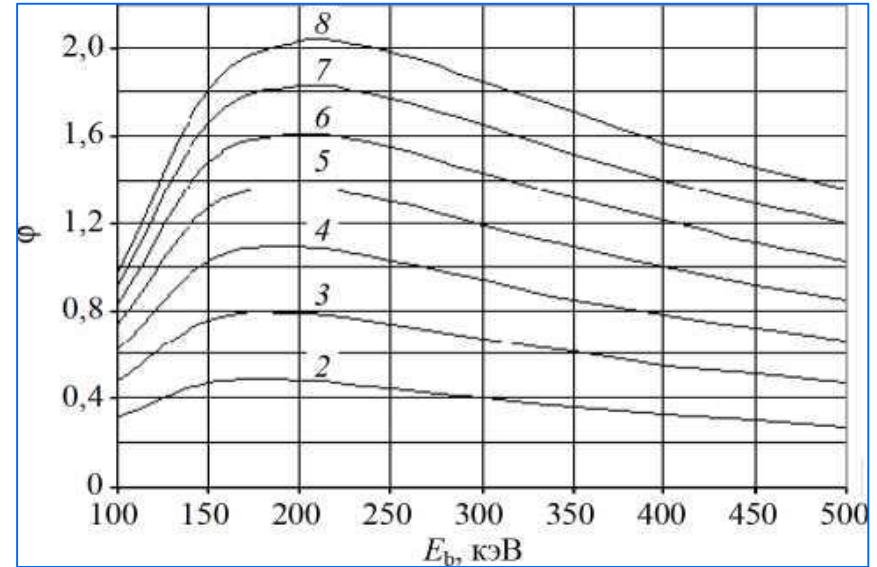
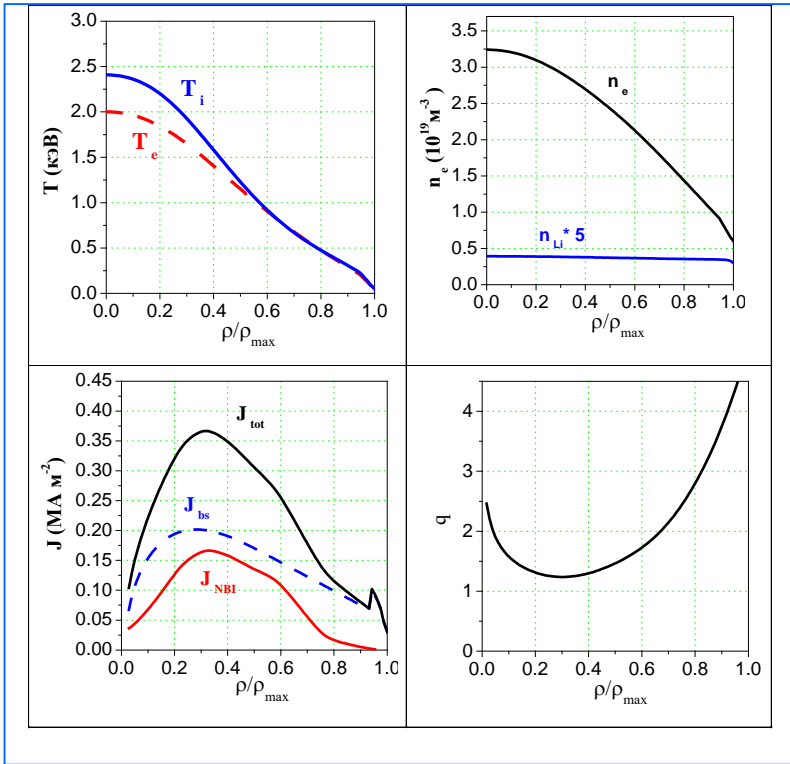


Равновесные магнитные конфигурации плазменного шнура для тока 250 кА

для тока 2 МА

Длительность разряда при поддержании тока не-индукционным способом, составит:

