

Конструкция, сценарий и режимы работы токамака КТМ. Условия эксплуатации конструкционных материалов КТМ.

И.Л. Тажибаева, ИАЭ НЯЦ РК

Общие сведения о токамаках

- Токамак (аббревиатура образована от тороидальная камера с магнитными катушками) класс систем с магнитным удержанием плазмы, в которых плазма имеет тороидальную конфигурацию

Для нагрева плазмы в токамаке используется пропускание по плазменному шнуру большого тока (т.н. резистивный или омический нагрев плазмы), а также ввод в плазму мощности т.н. дополнительного нагрева с помощью ВЧ полей или пучков нейтральных частиц (дейтонов) большой энергии.

Горячая плазма, взаимодействующая с холодными стенками, представляет собой термодинамически неравновесную систему. Если в такой системе выключить источники нагрева, то она будет остывать во времени экспоненциально с показателем, который определяет как энергетическое время жизни τ_E . С другой стороны, от величин τ_E зависит, какую мощность необходимо вводить в плазму, чтобы достичь термоядерных температур. Время τ_E входит в уравнение баланса энергии следующим образом:

$$\frac{dW_P}{dt} = P_{OH} + P_{AUX} + P_\alpha - P_{rad} - \frac{W_P}{\tau_E} \quad (1)$$

Здесь P_{OH} , P_{AUX} , P_α - мощности омического нагрева, дополнительного нагрева и нагрева α -частицами в результате термоядерного синтеза, P_{rad} - мощность полных потерь на излучение плазмы (с учетом излучения примесей), W_P - энергия плазмы.

Общие сведения о токамаках

Для достижения условий возбуждения термоядерного горения требуется выполнение соотношения:

$$n_e T \tau_E \geq (20-30) \cdot 10^{20} \text{ кэВ} \cdot \text{с} / \text{м}^3 \quad (2)$$

Из него следует, что в реакторе с магнитным удержанием типа токамак с $n_e \approx 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и $T \approx 10 \text{ кэВ}$ энергетическое время жизни плазмы должно быть более, чем $\tau_E \approx 2-3 \text{ с}$.

В случаях, когда конфигурация и режимы удержания плазмы в токамаке *далеки от идеальности*, потери из неё недопустимо велики. Наиболее сильными возмущениями конфигурации и режимов удержания являются: отсутствие равновесия плазмы; выход силовых линий на стенки камеры; нарушение вращательного преобразования; большая амплитуда радиальных возмущений магнитного поля в плазме; высокое содержание примесей; сильно турбулизация плазмы.

Эти процессы приводят к существенному ухудшению удержания плазмы в токамаке и должны быть исключены.



Сценарий работы токамака включает в себя следующие основные стадии:

- ▶ создание условий для пробоя плазмы (тренировка камеры с высоко вакуумной откачкой, достижение необходимой конфигурации магнитных полей, ввод газа, создание требуемого напряжения вихревого электрического поля на обходе),
- ▶ пробой и формирование плазменного шнура,
- ▶ подъём и выход на плато тока плазмы,
- ▶ поддержание плато тока плазмы,
- ▶ дополнительный нагрев плазмы,
- ▶ управляемый вывод тока плазмы,
- ▶ подготовка к следующему циклу работы.

Для работы токамака необходимо:

- ▶ Создание требуемых вакуумных условий в камере $p_{\text{фон}} \sim 10^{-5} - 10^{-6}$ Па;
- ▶ Заполнение камеры рабочим газом до давления $p \sim 10^{-2} - 10^{-3}$ Па; при этом необходимо существенное превышение над фоновым давлением $p/p_{\text{фон}} \geq (2-4) \cdot 10^2$;
- ▶ Создание низкого уровня рассеянных полей в зоне пробоя $V_{\text{str}} \leq V_{\text{str,max}}$;
- ▶ Достижение напряжения на обходе достаточного для пробоя газа $U > U_{\text{пр}}$.
- ▶



Токамак КТМ

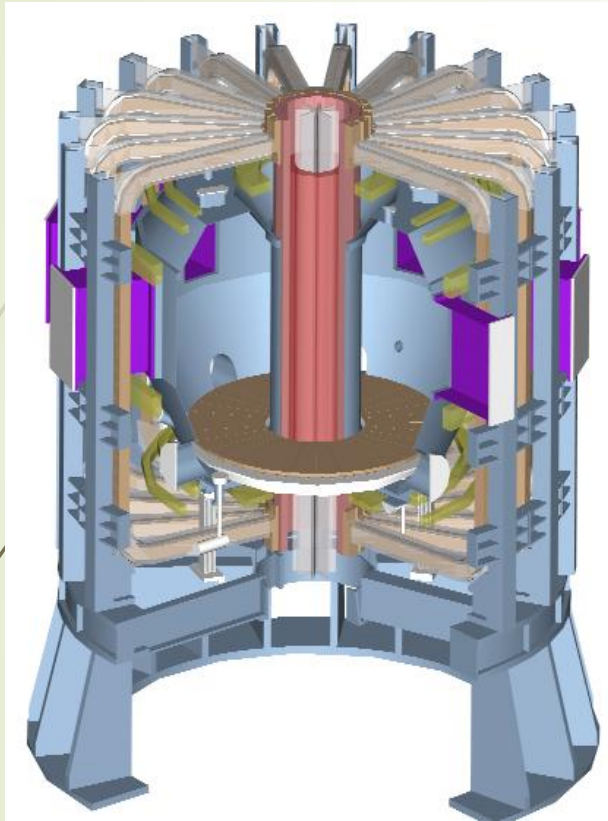
- **Токамак КТМ** (казахстанский токамак материаловедческий) установка с магнитным удержанием высокотемпературной водородной или дейтериевой плазмы. Назначение КТМ – исследование поведения материалов первой стенки и приемных диверторных пластин под комплексным воздействием мощных излучений – тепловых и корпускулярных потоков из плазмы.
- **В основу токамака КТМ заложены идеи:**
- организации стационарного режима горения плазменного шнура с температурой $>10^7\text{K}$ с помощью дополнительного ВЧ-нагрева мощностью до 7 МВт и, возможно, в дальнейшем NBI;
- организации стационарных потоков пристеночной плазмы в диверторную область с мощностями близкими или превышающими мощности потоков в дивертор и на стенку камеры ITER. В стационарном режиме горения плазменного шнура вся мощность, идущая на поддержание средней температуры выше 10^7K идет на стенку и в диверторную область в соотношении 30 и 70%. Таким образом обеспечивается мощность потоков пристеночной плазмы со всеми особенностями, присущими плазме токамаков, необходимыми для исследований и испытаний материалов первой стенки и дивертора.
- создания устройств, позволяющих оперативно менять материалы диверторных пластин, условия приема и величины потоков плазмы, быструю откачку и др.

Требования для выбора параметров токамака КТМ

- ▶ 1. Программа исследований материалов и апробация технических решений по защите первой стенки, отдельных элементов и узлов вакуумной камеры, пластин дивертора должна быть обоснована реальными физическими и техническими характеристиками токамака и должна поддерживать программу Международного экспериментального реактора-токамака (ИТЭР), проекты создания будущих термоядерных реакторов и термоядерных источников нейтронов..
- ▶ 2. Физические характеристики плазменных потоков в диверторную область должны соответствовать параметрам ИТЭР, а технологическое и диагностическое оснащение токамака и всего стендового комплекса должны позволить оперативно проводить исследования и испытания в максимально возможном объеме и с максимальной информативностью.
- ▶ 3. Пиковая и средняя мощность, потребляемая электромагнитной и другими системами токамака, должны соответствовать возможностям площадки размещения токамака.



Общий вид установки КТМ. Основные параметры.



► Большой радиус плазмы	0,9 м
► Малый радиус плазмы	0,45 м
► Аспектное отношение A	2
► Удлинение плазмы K_{95}	1,7
► Тороидальное магнитное поле на оси B_{T0}	1
► Ток плазмы	750 кА
► Длительность тока	5 с
► Мощность ВЧ	5 – 7 МВт
► Мощность тепловой нагрузки на приемные диверторные пластины	2 – 20 МВт/м ²
Плотность плазмы, n	(3-5)10^{19} м⁻³
Температура плазмы, T	(1.5-3) кэВ

Мощность потоков плазмы регулируется:

- расстоянием от х-точки сепаратрисы до диверторных пластин;
- углом наклона диверторных пластин к оси токамака;
- свипированием х-точки сепаратрисы при помощи дополнительной полоидальной обмотки.



КТМ

Миссия токамака КТМ

- создание экспериментальной базы для проведения системных исследований и испытаний материалов, технических и технологических процессов защиты первой стенки, приемных пластин дивертора, методов и систем теплоотвода;
- проведение уникальных исследований пограничной магнитной конфигураций между предельно компактным тороидами и классическими токамаками;
- создание условий для широкого международного сотрудничества в области материаловедения для термоядерной энергетики. Организация Международная лаборатории.

Токамак КТМ станет базовой установкой уникального стендового комплекса для проведения системных исследований материалов первой стенки и дивертора при взаимодействии потоков плазмы при нагрузках от 0,1 до 20 МВт/м² в широком диапазоне экспозиций.



Уникальность комплекса КТМ

- Предусматриваемая возможность оперативного доступа в вакуумную камеру для смены элементов дивертора без нарушения высокого вакуума, параметры энергетических нагрузок, широкий набор используемых методов и диагностик позволят проводить на высоком уровне исследования и испытания в диверторном объеме и на первой стенке, что будет иметь важное значение для изучения материалов, обращенных к плазме, в программах ИТЭР, ДЕМО и для других экспериментальных и энергетических термоядерных реакторов.



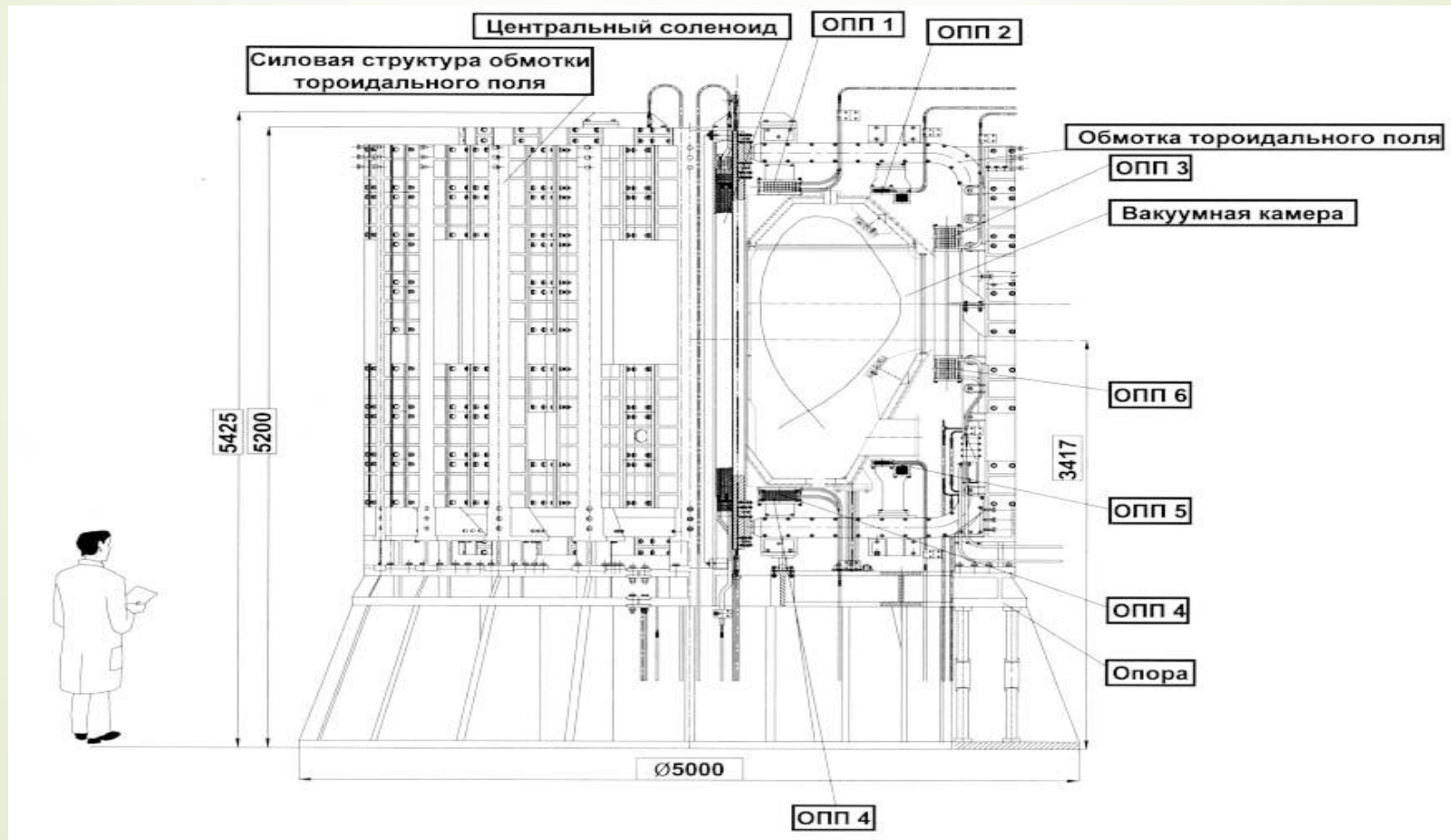
Задачи проекта КТМ

- Создание уникальной исследовательской и испытательной базы для разработки материалов и соответствующих технологий термоядерных реакторов (ДЭМО и ПТЭ), а также узлов и элементов реакторных камер;
- Исследования принципиальных плазмофизических характеристик компактных токамаков как термоядерной составляющей гибридных реакторов для наработки искусственного ядерного топлива, утилизации долгоживущих высокоактивных отходов ядерной энергетики деления и, возможно, для производства электроэнергии в подкритических системах;
- Отработка высокоресурсных конструкций дивертора и первой стенки, режимов ВЧ-нагрева и генерации неиндуктивного тока в интересах ИТЭР и ДЭМО;
- Организация международной лаборатории, как центра международного сотрудничества с Россией, ЕС, США, Японией, Китаем и Южной Кореей.

Общий вид токамака КТМ



Сечение токамака КТМ



1997-1998 гг.



Встреча Н.А. Назарбаева и Е.П. Велихова.
Алматы, 1997 год



Н.А. Назарбаев и Е.П. Велихов осматривают макет КТМ.
Алматы, 2001 год

Создание токамака КТМ было инициировано Президентом Республики Казахстан Н.А. Назарбаевым в результате обсуждения вопросов развития науки в Казахстане с академиком Российской Академии наук Е.П. Велиховым во время его визита в Казахстан. Решение о начале реализации инвестиционного проекта было принято Распоряжением Премьер-Министра Республики Казахстан от 22 июля 1998 года №143-р.



1999 -2003

проектирование установки и основных систем КТМ

Роль НИИЭФА им.Ефремова в создании КТМ

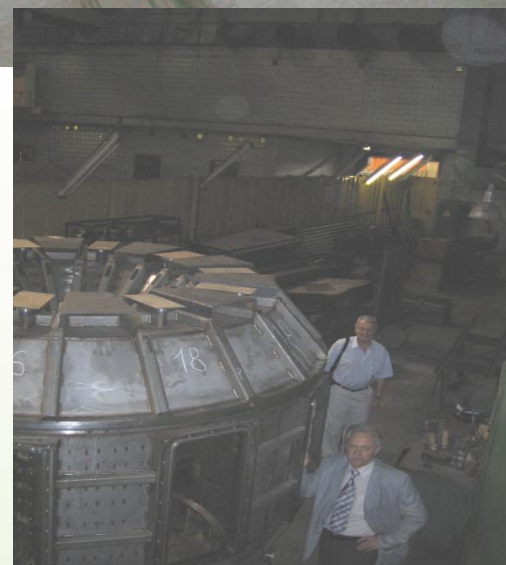
- Проектирование установки КТМ

(Эскизный и технический проекты)

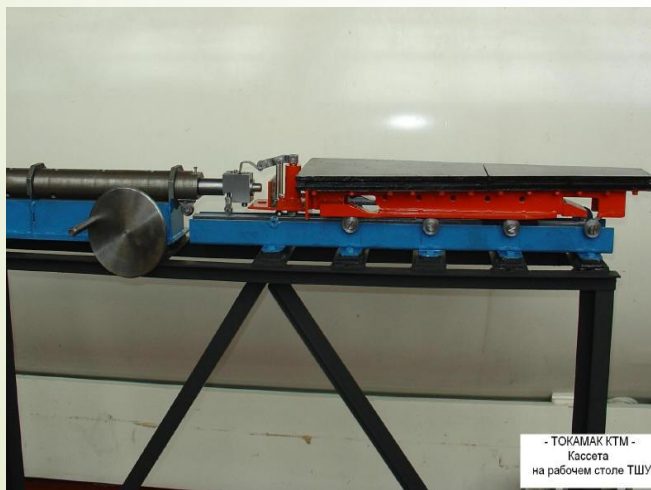
Завершение технического проекта – 2001 год

- Изготовление вакуумной камеры, электромагнитной системы и внутрикамерных элементов, включая приемно-диверторное устройство (ПДУ) и транспортно-шлюзовое устройство (ТШУ)

Изготовление КТМ на заводе в НИИЭФА



Изготовление ПДУ и ТШУ на заводе в НИИЭФА



Контрольная сборка установки КТМ на заводе-изготовителе в НИИЭФА им.Ефремова, 2007



Начало строительных работ на экспериментальном комплексе КТМ 2006 -2007гг.



Выгрузка установки КТМ на стендовом комплексе в г. Курчатове, декабрь, 2007 г.