2 МА - 4 секунды, 1.5 МА - 8 с, 1 МА – 20 с, 0.7 МА - 40 с, 0.5 МА - 80 с, 0.4 МА - 100 с, 0.3 МА -160 с и для тока 250 кА - 400 с



Зависимость относительной мощности реакций на пучке ϕ от энергии быстрых частиц E_b для электронной температуры T_e в диапазоне от 2 до 8 кэВ (2—8)

$$P_{\text{fus}}/P_b = n_t/n_e \times 15/\ln\Lambda \times \phi(E_b, T_e)$$

при $E_b = 75$ кэВ, $P_b = 6$ МВт мощность в нейтронах синтеза $P_{\text{fus}} \sim 2$ МВт может быть достигнута при средней температуре электронов плазмы $T_e = 4—5$ кэВ в равнокомпонентной D—T-плазме

Распределение по малому радиусу основных параметров разряда Т-15МД с током 0.5 МА: T_e и T_i – температура электронов и ионов, соответственно; n_e – концентрация электронов, n_{Li} – концентрация лития; J_{tot} – полная плотность тока; J_{bs} – плотность бутстреп тока; J_{NBI} – плотность тока пучка; q – величина запаса устойчивости.

Параметры термоядерного источника нейтронов ТИН-1 (Э.А.Азизов, А.Б. Минеев, ВАНТ 2012,2) и токамака Т-15МД

Параметр	ТИН-1	Т-15МД
Большой и малый радиусы плазмы R и a, м	1,5/0,6	1,48/0,67
Тороидальное поле на оси плазмы B_{t0} , Тл	3	2
Вытянутость и треугольность плазмы k и δ	1,7/0,3	1,7/0,3
Ток плазмы I_p , МА	2,5	2,0
Нормализованная бэта β_N	3	3-4
Коэффициент улучшения удержания $H_{u, 2}$	1,4	
Запас устойчивости на границе шнура q_{95}	4	4
Внутренняя индуктивность плазмы $l_i(3)$	0,7	0,7
Мощность дополнительного нагрева P_{aux} , МВт	20 (НИ)	20 (НИ-6)
Мощность, выделяемая в нейтронах, P_N , МВт	~8—10	~2
Режим работы	стационарный	квазистационарный



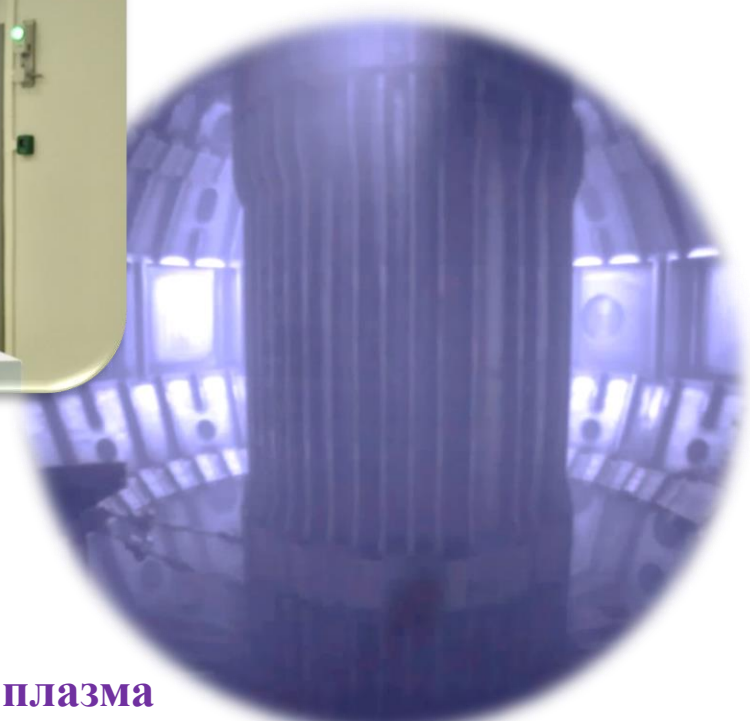
18 мая 2021 года – торжественный физический пуск токамака Т-15МД



Председатель Правительства РФ М.В. Мишустин
и Президент НИЦ КИ М.В. Ковальчук дали старт
исследованиям на токамаке Т-15МД



Момент пуска
токамака Т-15МД



Первая плазма

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПУСК ТОКАМАКА T-15MD



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

ОСЕНЬ 2022 года





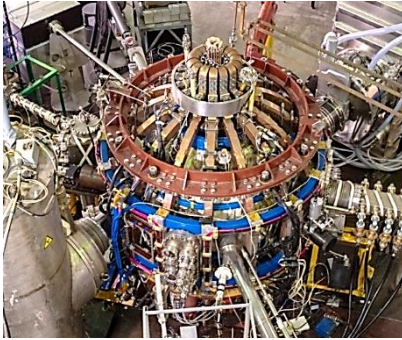
Основными стратегическими направлениями работ в области УТС в Российской Федерации являются:

- **участие в проекте ИТЭР и в разработке демонстрационного реактора ДЕМО как экологически чистых источников энергии;**
- **создание гибридного реактора для решения проблем атомной энергетики на базе термоядерного источника нейтронов (ТИН).**

Идеология нейтронных источников для выжигания актинидов и наработки топлива для атомной энергетики считается в России одной из перспективных с целью достижения более быстрой отдачи от исследований по УТС и реальной демонстрацией энергетических возможностей реакций синтеза.

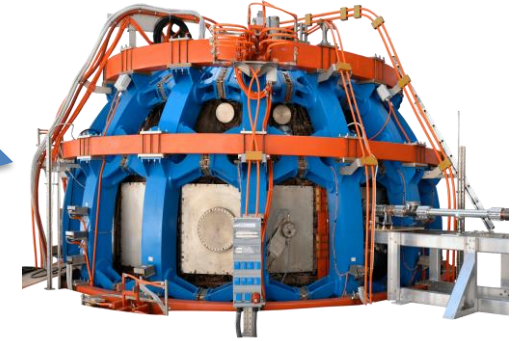


Глобус М2, Т-11М

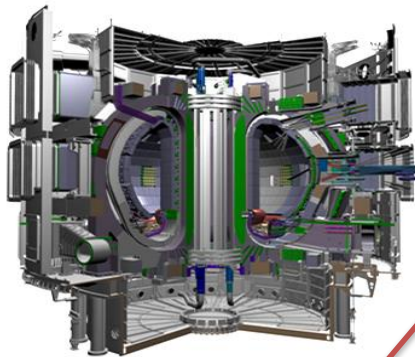


Фундаментальные и технологические исследования

Токамак Т-15 МД



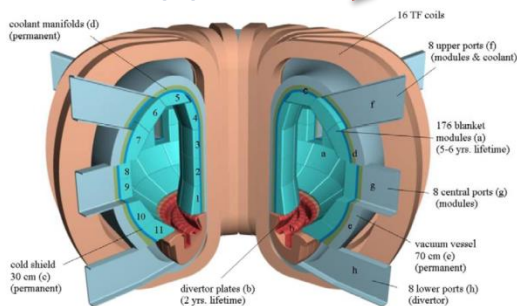
ИТЭР



Токамаки-реакторы и источники термоядерных нейтронов

- Гибридный реактор как:**
- наработчик ядерного топлива
 - трансмутатор
 - энергетический реактор