Монтаж токамака КТМ



Вакуумная камера



Центральный соленоид



Основание токамака



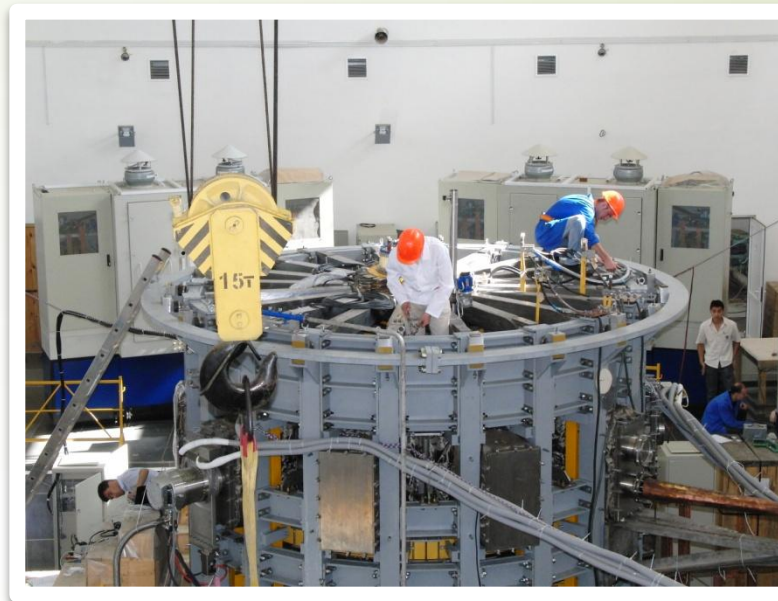
Токамак в сборе



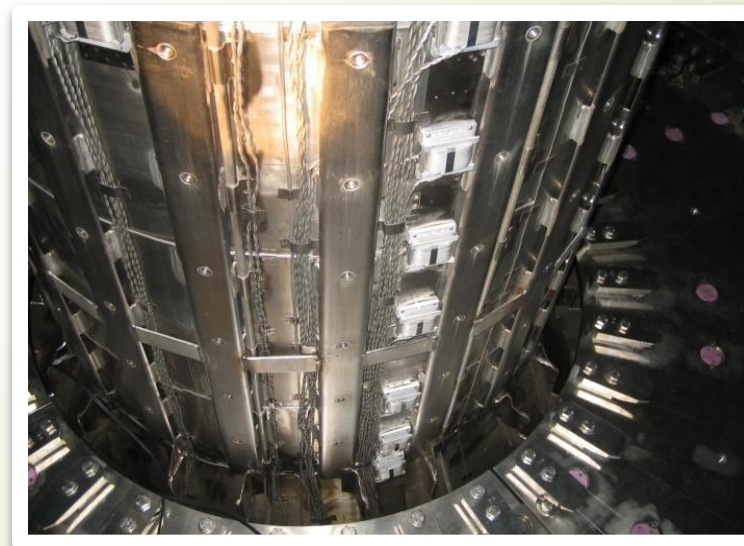
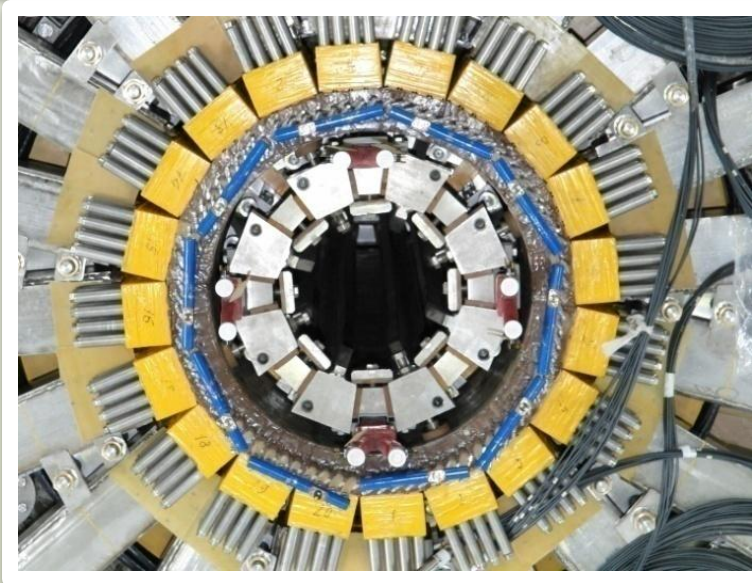
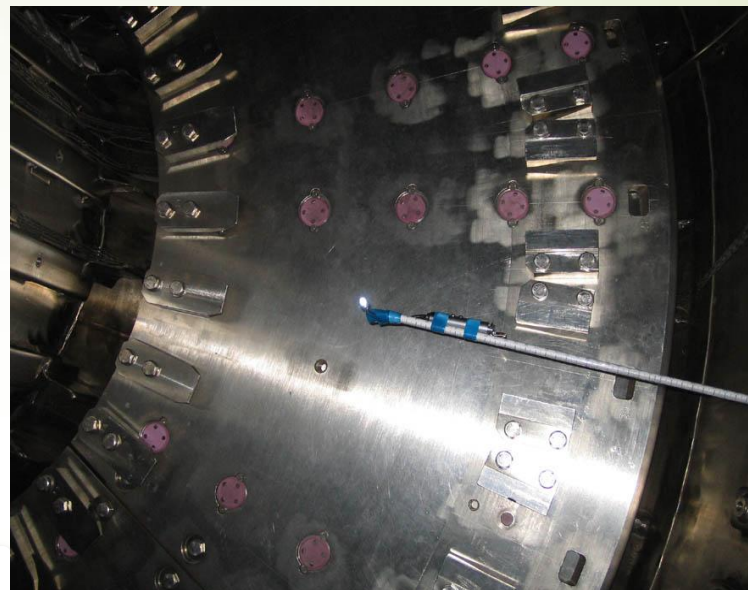
Процесс монтажа



Пусконаладочные работы 2009-2010 гг.



Элементы конструкции





Состав основных систем токамака КТМ





КТМ

Комплекс токамака КТМ



Подстанция



Лабораторный корпус и здание КТМ



Главный силовой трансформатор



Силовые кабельные линии

Система внешнего электроснабжения



Система внешнего электроснабжения.
ПС КТМ 220/10 кВ



Система внешнего электроснабжения.
Реконструкция ПС №51

Система электроснабжения

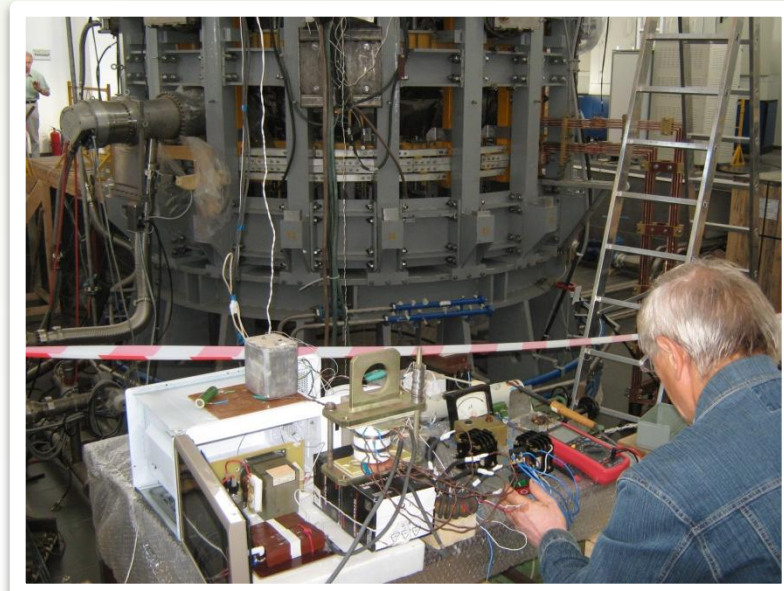


Главной трансформатор подстанции



Трансформаторы системы электроснабжения
электромагнитных обмоток

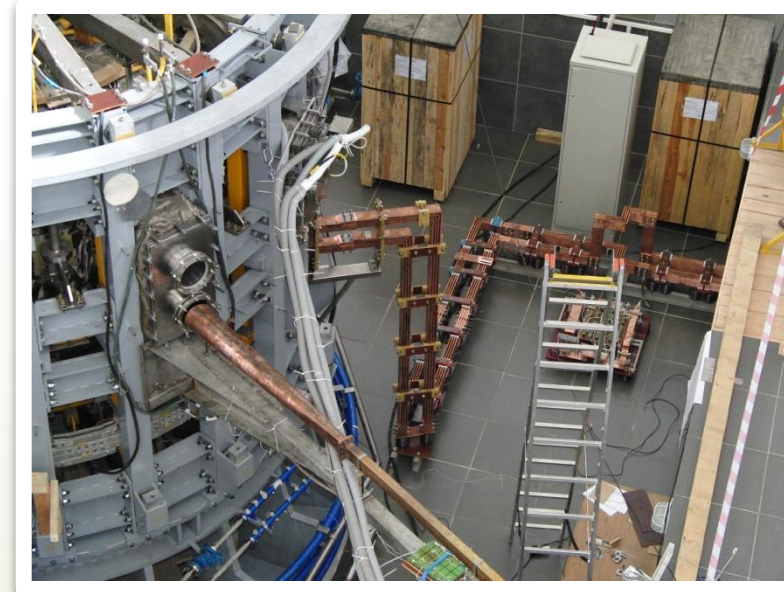
Система электроснабжения



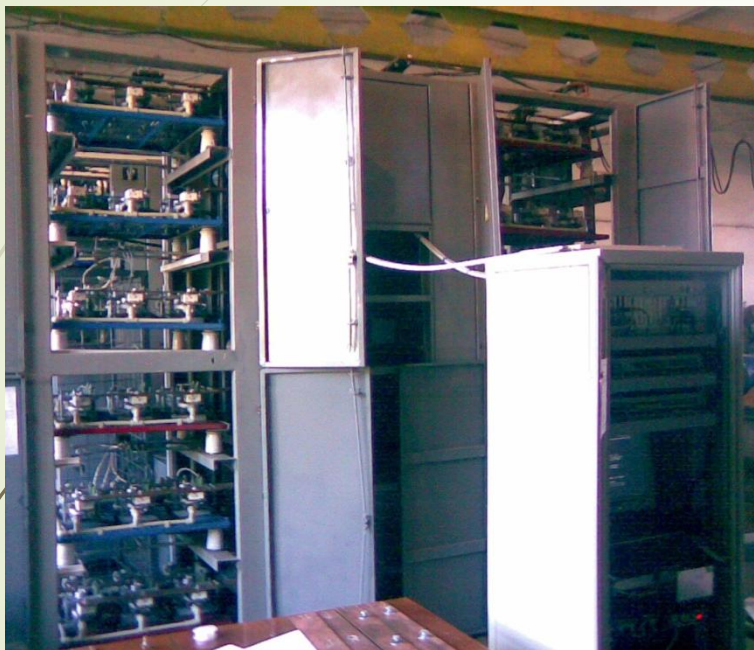
Монтаж систем электропитания и управления

Длительность плазменного разряда составляет около одной секунды. Для увеличения длительности до пяти секунд применяется дополнительный ввод энергии в плазму с помощью высокочастотных генераторов.

Электрическая мощность, потребляемая токамаком в течение плазменного разряда, составляет примерно 120 МВт.



Система импульсного электроснабжения КТМ



Блоки универсальных тиристорных преобразователей

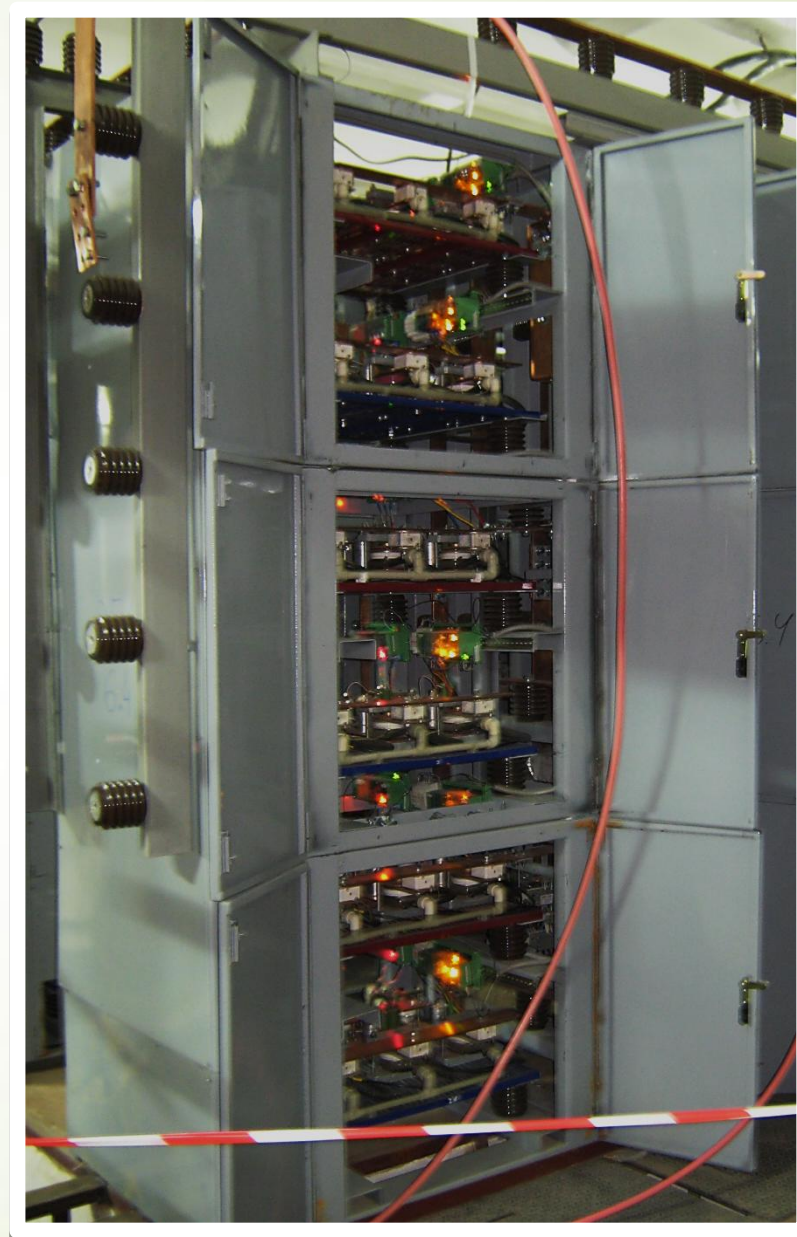
Преобразовательные трансформаторы и кабельная эстакада 10



Система электроснабжения



Шкафы тиристорных преобразователей системы электроснабжения электромагнитных обмоток



МОНТАЖ ВОДЯНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ



Оборудование вакуумной системы



Система ВЧ-нагрева плазмы КТМ



Макет ВЧ-генератора



ВЧ-антенна





Вакуумная камера КТМ

- ВК имеет тороидальную форму с цилиндро-коническим поперечным сечением, при этом средняя часть сечения – цилиндрическая, а верхняя и нижняя – усеченные конусы. Поперечное сечение ВК имеет высоту 2405 мм и ширину 1100 мм (включая наружные ребра жесткости). Внутренняя цилиндрическая часть ВК имеет радиус 367 мм и длину 1635 мм. Наружная часть состоит из верхней крышки с фланцами, наружного цилиндра и нижней части. Верхняя крышка высотой 370 мм состоит из внутреннего конуса, плоской части и внешнего конуса. Радиус наружного цилиндра 1450 мм, длина 890 мм. Нижняя часть ВК состоит из внутреннего конуса, плоского днища и наружного конуса. Толщина внутренней цилиндрической стенки ВК равна 3 мм, толщина наружной стенки 5 мм.



Вакуумная камера КТМ

Основные составляющие ВК КТМ :

- - оболочка с патрубками и опорной структурой;
- - стационарный лимитер;
- - витки пассивной стабилизации плазмы;
- - элементы системы резистивного прогрева;
- - датчики системы электромагнитной и технологической диагностик;
- - приемно-диверторное устройство (ПДУ);
- - транспортно-шлюзовое устройство (ТШУ).

Основные функции ВК:

- создание вакуумного объема с остаточным давлением не более $5 \cdot 10^{-8}$ торр, необходимого для формирования, нагрева и исследования плазмы;
- обеспечение без нарушения работоспособности $2 \cdot 10^4$ полномасштабных циклов разряда плазмы.

Два основных режима работы вакуумной камеры:

(а) – технологический режим прогрева оболочки; (200 С)

(б) – рабочий импульсный режим горения плазмы длительностью импульса ~ 4.7 секунд и частотой повторения ~ 900 секунд.

В режиме импульсного нагружения температуры ВК не должна превышать

250 °С, температурная неравномерность по оболочке ВК не должна превышать 70 °С.

Внутренняя поверхность ВК, а также ПДУ покрыты графитовыми пластинами марки FP-479.



Вакуумная камера КТМ

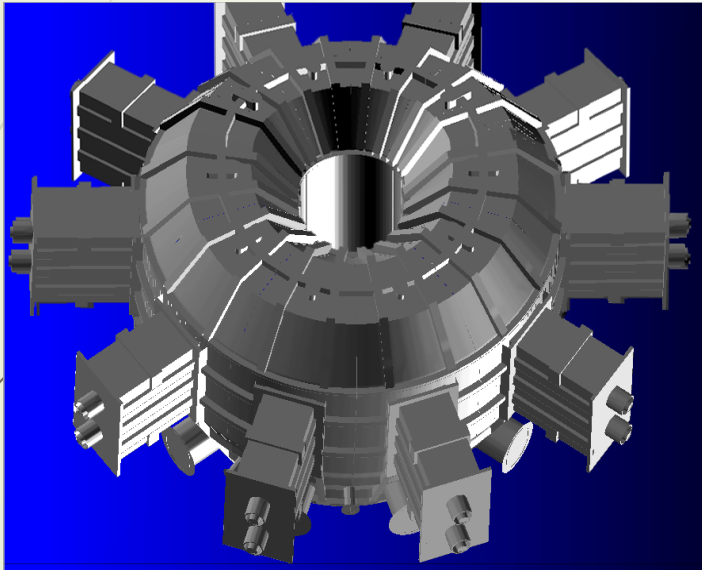
Внешний цилиндр ВК

Крышка ВК



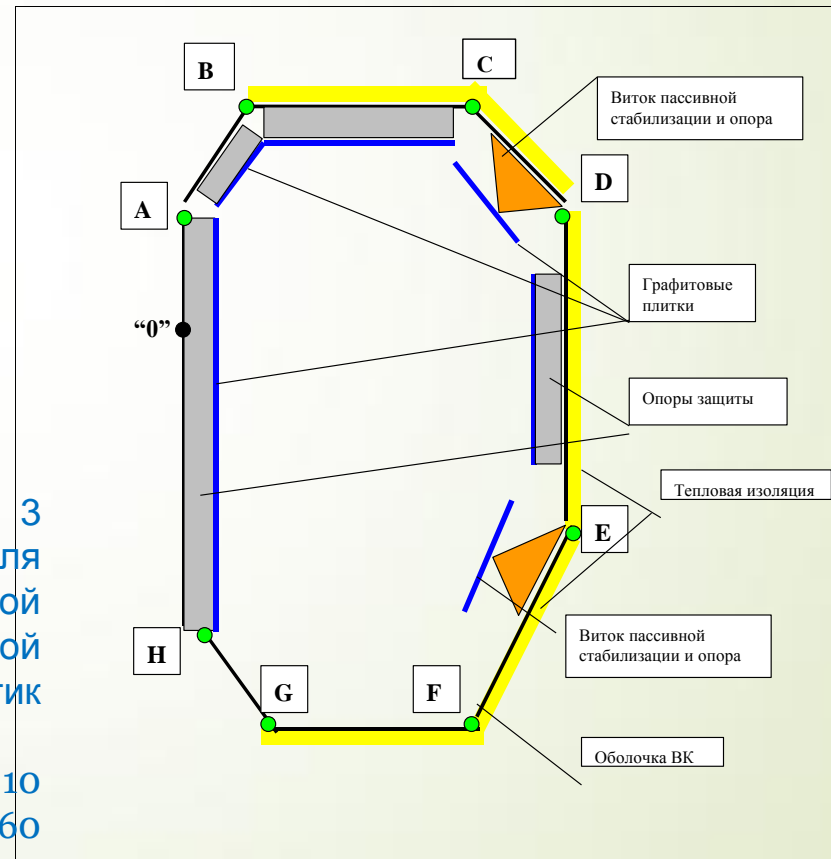


Вакуумная камера KTM



В нижней части камеры расположено 3 горизонтальных патрубка проходным сечением 350мм для загрузки пластин дивертора, диагностик диверторной области, дополнительного вакуумирования диверторной области, а также 4 патрубка Ду 80 для диагностик диверторной области.

В экваториальной плоскости камера имеет 10 прямоугольных патрубков проходным сечением 760×360 мм и длиной 700 мм.





Основные характеристики вакуумной камеры КТМ

Объем камеры	m ³	13,5
Площадь поверхности	m ²	33
Вес камеры с крышкой, трубопроводами и дивертором	t	12,5
Материал – нержавеющая сталь		08Cr18Ni12Ti
Электросопротивление в тороидальном направлении при 20°C	μΩ	86
Температура прогрева	°C	200±10
Активная составляющая мощности системы прогрева	kW	45

Электромагнитная система КТМ

Вакуумная камера токамака КТМ представляет собой цельносварную оболочку. Поэтому катушки тороидального магнитного поля выполнены разъемными. Это определяет техническое решение о разъемных катушках тороидального поля. Внутренние части катушек составляют центральную колонну и имеют контактные площадки для подсоединения внешних частей.

Электромагнитная система токамака КТМ состоит из обмоток тороидального поля, центрального соленоида и обмоток полоидальных полей и предназначена для создания магнитных полей обеспечивающих устойчивость и равновесие тороидального плазменного шнура. Магнитная система установки КТМ должна обеспечить на большом радиусе плазмы $R = 0,9$ м тороидальное магнитное поле $B_{\theta} = 1$ Тл, подъем и поддержание тока плазмы $|I_p| = 0,75$ МА в течение ~ 5 с, а также заданное положение X-точки в вакуумной камере.

Электромагнитная система КТМ

- ▶ Тороидальные магнитные обмотки, служащие для создания продольного тороидального магнитного поля с индукцией 1 Тл на оси плазмы.

Количество катушек -20. Каждая тороидальная катушка, содержащая 4 витка, имеет 3 электрических разъема и состоит из центральной колонны (прямолинейной внутренней ноги) и двух (верхней и нижней) внешних частей.

- Центральный соленоид с компенсирующими витками, создающий и поддерживающий ток в плазме (750 кА) в течение 5 с. Предназначен для инициирования и поддержания тока плазменного шнура. Центральный соленоид-индуктор предназначен для возбуждения и поддержания тока и устойчивой конфигурации плазменного шнура. Центральный соленоид состоит из 430 витков, намотанных четырьмя параллельными слоями на центральную оправку. Каждый слой имеет независимое водяное охлаждение для обеспечения требуемого температурного режима работы. Торцевые поверхности центрального соленоида - индуктора выравниваются с помощью изоляционных вкладышей и поджимаются специальными нажимными элементами.