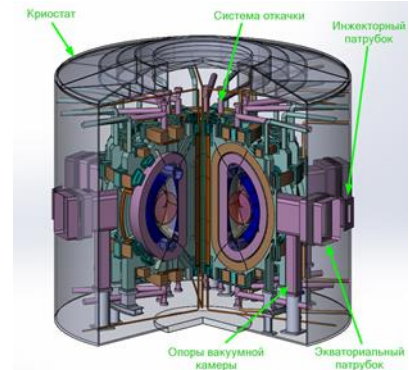
ДЕМО



Термоядерная станция

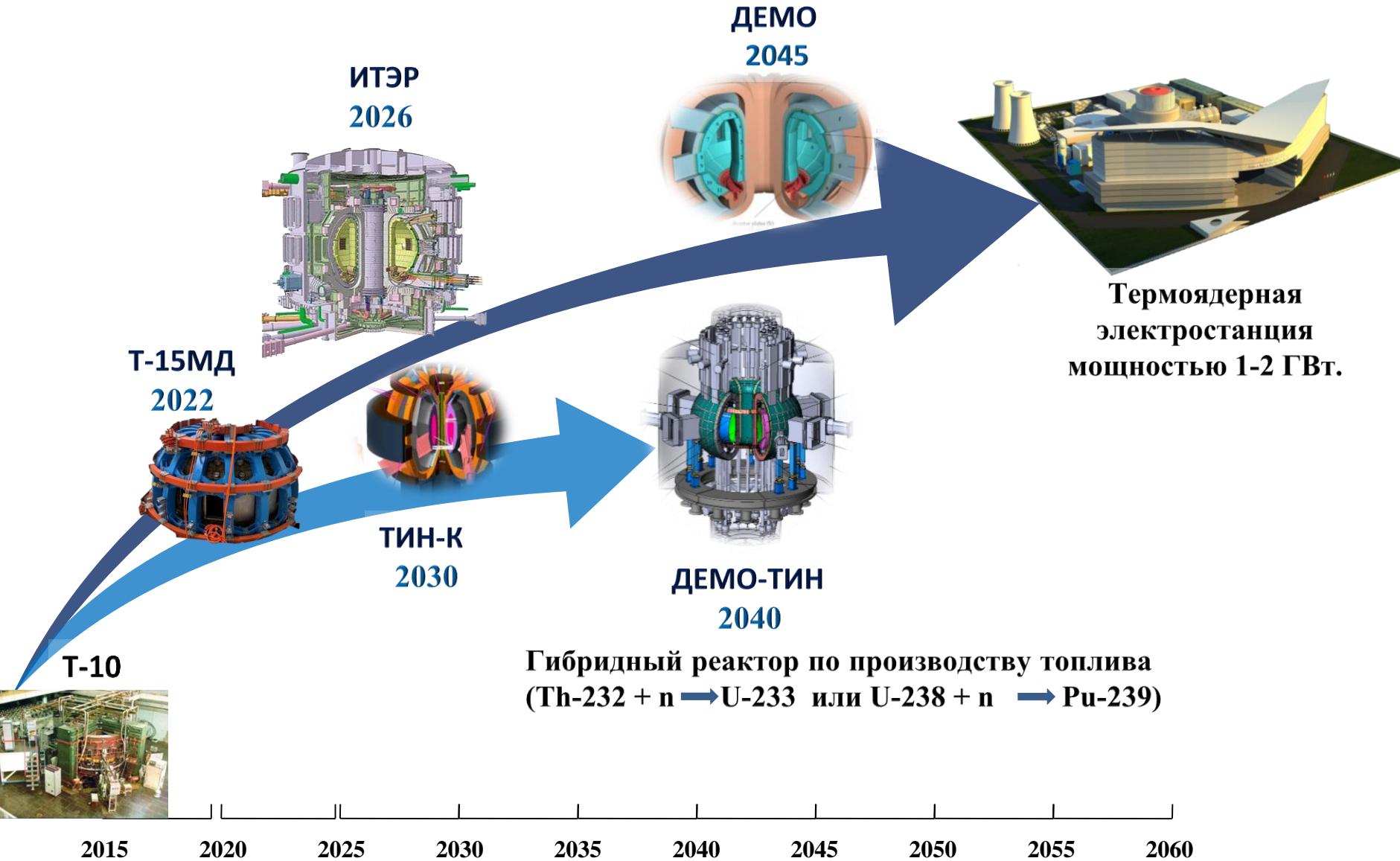


Гибридный реактор





ДОРОЖНАЯ КАРТА РАЗВИТИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА





ТОКАМАК Т-15МД



«МАЛЕНЬКОЕ СОЛНЦЕ» НА ЗЕМЛЕ



СПАСИБО ЗА ВАШЕ ВНИМАНИЕ