Электромагнитная система КТМ

Полоидальные магнитные обмотки, используемые как для поддержания равновесия плазмы в процессе разряда и управления формой шнура, так и частично для поддержания тока в плазме. Обмотки полоидальных полей размещаются внутри тороидальных обмоток, катушек и крепятся к ним.

- ▶ Система быстрого управления положением шнура и X-точки в камере. Быстрое управление положением плазмы по вертикали обеспечивается током в обмотках HFC.
- ▶ Для обеспечения механической прочности нижние части тороидальных катушек крепятся к опорным колоннам и к нижним силовым структурам, верхние части катушек крепятся к верхним силовым структурам. Центральный соленоид размещается внутри центральной колонны тороидальных катушек и крепится снизу и сверху к опорным элементам. Величина полного потока через все катушки тороидального магнитного поля составляет 4,32 MA-витков. При 20 четырехвитковых катушках в каждом витке протекает ток $ITF1 \approx 54$ кА. Максимальная плотность тока (при равномерном распределении) ≈ 23 А/мм², температура за время протекания импульса тока в центральной зоне поднимается на 15°. Тороидальными катушками создается магнитное поле с индукцией $B_T = 1$ Тл на радиусе 0,9 м.



КТМ

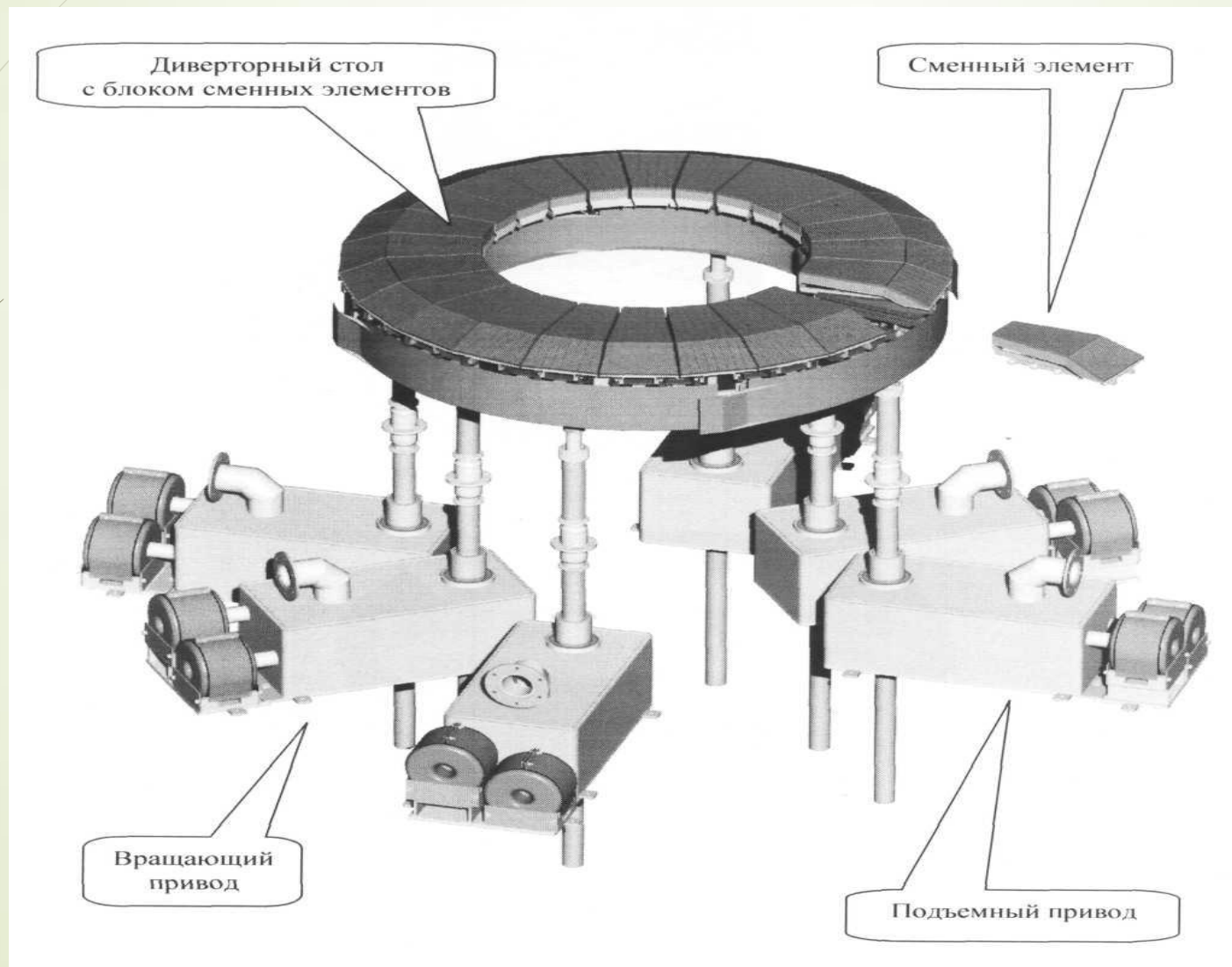
Подвижное диверторное устройство токамака КТМ



Подвижное приемно-диверторное устройство (ПДУ) обеспечивает позиционирование по вертикали и углу и замену всех диверторных пластин через шлюз.

Сменные элементы ПДУ подаются в зону загрузки-выгрузки за счет вертикальной подачи и поворота блока сменных элементов в горизонтальной плоскости.

Приемно-диверторное устройство



Технические характеристики ПДУ

Наименование	Размеры	Объем
Количество сменных элементов	n	24
Внутренний радиус блока элементов	R (mm)	540
Наружный радиус блока элементов	R (mm)	1015
Ширина сменного блока (max)	B (mm)	230
Ход вертикальной подачи	H (mm)	60
Угол поворота блока элементов в горизонтальной плоскости	ω (°)	360
Количество полномасштабных циклов разряда плазмы	----	20000
Количество срывов тока плазмы	----	1000
Периодичность работы	Циклов/час	5

Подвижное диверторное устройство токамака КТМ

Основные материалы ПДУ - это материалы трех типов:

- материал тугоплавкого покрытия (вольфрам, молибден, тантал и их сплавы, бериллий, углерод и его соединения). В настоящий момент используется графит FP-479 (аналог РГ-Т). Планируется использование модуля на основе литий-капиллярной системы.

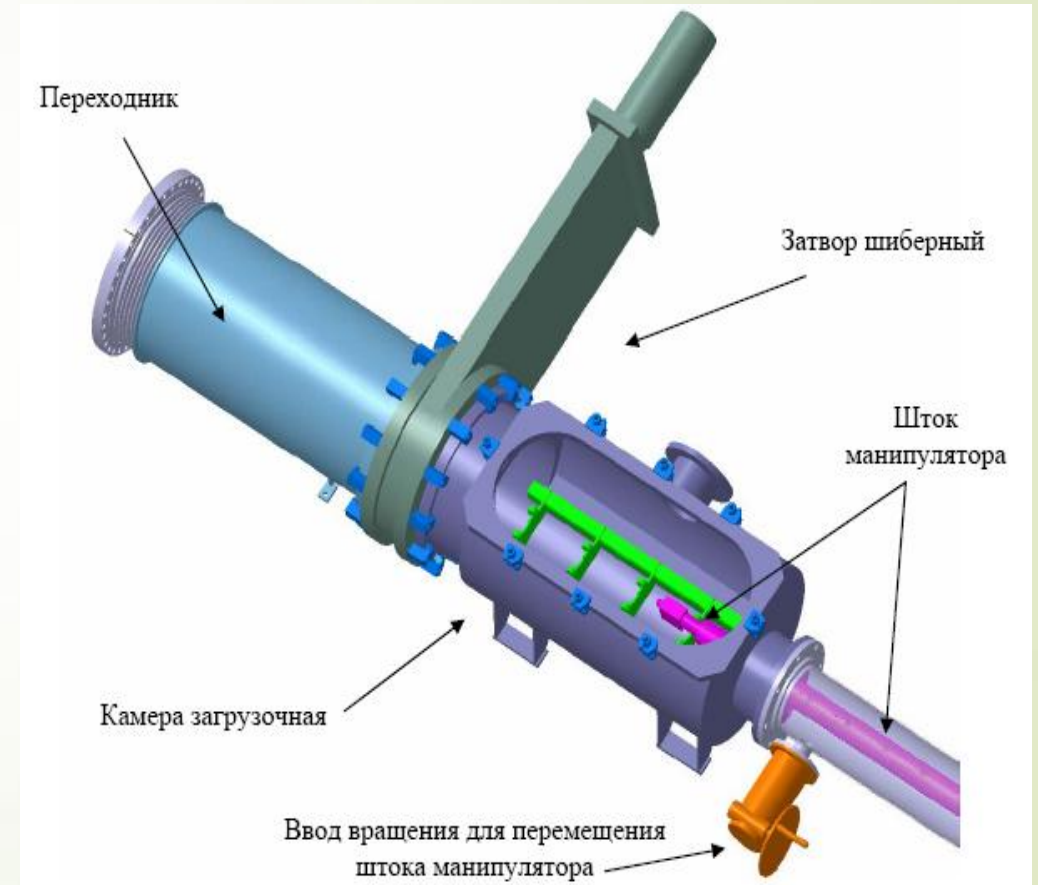
- материал теплопроводящей структуры -(техническая медь марки МВ или бескислородная медь марки МО)

- материал опорной конструкции – сталь ЧС-33.



Транспортно-шлюзовое устройство (ТШУ)

- ▶ ТШУ состоит из следующих элементов:
- ▶ Шлюзовой камеры с герметично закрывающейся крышкой
- ▶ Манипулятора
- ▶ Роликовой направляющей
- ▶ Вакуумного затвора с дистанционным управлением
- ▶ Сильфонной развязки



Система дополнительного нагрева плазмы КТМ

- ▶ Для дополнительного нагрева предлагается использовать систему ИЦР-нагрева плазмы.
- ▶ Система ВЧ-нагрева предназначена для ввода дополнительной мощности в плазму при разряде и служит для увеличения температуры плазмы и тепловых потоков в SOL и диверторный объем.
- ▶ Основные элементы : ВЧ антенны, система генерации и передачи на антенны ВЧ-мощности, источники анодного и катодного питания, система охлаждения анодов и сеток мощных генераторных триодов, системы генерации, подсистемы контроля поглощенной в плазме ВЧ-мощности. Система обладает следующими параметрами:
 - ▶ - выходная мощность - 4×2 МВт;
 - ▶ - рабочая частота - 13 ± 1 МГц;
 - ▶ - длительность импульса ≤ 5 с;
 - ▶ -

Система ВЧ-нагрева плазмы КТМ



Макет ВЧ-генератора



ВЧ-антенна



Система физических диагностик

- ▶ **Диагностики первой очереди** (будут использоваться при проведении физического пуска) : система магнитных зондов, обзорный болометр и многоканальный монитор излучений (измерение радиационных потерь), бессбойный интерферометр среднечордовой плотности и двухчастотный импульсный рефлектометр (измерение плотности и градиента плотности), обзорный спектрометр и монохроматор (переход L→H режим, контроль примесей), скоростная видеокамера.
- ▶ **Диагностики второй очереди**: многоканальный бессбойный интерферометр, импульсный рефлектометр с перестраиваемой частотой (профиль плотности плазмы), спектрометр высокого разрешения (контроль ионной температуры), многоканальный рентгеновский спектрометр (измерение профиля электронной температуры), ИК-пирометр и 4-х канальный детектор ИК диапазона, ленгмюровские зонды (диагностика скреп-слоя) и др.

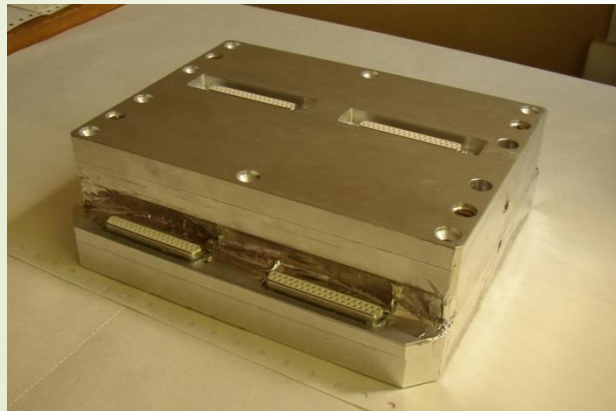
Физические диагностики



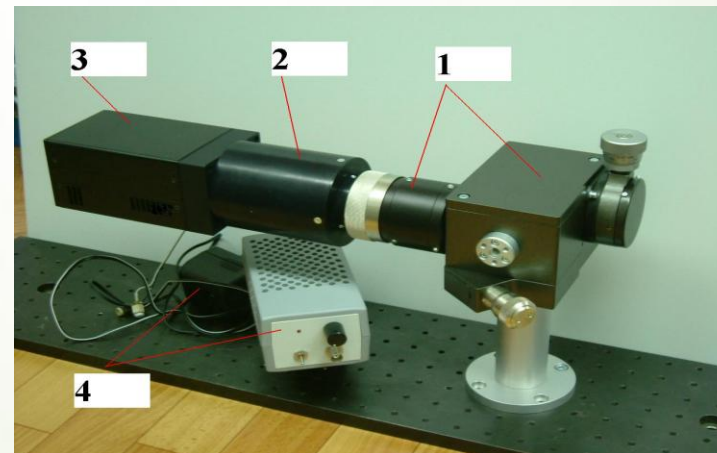
Импульсный радар-рефлектомер



Обзорный (интегральный) болометр

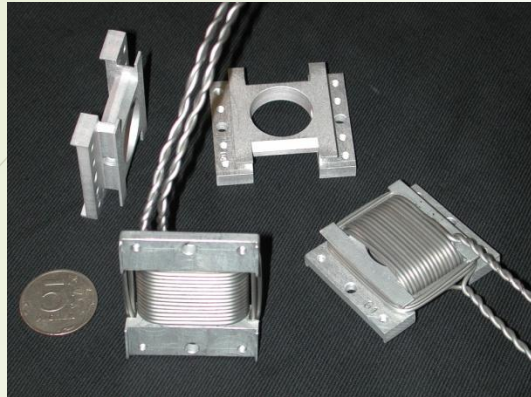


Монитор профиля электронной температуры.

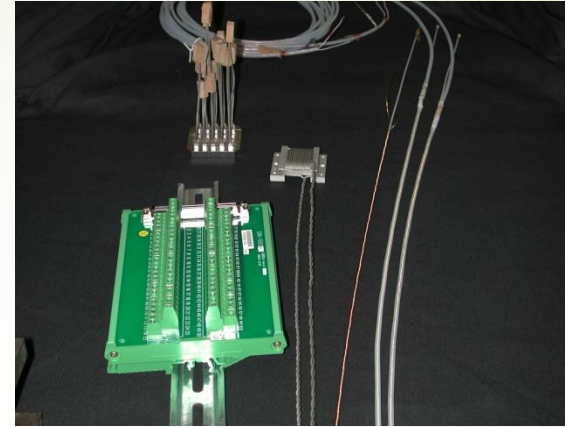


Обзорный спектрометр

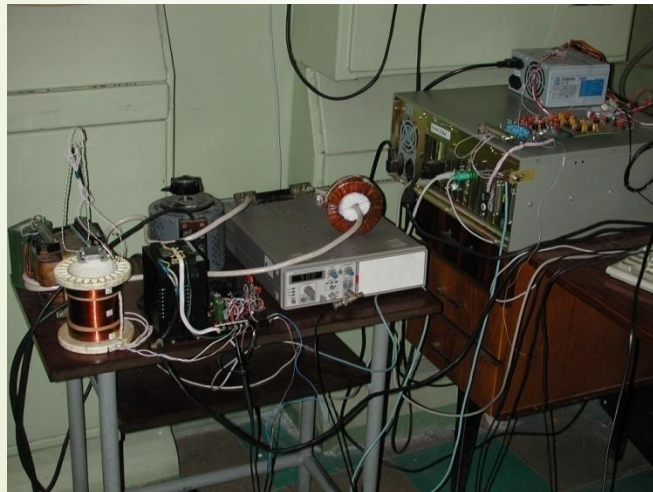
Технологическая электромагнитная диагностика



Магнитные зонды



Магнитный зонд, пояс Роговского

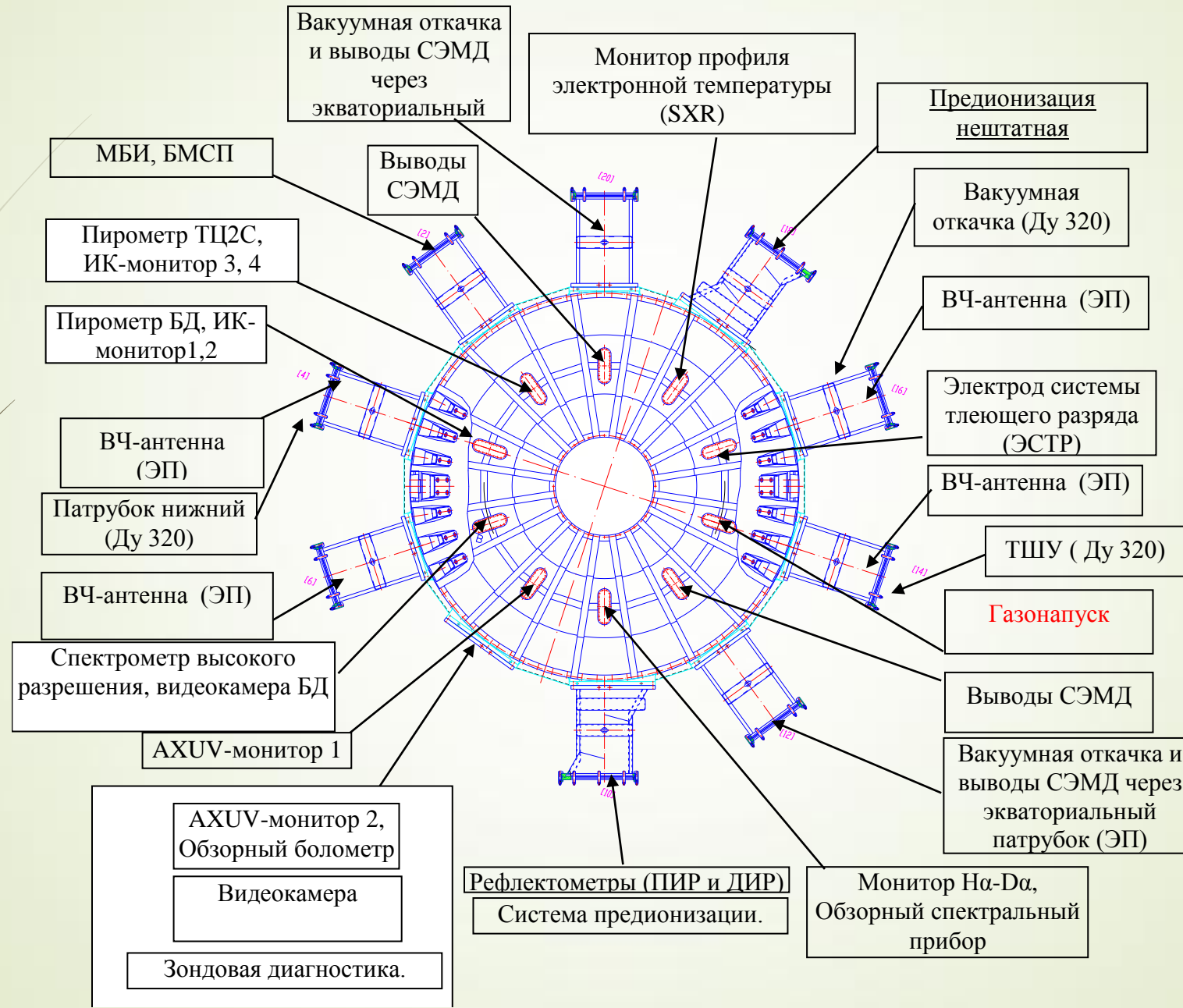


Стенд для калибровки поясов Роговского и снятия амплитудно и фазо - частотных характеристик магнитных зондов



Прецизионный магнит для калибровки магнитных зондов

Распределение диагностических систем по патрубкам.



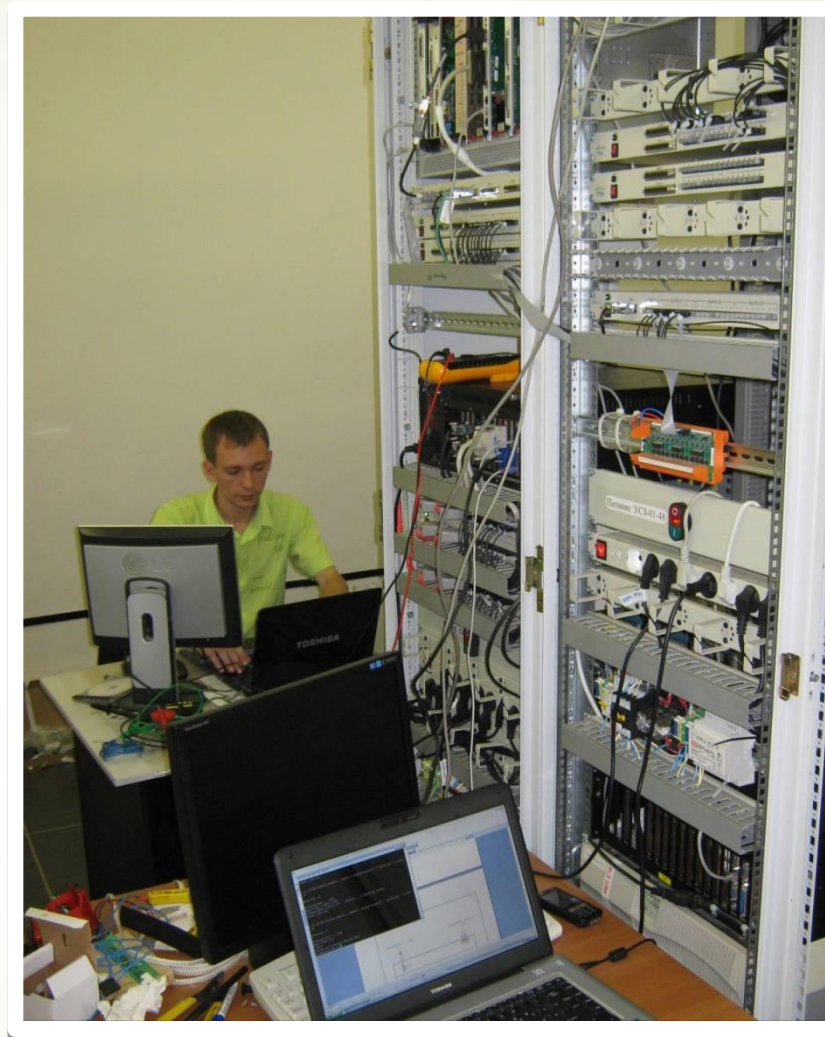
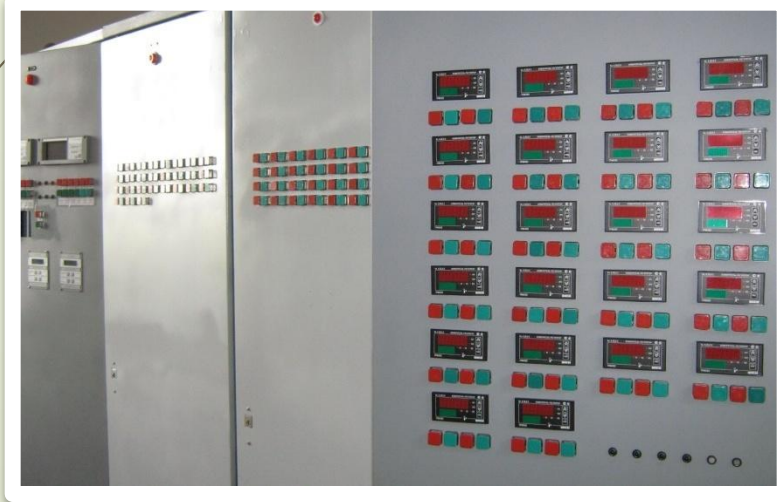


Система автоматизации

Предназначена для обеспечения контроля и управления технологическими процессами основных и вспомогательных систем токамака во всех режимах его работы: режим текущей эксплуатации, предпусковой режим, пусковой режим, послепусковой режим.

САЭ служит для сбора, измерения, обработки, архивации и представления диагностической и технологической информации при подготовке к экспериментам и по их окончанию, для синхронизации работы установки и защиты оборудования от выхода из строя в нештатных ситуациях.

Система автоматизации

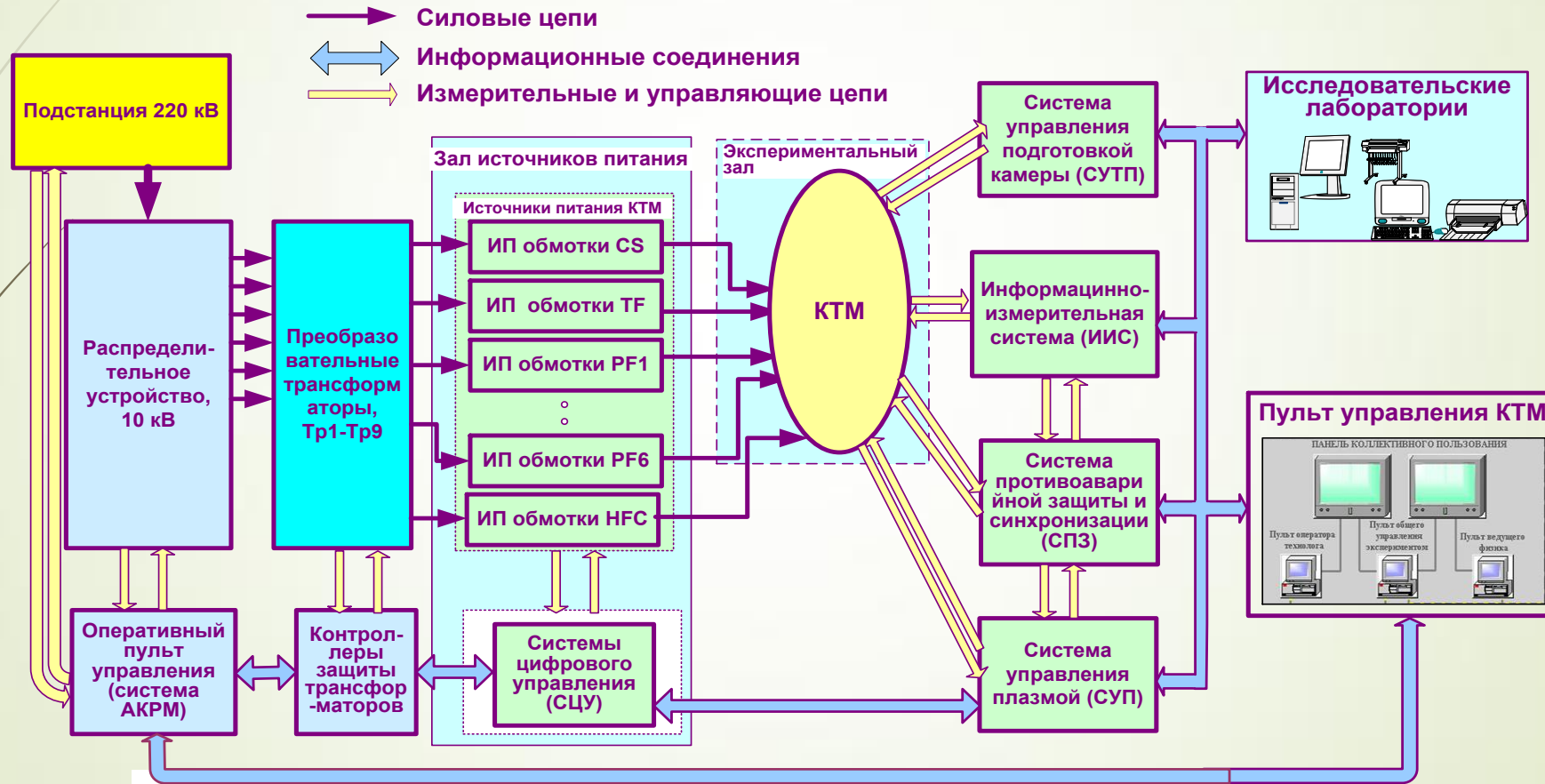


Управление стендовым комплексом КТМ обеспечивается системой автоматизации экспериментов (САЭ), построенной на базе современных компьютерных средств.

Оборудование системы автоматизации эксперимента



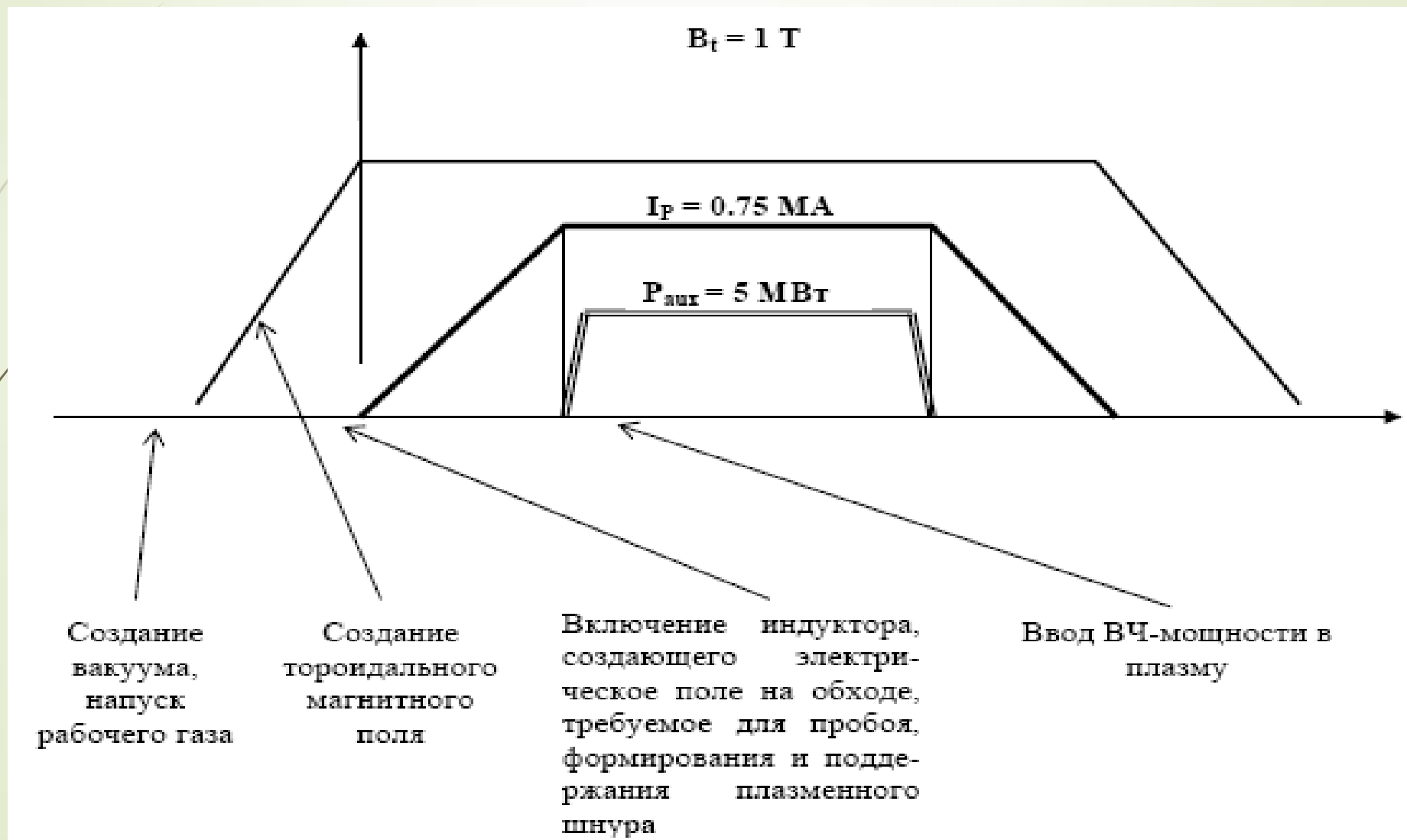
Структура системы автоматизации экспериментов токамака КТМ





Информация о параметрах плазмы, магнитных полей и элементов конструкции токамака КТМ в процессе проведения экспериментов формируется с помощью физических и технологических диагностик и выводится на панель коллективного пользования.

Сценарий и режимы работы КТМ.



Расчеты сценариев горения плазмы

- Анализ и расчеты для токамака КТМ проводились на основе физической базы данных ИТЭР, с использованием кодов SCENTO, SCENPLINT, DINA и скейлингов для энергетического времени удержания плазмы τ_E ИТЭР, $NA-\beta_N$, T-11 и др.
- Пробой и старт разряда инициируется вблизи внешней стенки вакуумной камеры. Область пробоя имеет вид тора квазикруглого сечения с $R_0 = 1.1$ м и $a_0 = 0.2$ м, а напряжение пробоя 8 В. Электрического поля в зоне пробоя достигает $E \sim 1.2$ В/м тороидальном магнитном поле $B_t \sim 0.8$ Тл. Уровень рассеянных магнитных полей не превышает $\sim (5 - 10^{-4})$ Гс, а требуемые для пробоя давление газа $p_0 \sim 2$ мПа. Мощность вводимого для предионизации и поддержания ионизационного состояния плазмы (СВЧ-излучения) должна составлять 150-200 кВт
- Расчёты начальной стадии разряда приведены по коду TRANSMAK.
- На стадии подъема тока плазмы ($I_p \square 40 \square 50$ кА) и формирования плазменной конфигурации расчёты проводились с помощью кода DINA.

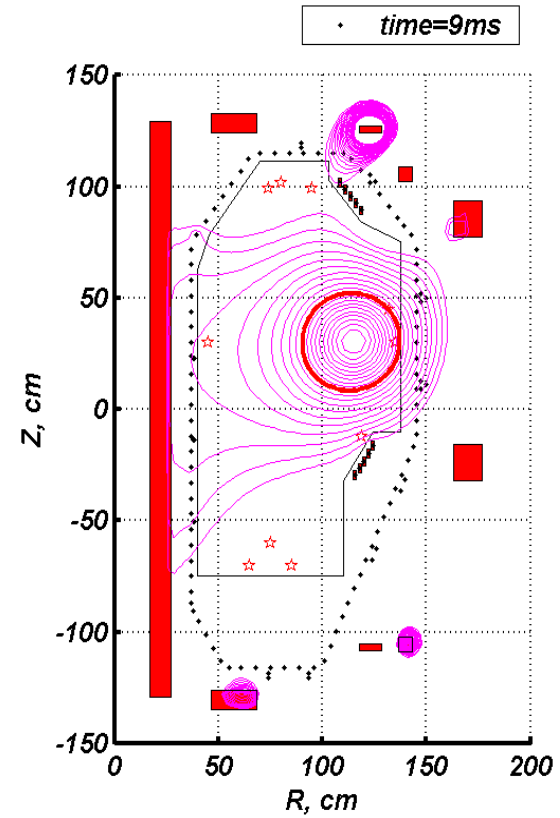
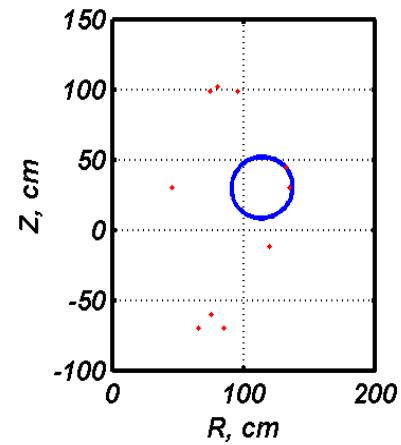
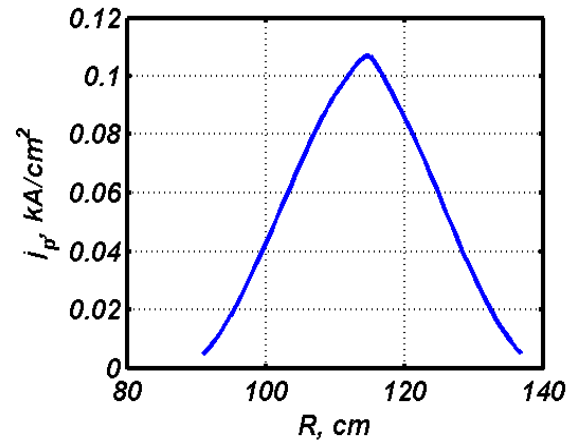
Параметры разряда плазмы КТМ

t, ms	9,0	259,0	899,0	4500,0
I_p, kA	56,0	700,0	750,0	750,0
R, cm	115,0	89,0	90,0	90,0
a, cm	21,0	45,2	45,1	45,0
li	1,005	0,88	0,96	0,7
q_{ax}	1,28	0,96	0,94	1,01
q_b	2,96	3,89	3,78	4,21
β_p	0,54	0,15	0,16	1,17
β_t, %	0,199	0,917	1,00	4,0
β_N	0,7	0,55	0,60	2,3
n_e, 10²⁰m⁻³	0,1	0,5	0,5	0,5

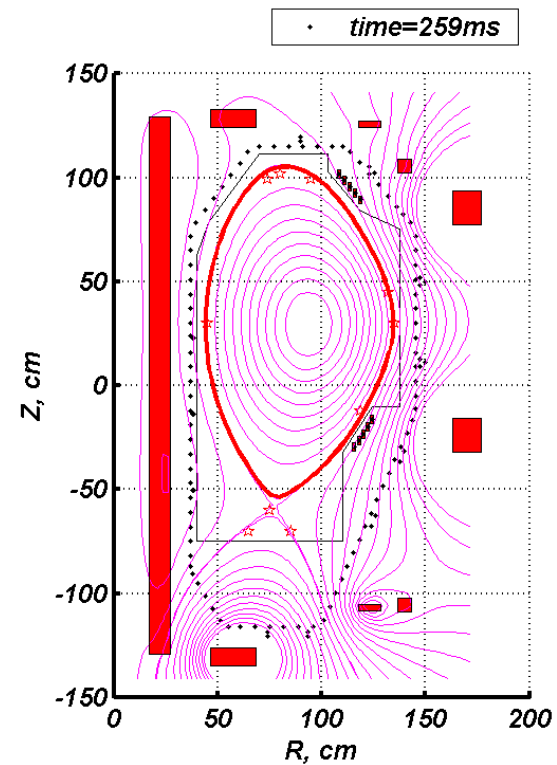
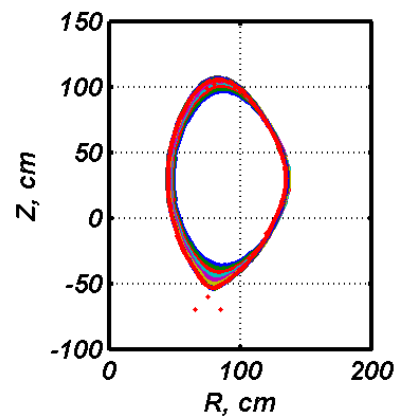
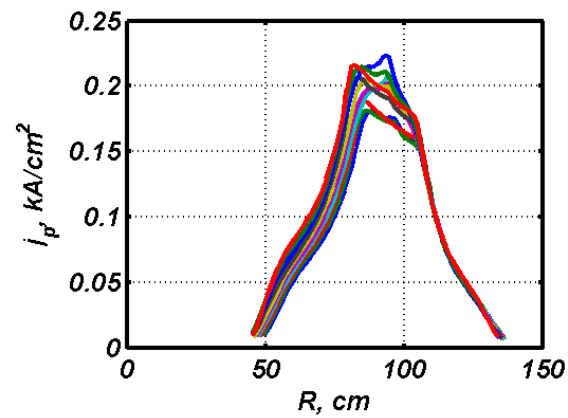
Параметры разряда плазмы КТМ

t, ms	9,0	259,0	899,0	4500,0
Te axis,eV	414,1	732,6	816,6	3079,0
<Te>, eV	156,8	283,3	308,7	1220,0
Ti axis, eV	218,6	596,7	671,8	2360,0
<Ti>, eV	114,4	253,9	276,7	1060,0
τ_E, ms	5,1	38,7	40,7	30,0
IBS, kA	4,0	35,0	38,0	200,0
PRF, MW	-	-	5,0	5,0
Ures , V	2,3	1,6	0,2	0,2

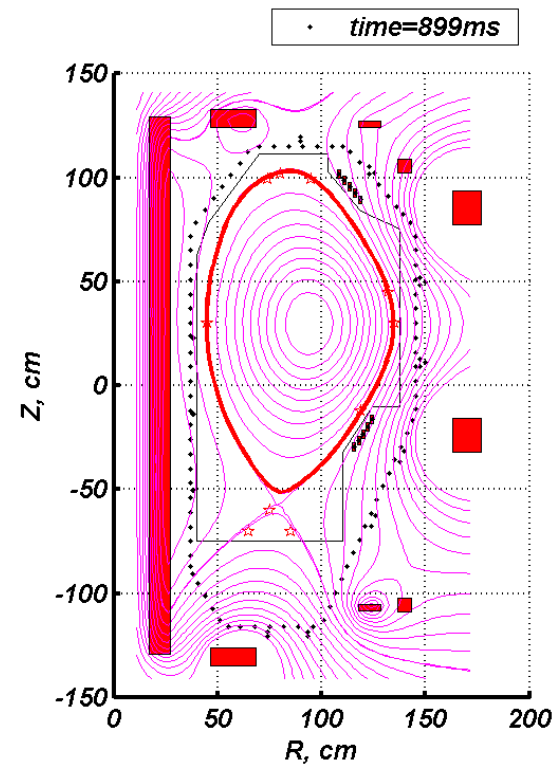
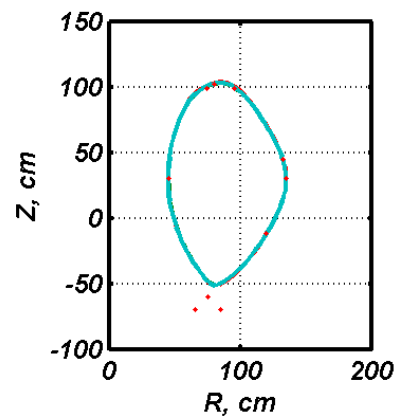
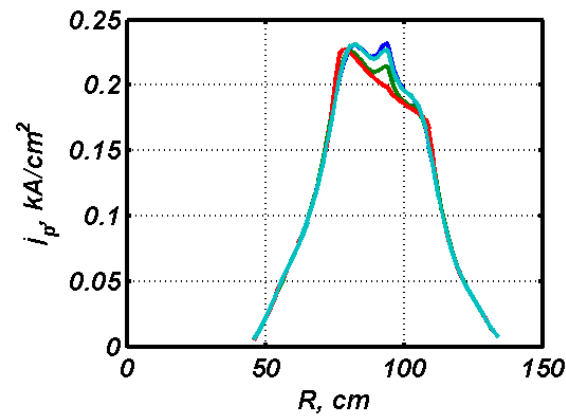
Конфигурация плазмы на начальной стадии развития разряда




Конфигурация плазмы на момент времени $t=259$ мсек.



Конфигурация плазмы на конечной стадии пробоя при омическом нагреве плазмы в момент времени $t=899$ мсек.





Подготовка ВК к проведению экспериментов

Осуществляется за счет следующих технологических систем:

1. Омического и индукционного прогрева
2. Плазменный прогрев вакуумной камеры
3. Тлеющего разряда и боронизации вакуумной камеры
4. Предионизации плазмы

Система омического и индукционного прогрева ВК

- Служит для удаления паров воды с поверхности вакуумной камеры и должна обеспечивать прогрев металлических частей вакуумной камеры до температуры 200°C. Подсистема омического прогрева осуществляет прогрев внешней оболочки вакуумной камеры с помощью омических нагревателей. Подсистема индукционного прогрева осуществляет прогрев внутренней оболочки вакуумной камеры с помощью вихревых токов, наводимых переменным током, питающим обмотку центрального соленоида.

Плазменный прогрев

Плазменный прогрев реализуется поджигом индукционного разряда в рабочем газе. В вакуумной камере организуется плазменный разряд с параметрами: $I_p = 100 \text{ кА}$, $R = 0,86 \text{ м}$, $A = 3$. Будут использованы: источник питания центрального соленоида для создания магнитного потока, необходимого для зажигания и поддержания разряда в камере токамака при давлении рабочего газа в диапазоне $3 \cdot 10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$, и источник питания ОТП для создания тороидального поля величиной 200- 300 Гс на радиусе $R = 0,9 \text{ м}$.

Система тлеющего разряда и боронизации ВК

- ▶ Электротехническое устройство, обеспечивающее зажигание тлеющего разряда в камере токамака в рабочем или инертном газе и дозированный напуск газа, необходимого для осуществления процесса боронизации (карборан).
- ▶ Устройство тлеющего разряда собирается по 2-х электродной схеме и обеспечивает при давлении в камере $5 \div 10 \times 10^{-2}$ Па в среде инертного газа плотность тока $0,1 \div 1,0 \times 10^{-3}$ А/см².

Система предионизации плазмы

предназначена для резонансного ввода мощности в область пробоя (электронно-циклотронный резонанс – ЭЦР) с целью облегчения старта разряда в токамаке КТМ.

- Для системы предионизации используется магнетрон мощностью 100 кВт и частотой излучения 140 ГГц. В состав системы входит источник питания с формирующей линией, генератор СВЧ-диапазона, волноводы, антенна и система управления и синхронизации.

Режим омического нагрева плазмы

Эксперименты в этом режиме позволят:

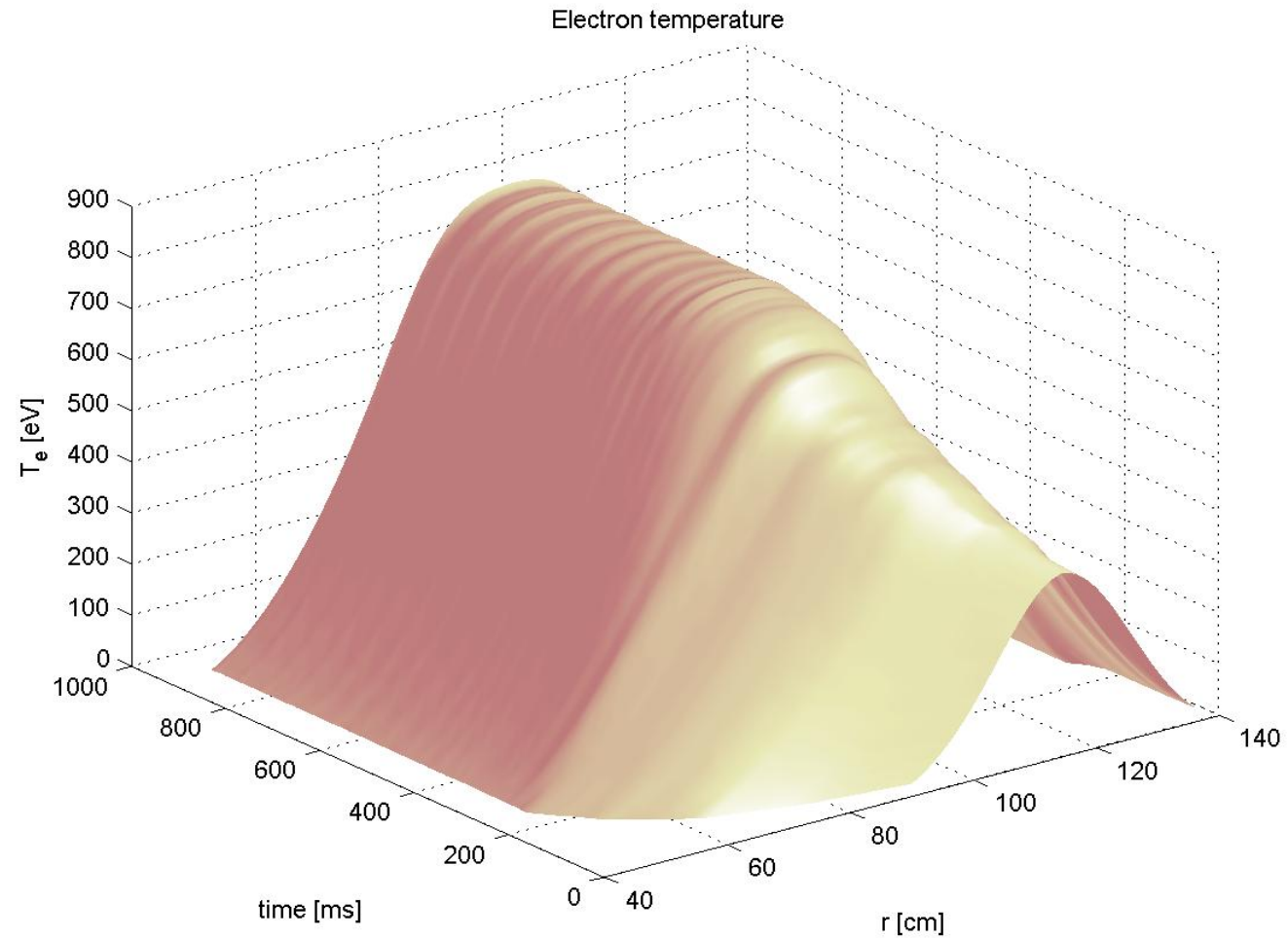
- Отработать наиболее сложные вопросы старта тока, его устойчивого подъема до выхода на плато и перехода в стадию устойчивого поддержания плазменного шнура.
- отладить системы управления токамаком, системы поддержания равновесия плазменного шнура обратными связями, физических и технологических диагностик, работу диверторного устройства.

Моделирование процессов в плазме и расчеты ее параметров проводились кодом DINA

Режим омического нагрева плазмы

- ▶ Переход от лимитерной конфигурации к диверторной происходит после касания плазмы внутреннего обвода вакуумной камеры при этом малый радиус достигает ~ 46 см.
- ▶ Средние температуры электронов и ионов в плазме к моменту выхода тока на плато составляют соответственно – 380 эВ и 330 эВ, в центре плазмы температуры около 950 эВ и 780 эВ, соответственно.
- ▶ Длительность плазмы 1 сек., мощность омического нагрева ~ 1 МВт

Профиль T_e при омическом нагреве ПЛАЗМЫ



Сценарий ввода ВЧ-мощности

Используется ввод ВЧ мощности в диапазоне частот ионно-циклотронного резонанса (ИЦР-нагрев),

Состав плазмы – H-D смесь с концентрацией, управляемой в диапазоне $n_H/n_D=20-40\%$; желательно присутствие $<1-2\%$ добавки ионов с $Z/A < 1/2$ (бора);

Система генерации – четыре идентичных модуля, нагруженных на отдельные антенны; выходная ВЧ мощность единичного модуля – 2 МВт; рабочие частоты модулей в диапазоне 13 ± 0.5 МГц.

Сценарий ввода ВЧ-мощности

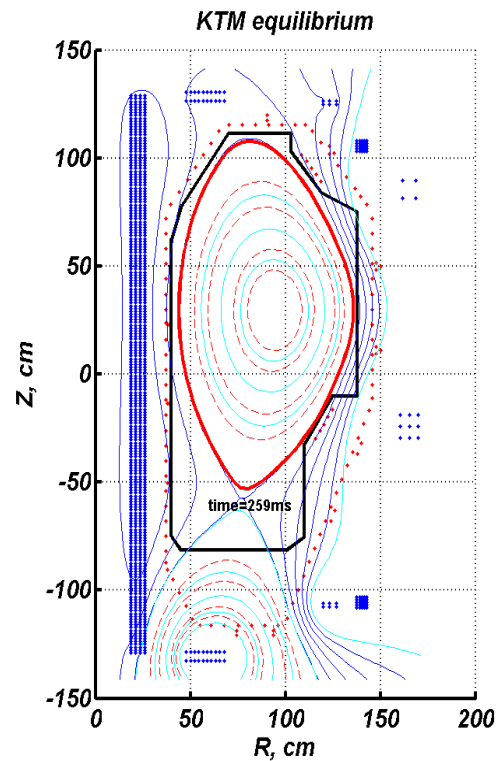
- Полная ВЧ мощность, введенная в плазму – $P_{\text{изл}} \cong 7 \text{ МВт}$, соответствует $P_{\text{погл}} = 5 \text{ МВт}$ мощности, поглощенной в центральных областях плазмы с учетом ~30% возможных потерь.
- Система возбуждения – четыре одновитковых петлевых антенны, размещаемых со стороны слабого тороидального магнитного поля (в больших горизонтальных патрубках установки)

Параметры плазмы при ВЧ-нагреве

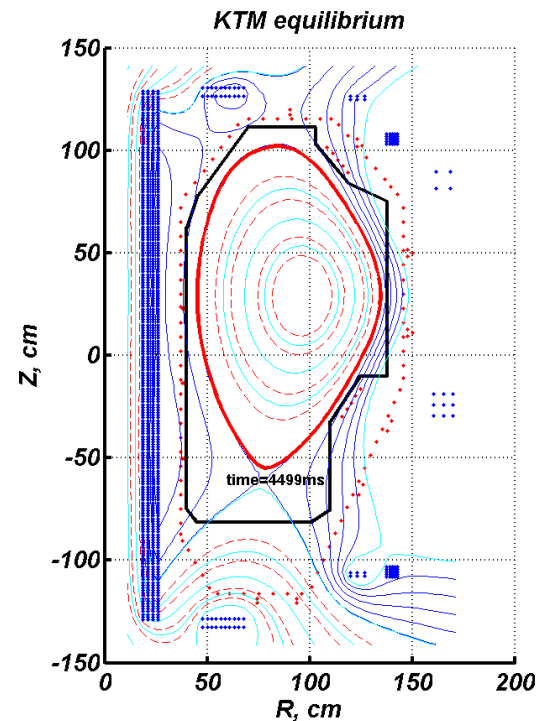
- ▶ Доли ВЧ-мощности, поглощаемые ионами и электронами, равны.
- ▶ температуры электронов T_e и ионов T_i в центре плазменного шнура $\sim 3\div 4$ кэВ.



Конфигурация плазмы при ВЧ-нагреве

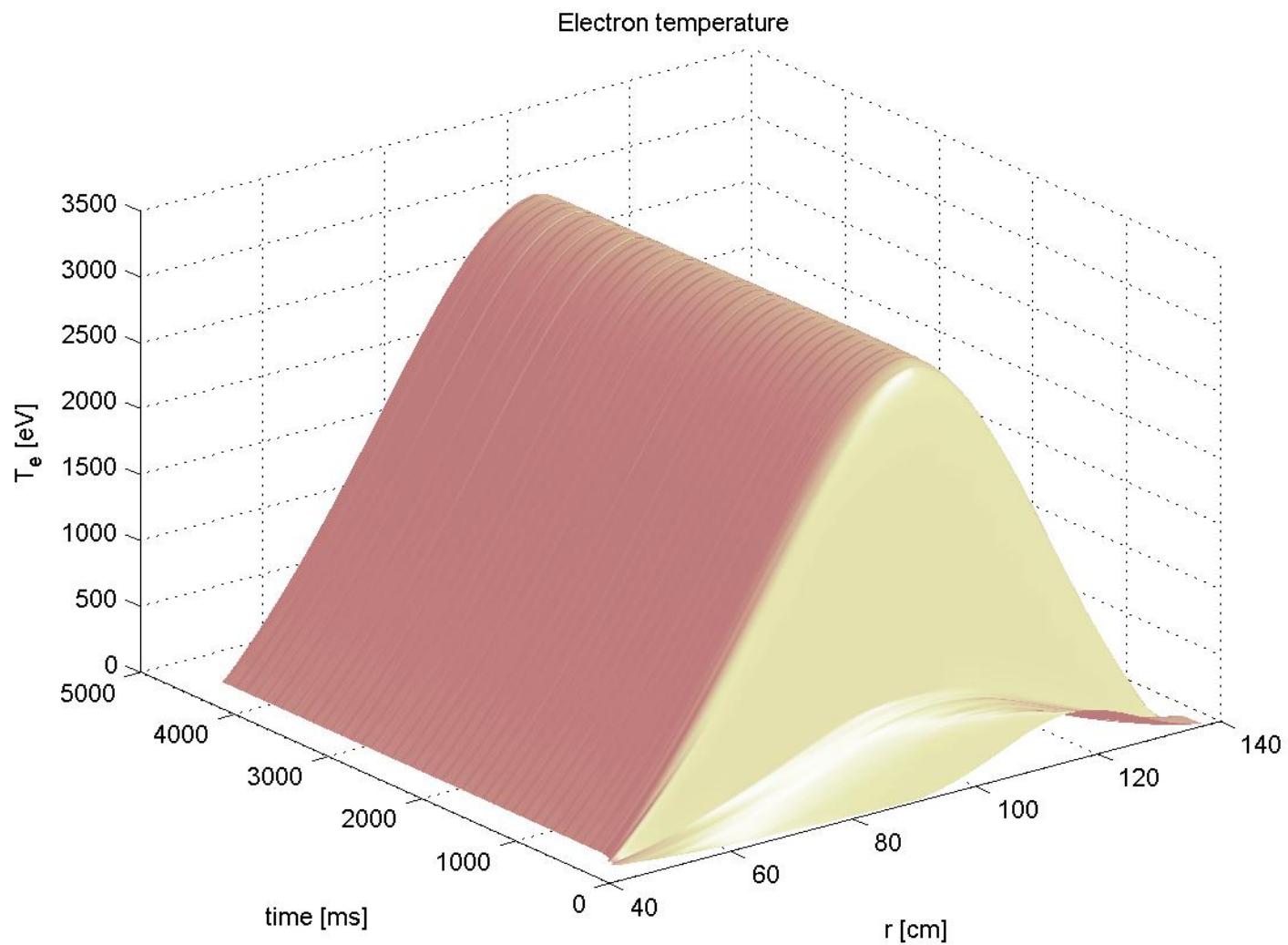


Конфигурация плазмы на момент окончания ввода тока и формирования одно-нулевой диверторной конфигурации



Конфигурация плазмы на момент окончания плато тока ($t=4499$ ms)

Профиль T_e при ВЧ-нагреве.



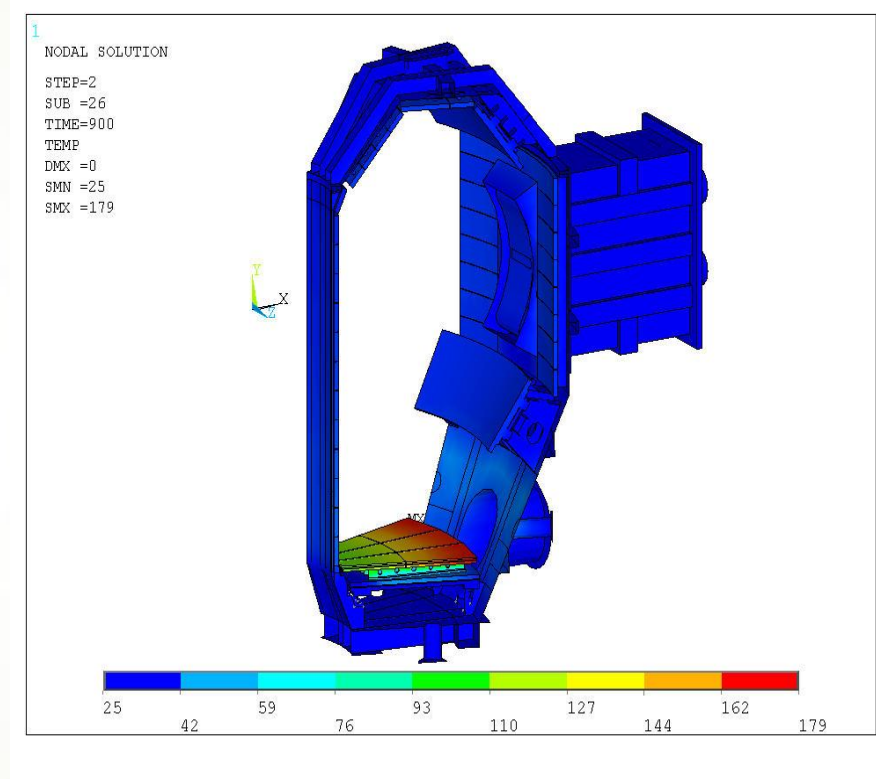
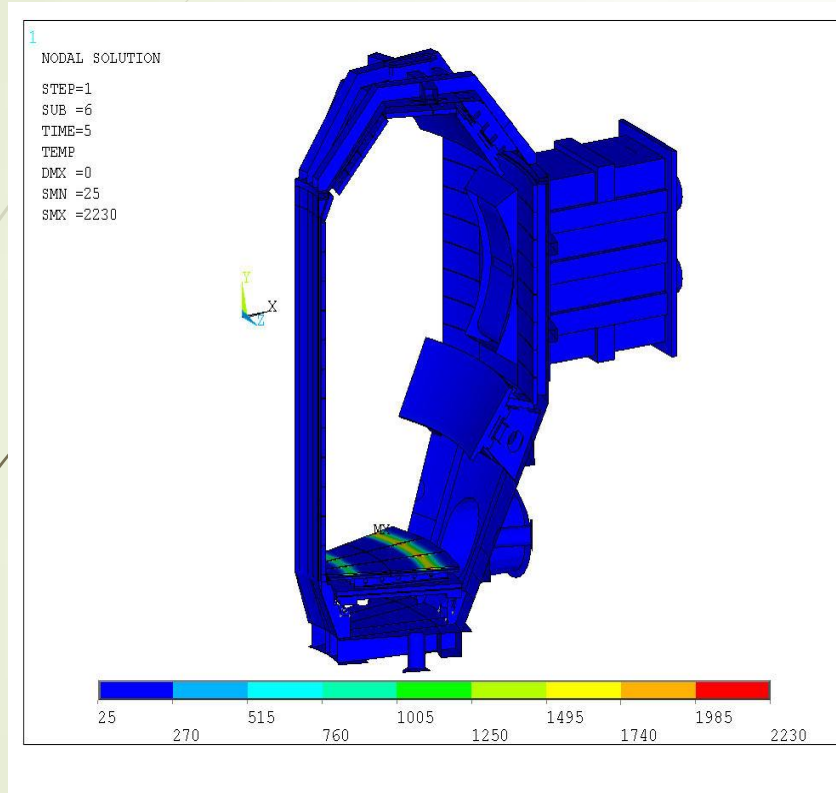


Условия работы конструкционных материалов КТМ

- ▶ Температурные режимы работы материалов КТМ
- ▶ Штатный режим работы. Параметры плазмы.
- ▶ Режимы срыва плазмы



Результаты расчета. Режим импульсного нагружения



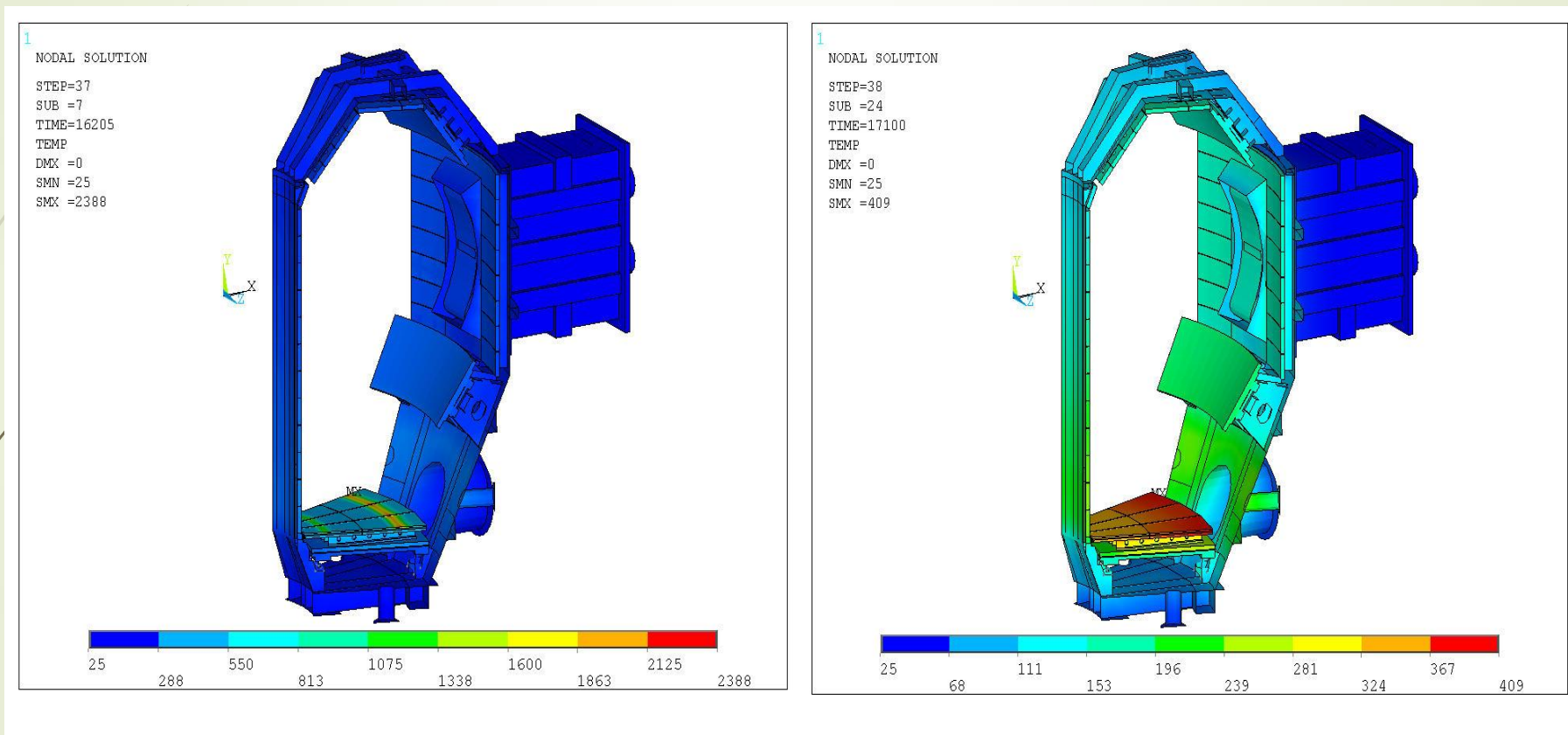
**Температурное состояние оболочки ВК и внутрикамерных
компонентов в конце**

(а) 1-го импульса (5-я секунда)

**(б) 1-й паузы (900-я
секунда)**



Результаты расчета. Режим импульсного нагружения



**Температурное состояние оболочки ВК и внутрикамерных
компонентов в конце**

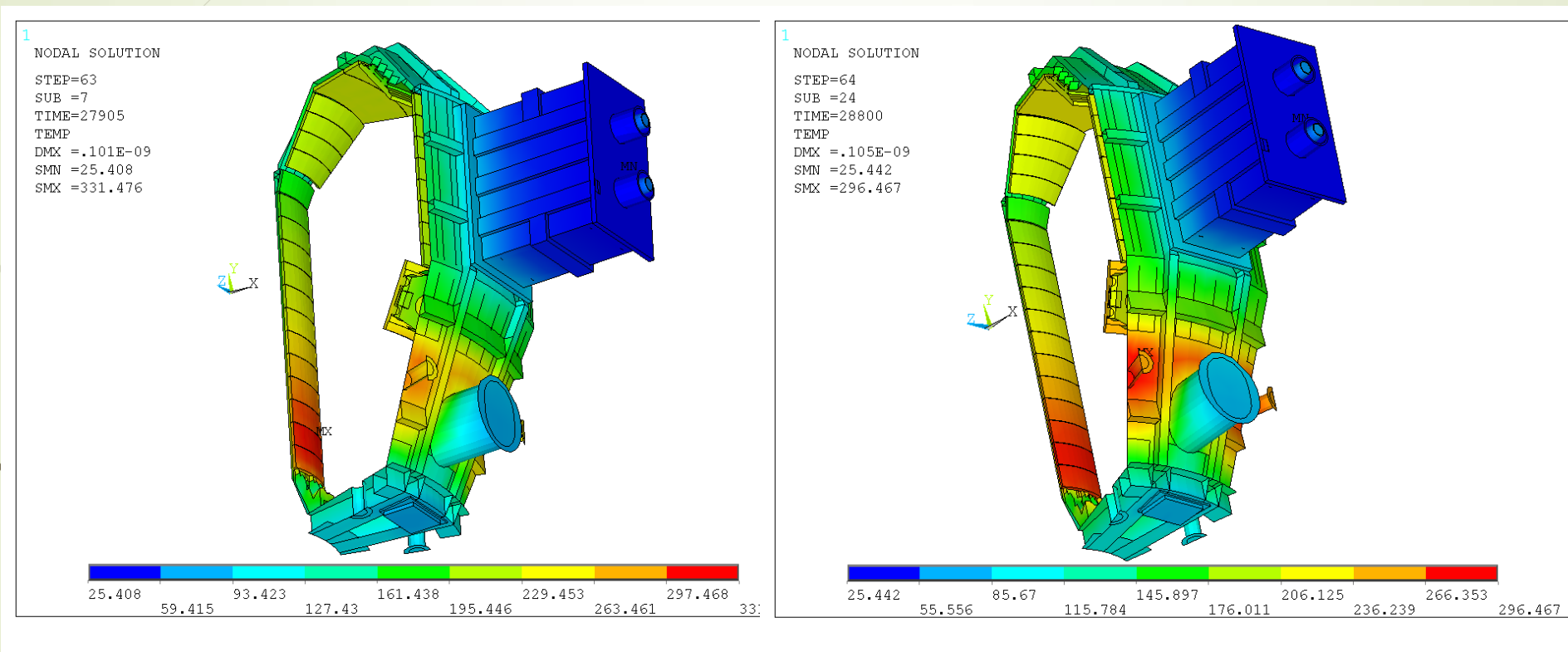
(а) 19-го импульса (16205-я секунда)

(б) 19-й паузы

(17100-я секунда)



Результаты расчета. Режим импульсного нагружения Вакуумная камера без дивертора



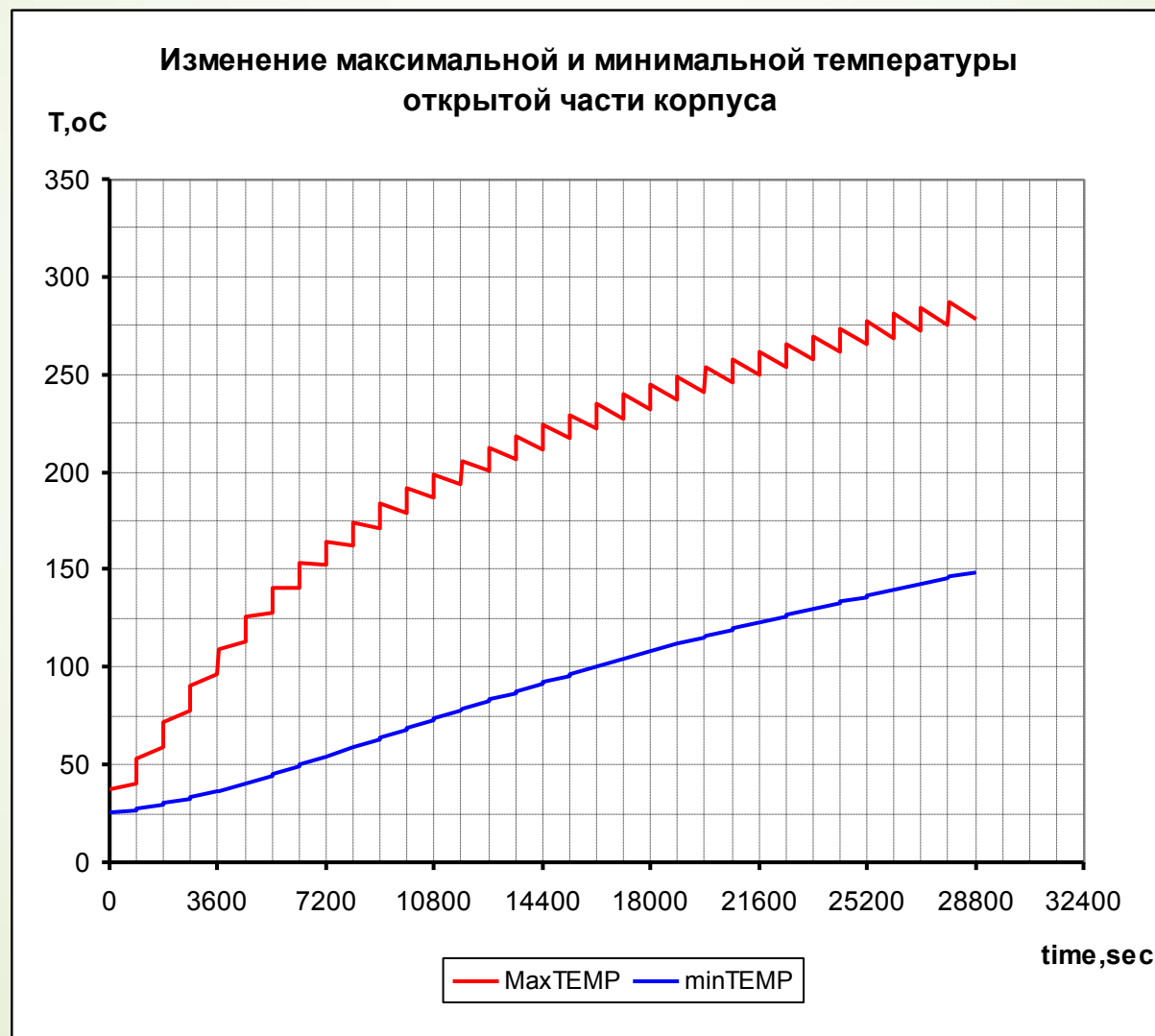
Температурное состояние вакуумной камеры конце

(а) 32-го импульса (27905-я секунда)
(28800-я секунда)

(б) 32-й паузы

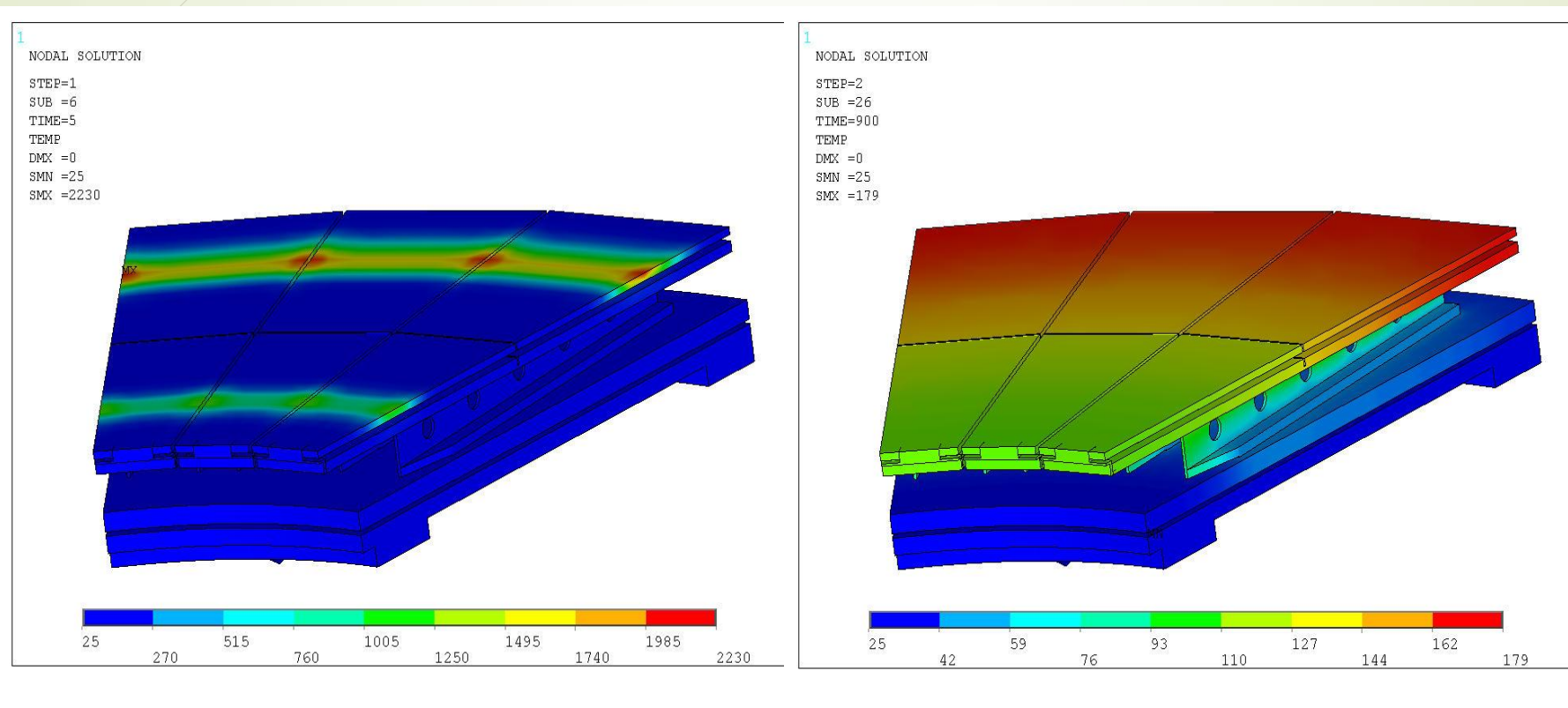


Результаты расчета. Режим импульсного нагружения Вакуумная камера без дивертора





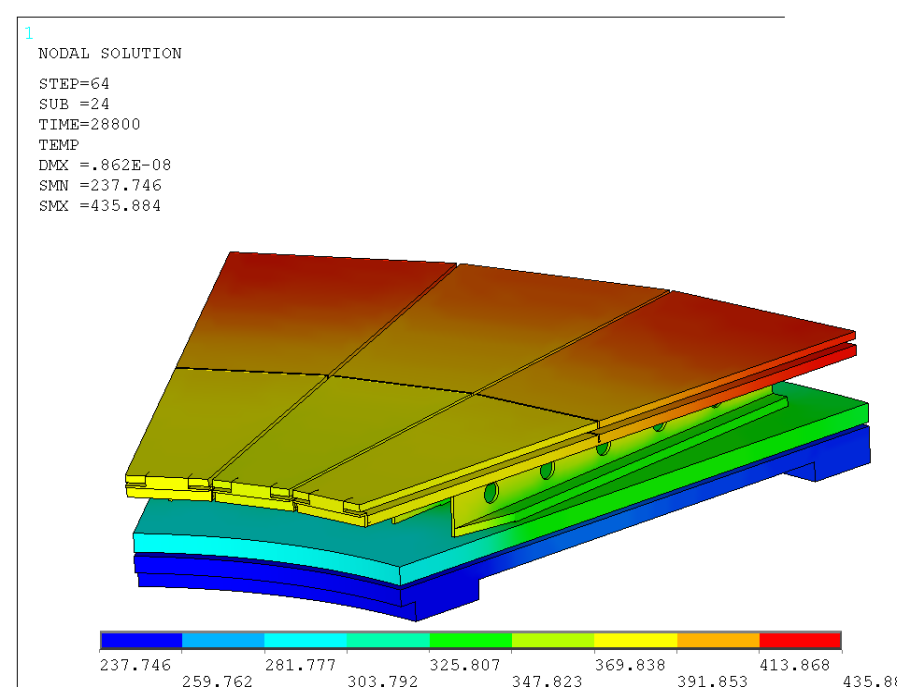
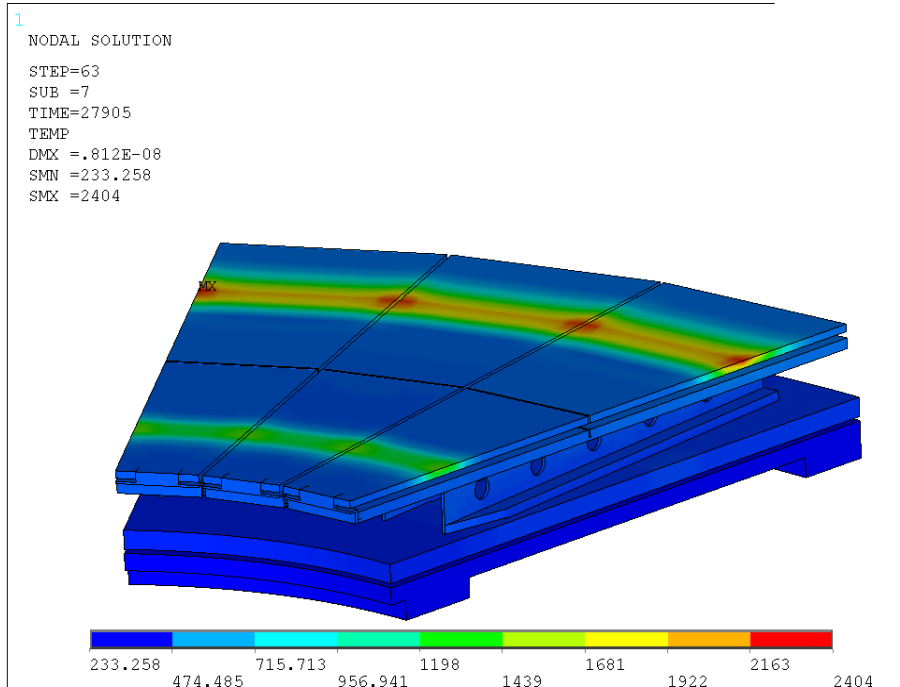
Результаты расчета. Режим импульсного нагружения Диверторное устройство



**Температурное состояние диверторного устройства конце
(а) 1-го импульса (5-я секунда) (б) 1-й паузы (900-я сек.)**



Результаты расчета. Режим импульсного нагружения Диверторное устройство

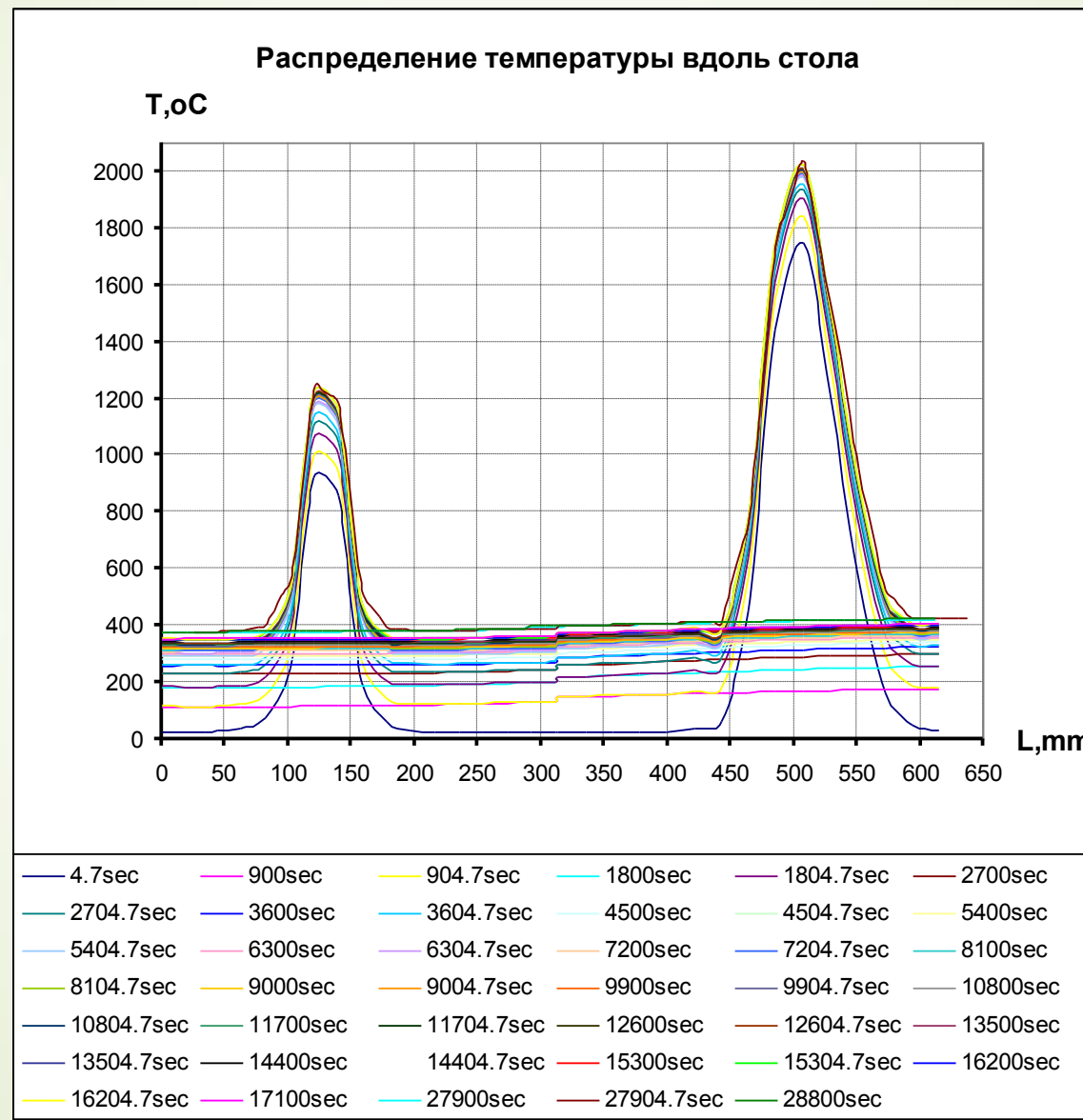


**Температурное состояние диверторного устройства конце
(а) 32-го импульса (27905-я секунда), (б) 32-й паузы (28800-я сек.)**

**Определены максимальные температуры графитовой облицовки за
время импульса, которые составляют:
1440 °С для внутренней мишени и
2004 °С для внешней мишени дивертора.**



Диверторное устройство



Материалы КТМ, обращенные к плазме.

- ▶ Графиты FP-479 (Германия), РГ-Т, МПГ-8, СФС и др.
- ▶ Вольфрам
- ▶ Молибден
- ▶ Бериллий
- ▶ Макет 1-ой стенки (Be-Cu сплав-SS IG)
- ▶ Макет литиевого дивертора на основе капиллярно-пористой системы(КПС)

Условия работы материала дивертора КТМ

- Максимальный перепад температур на графите (564°), максимальная температура обращенной к плазме поверхности графитового покрытия 1440°C получены для максимально возможной тепловой нагрузки, что соответствует $q_{\max} = 11,56 \text{ МВт/м}^2$.
- В стационарном режиме горения плазмы вся мощность, идущая на поддержание средней температуры выше 10^7K идет на стенку и в диверторную область в соотношении 30 и 70%.
- При уровне мощности в плазме $P_{\text{aux}} = 5 \text{ МВт}$, на первой стенке выделяется 1.5 МВт, на внешней части дивертора – 2.8 МВт, на внутренней – 0.7 МВт, при этом удельный поток на пластины дивертора -12 МВт/м^2

Режимы срыва плазмы

Частота срывов плазмы в токамаках составляет 10 – 30 %.

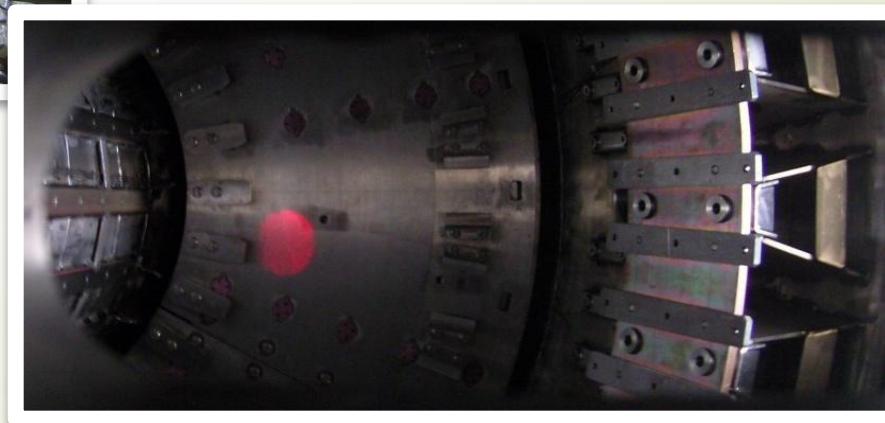
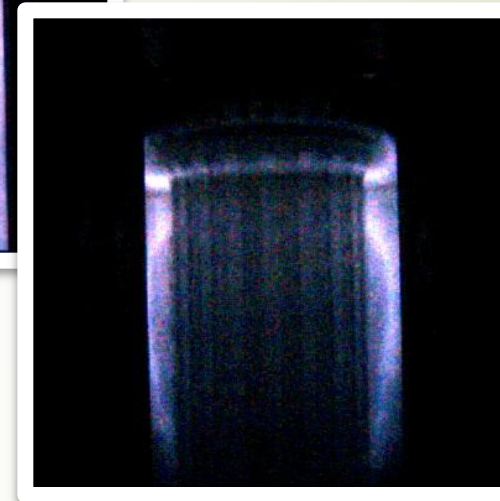
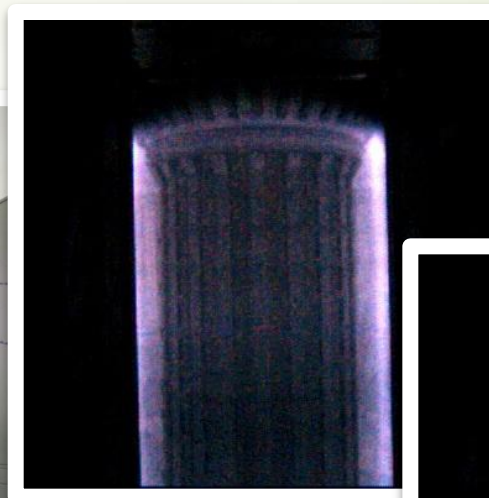
Для токамака КТМ проанализированы два вида срыва – **«большой» срыв** и срыв шнура **по вертикали VDE (Vertical Displacement Events)**.

- **При «большом» срыве** происходит относительно быстрое затухание тока плазмы (~ 2,5 мс). Это связано со сбросом тепловой энергии плазмы, быстрым ростом ее сопротивления за счет резкого снижения температуры (до ~ 10 эВ). В камере наводится ток ≈ 500 кА.

Режимы срыва плазмы

- ▶ **VDE** - из-за потери управления положением плазмы происходит быстрое движение плазмы в вертикальном направлении вверх или вниз.
- ▶ **Причины срыва**: сбой в системе управления, МГД – неустойчивости, сильная вытянутость шнура и пр. Направление движения определяется причинами потери управления.
- ▶ Из-за сильной вытянутости камеры вниз и отсутствия специальной защиты дивертора наибольшую опасность представляют VDE, когда шнур движется вниз в диверторную область.
- ▶ За времена ~ 8 мс плазма разгоняется до 1 км/с и более. При столкновении с дивертором вся энергия выделяется на нем, что может привести к его выходу из строя.
- ▶ С целью уменьшения нагрузок на конструкцию камеры и для защиты дивертора предполагается использовать при VDE инжекцию таблеток.

Система предионизации плазмы



Первый разряд в вакуумной камере –
система предионизации плазмы заработала!
20 августа 2010 года

Получение первой плазмы

- **5 сентября 2010 года проведен пробный запуск токамака КТМ.**
- **Цель пробного запуска** – получение пробоя рабочего газа в вакуумной камере токамака КТМ и формирование плазменного шнура с током 10-30 кА.
- Основные параметры, при которых были получены пробой и формирование плазменного шнура: давление рабочего газа (аргона) – 10^{-4} торр, напряжения на обходе в области пробоя – 8,4 В, магнитное поле на оси тороидальной обмотки – 0,043 Тл, продолжительность плазменного разряда ~ 40 мс.



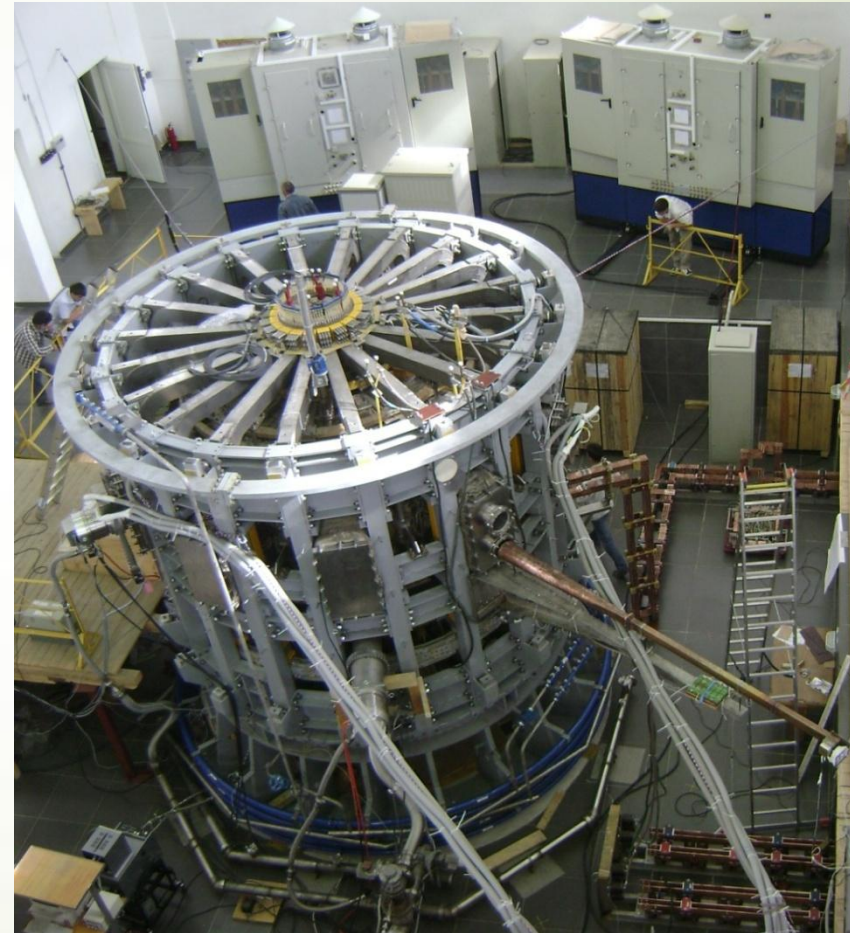
Кадр видеосъемки первой плазмы токамака КТМ

Получение первой плазмы

Для пробоя и формирования плазменного шнура использовались следующие системы:

- ▶ - система предионизации для ионизации рабочего газа;
- ▶ - источник питания электромагнитной обмотки тороидального поля;
- ▶ - конденсаторный источник питания центрального соленоида и электромагнитных обмоток полоидального поля PF1, PF4;
- ▶ - магнитные диагностики, ПЗС видеокамера и фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) для диагностирования физических параметров.

Пробой рабочего газа и ток плазмы регистрировались при помощи поясов Роговского, датчиков напряжения на обходе и ФЭУ.





Основные объекты и системы стендового комплекса КТМ

(желтое – работы выполнены, белое – в стадии выполнения)



Подготовка к физическому пуску установки КТМ

94

► Реализуется научно-техническая программа

1. по отработке методов и режимов запуска плазменного разряда, в рамках которой производится наладка:

- физических и технологических диагностики;
- средств сбора данных и управления;
- основных и вспомогательных технологических систем (высоковакуумной откачки, напуска газа, охлаждения и электропитания).

2. по отработке режимов работы макета литиевого дивертора на базе капиллярно-пористой системы

3. отработке методик исследования облученных в плазме КТМ образцов конструкционных материалов.

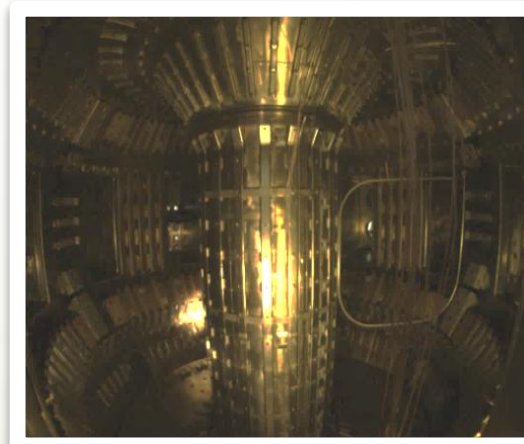
Данная работа очень важна для ускорения подготовки комплекса к физическому пуску и вводу его в эксплуатацию.



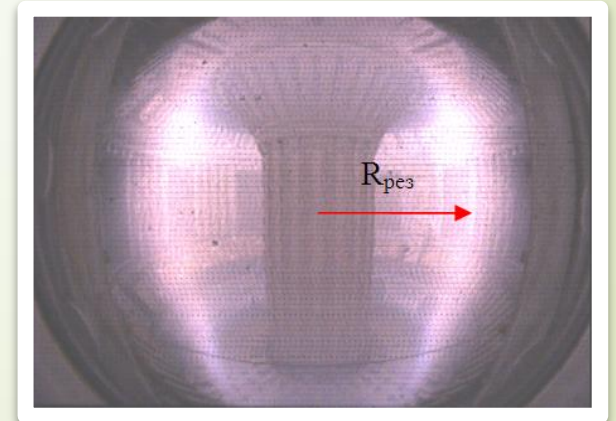
Датчики Холла в вакуумной камере



Модель охлаждаемого литиевого дивертора

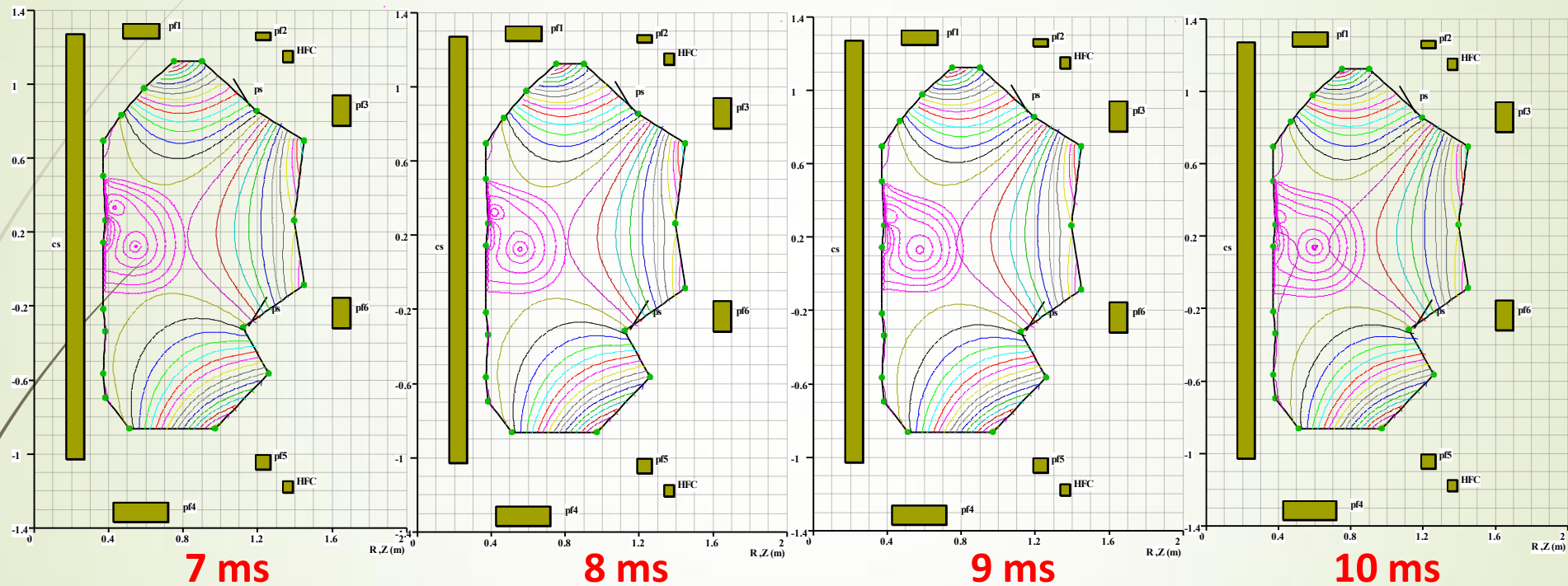


Система визуализации



Экспериментальная отработка методики запуска токамака КТМ, отработка режимов пробоя и получения плазменного разряда пониженных параметров

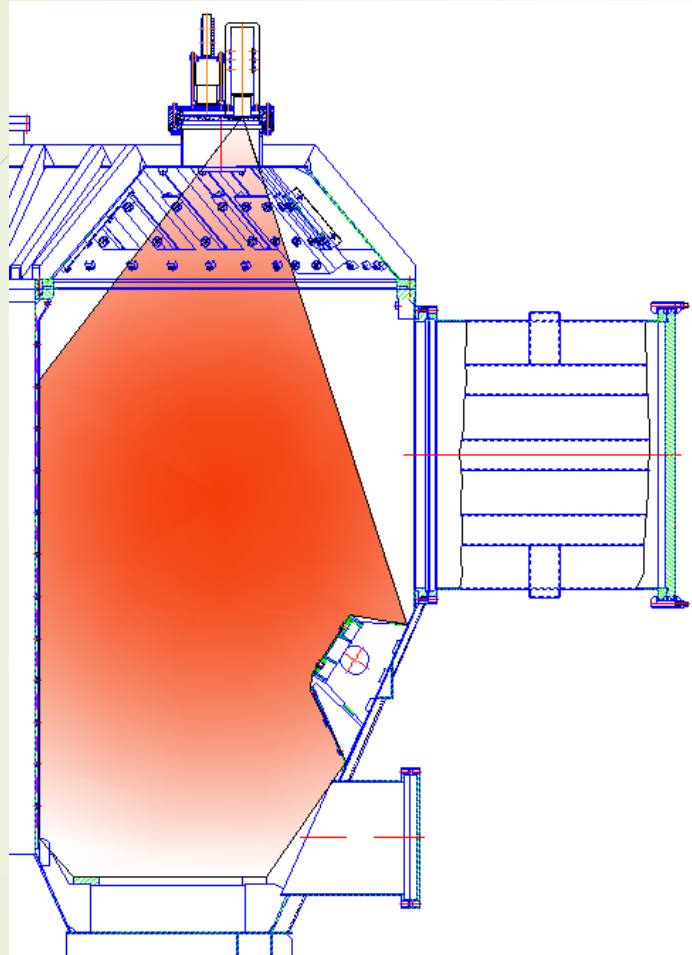
Конфигурации рассеянных полоидальных магнитных полей в вакуумной камере
токамака КТМ для получения пробоя, полученные в эксперименте



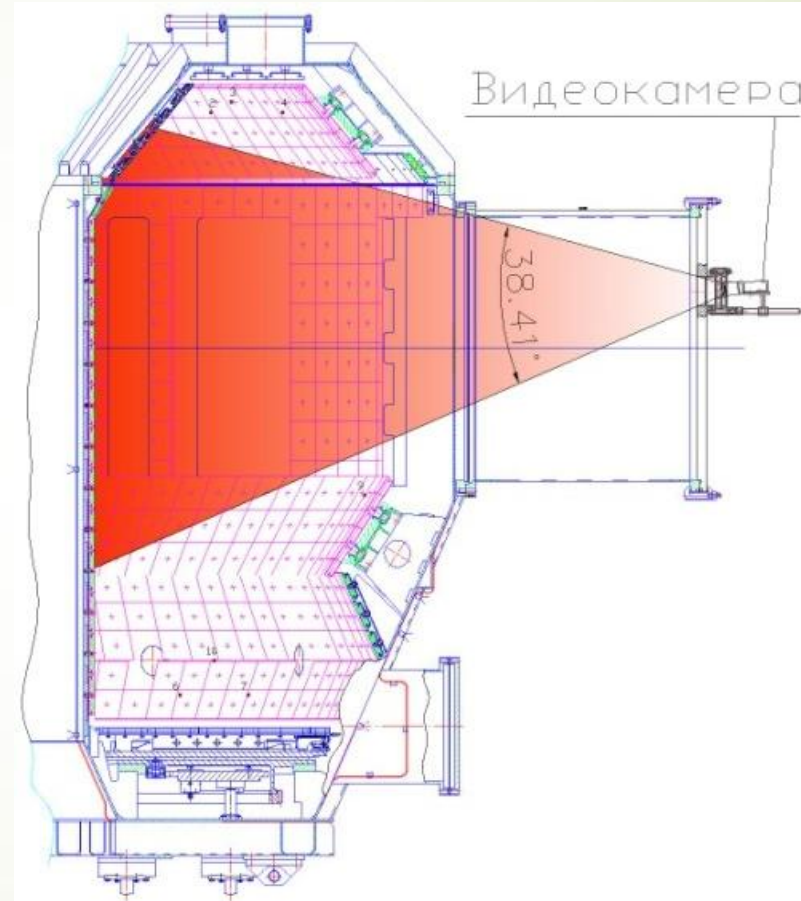
Условие пробоя - $E_t \cdot B_t / B_{\perp} > 0.1 \text{ kVm}^{-1}$

$B_{\perp} = 13 \text{ Gs}$ ($E_t = 1.5 \text{ Vm}^{-1}$, $B_t = 875 \text{ Gs}$) $\rightarrow R_{\text{null}} = 20 \text{ cm}$

Диагностики, используемые в экспериментах на токамаке КТМ

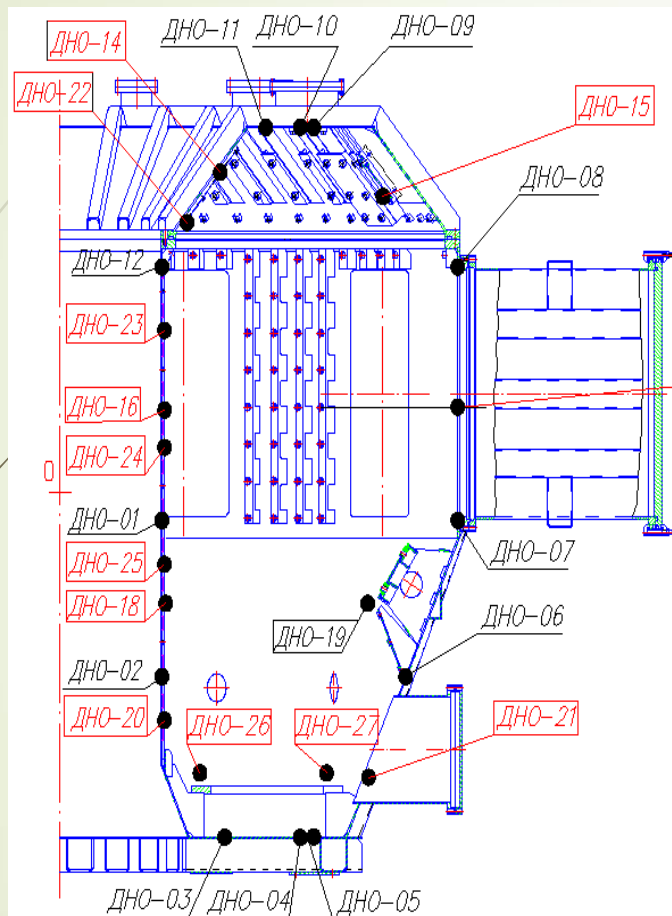


Медленная видеокамера
(30кадр/с)

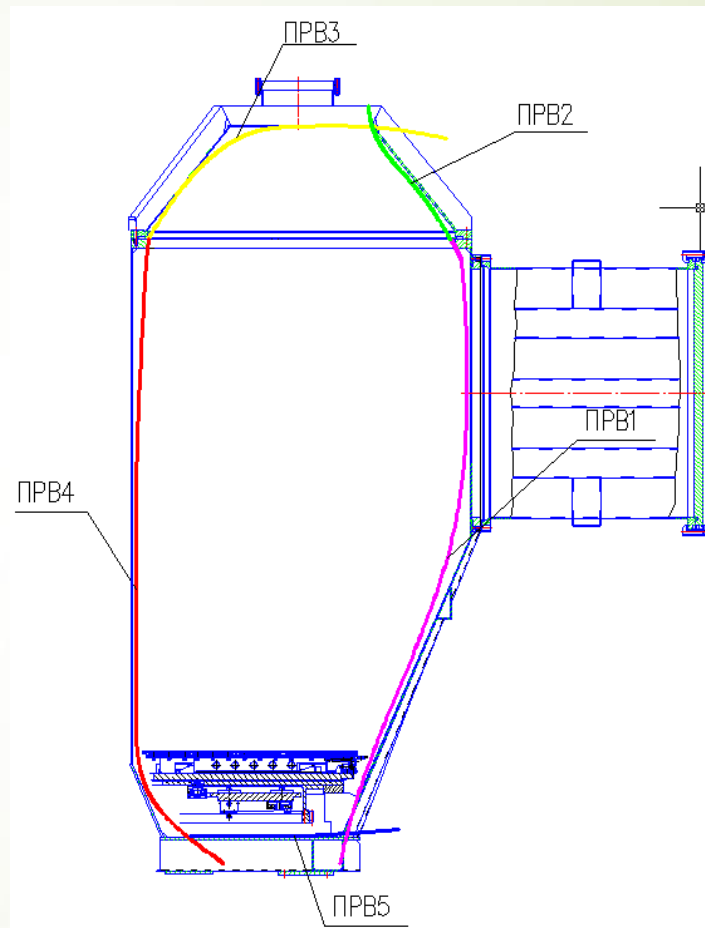


Быстрая
видеокамера
(1000кадр/с)

Диагностики, используемые в экспериментах на токамаке КТМ

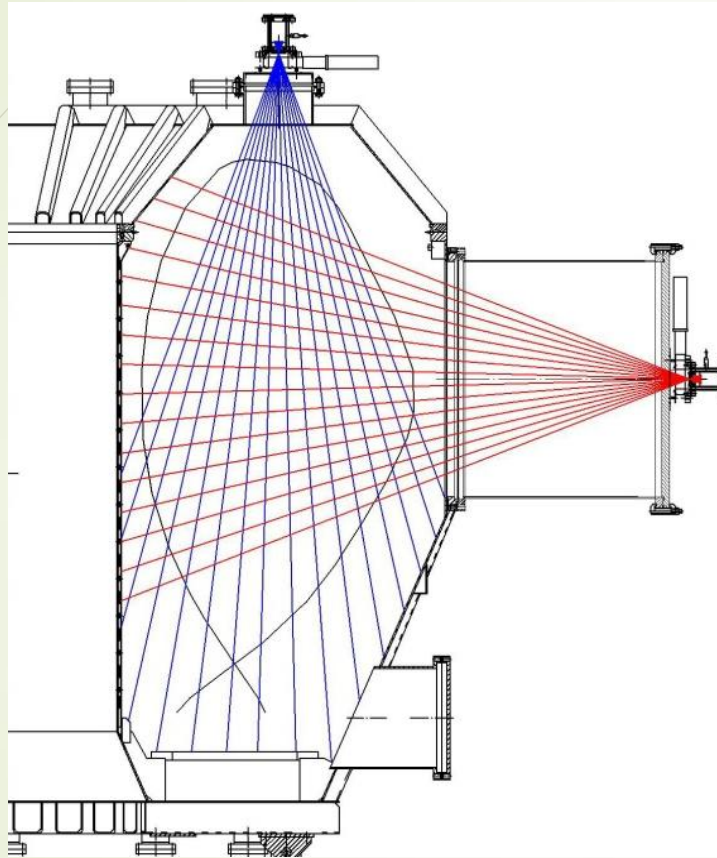


Датчики напряжения на обходе - ДНО

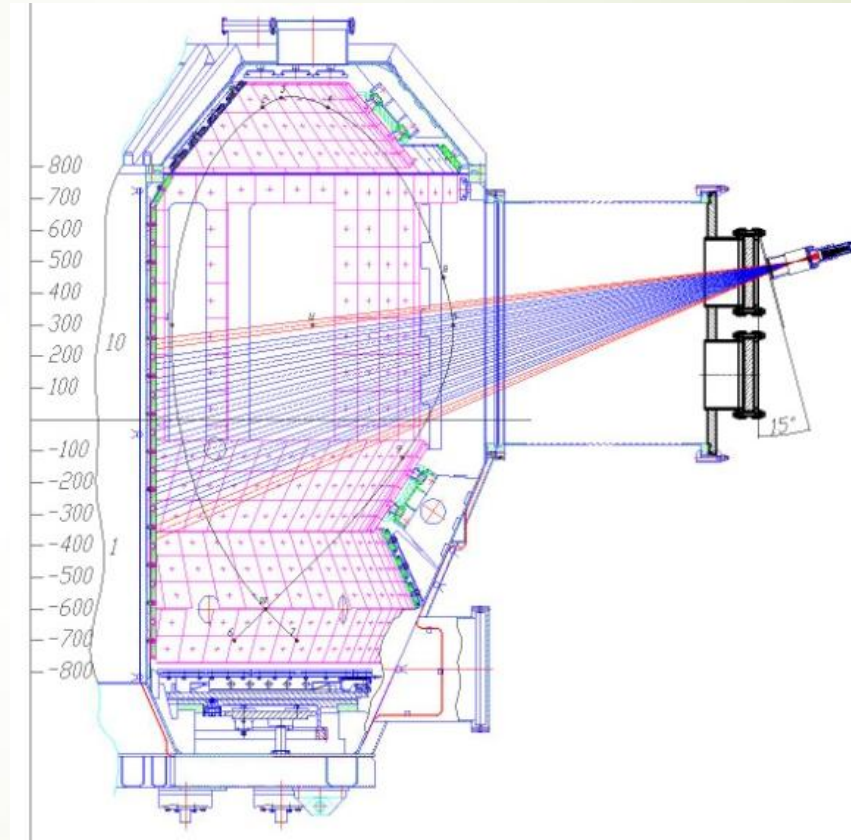


Пояса Роговского для измерения тока плазмы

Диагностики, используемые в экспериментах на токамаке КТМ

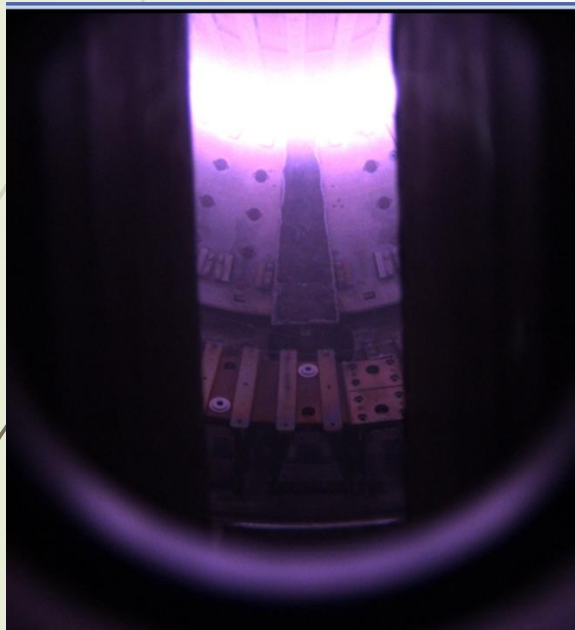


Монитор радиационных потерь -
AXUV

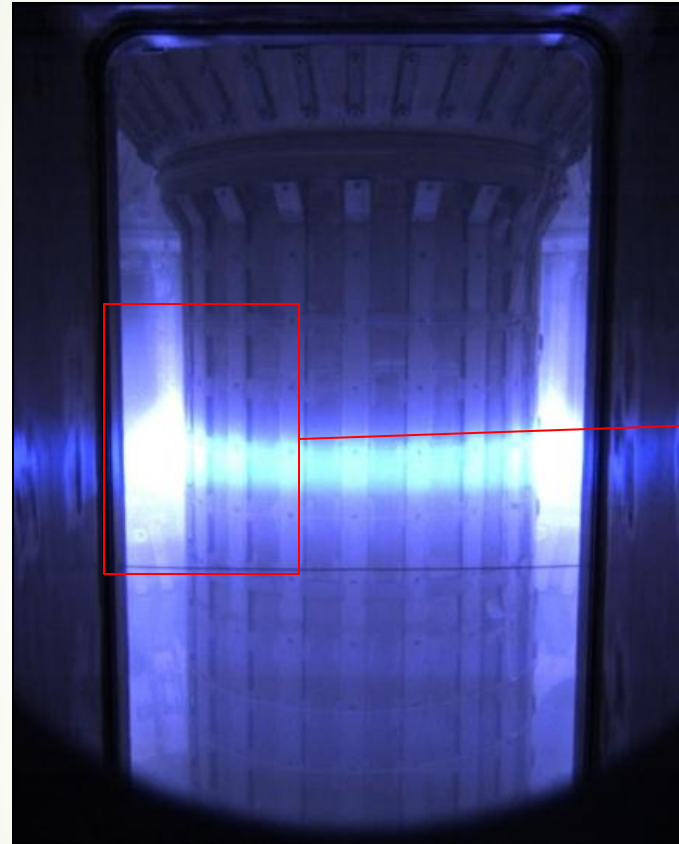


Диагностика излучений плазмы
видимого диапазона - Na-Da

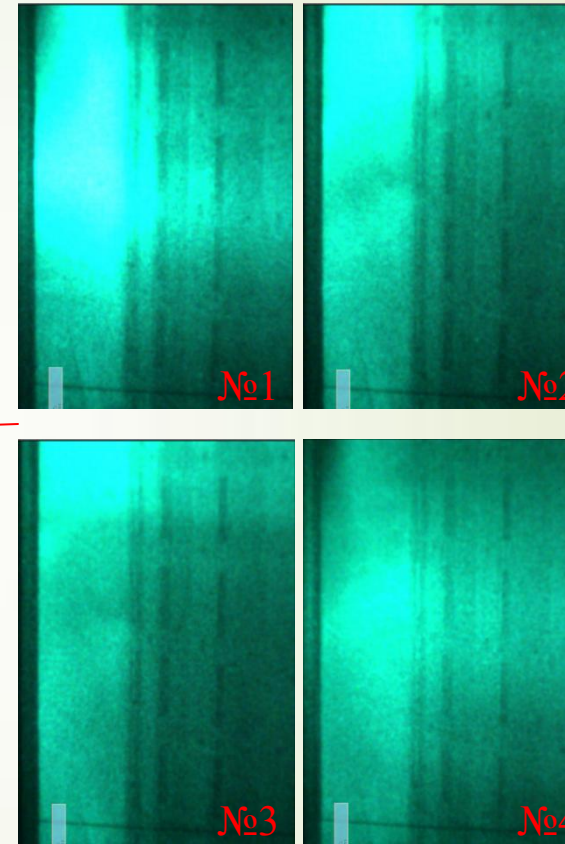
Экспериментальная отработка методики запуска токамака КТМ, отработка режимов пробоя и получения плазменного разряда пониженных параметров экспериментальные результаты



Видеокадр снятый с трекowego патрубка медленной видеокамерой. (экспозиция 30 мс, частота 30 к/с, рабочий газ водород)

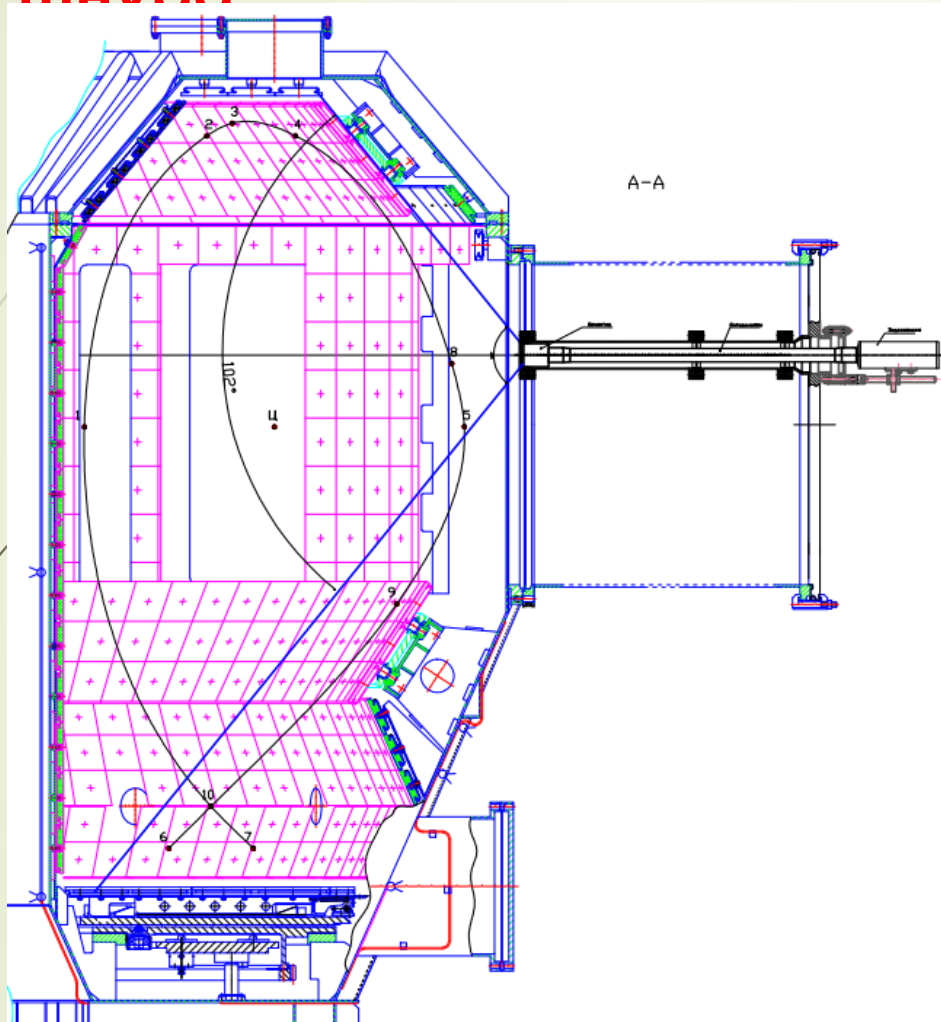


Видеокадр снятый с экваториального патрубка медленной видеокамерой. (экспозиция 30 мс, частота 30 к/с, рабочий газ аргон)



Видеокадры с экваториального патрубка с быстрой видеокамеры, (экспозиция 1 мс, частота кадров 1000 к/с, рабочий газ водород)

Разработка системы визуализации плазменного шнура

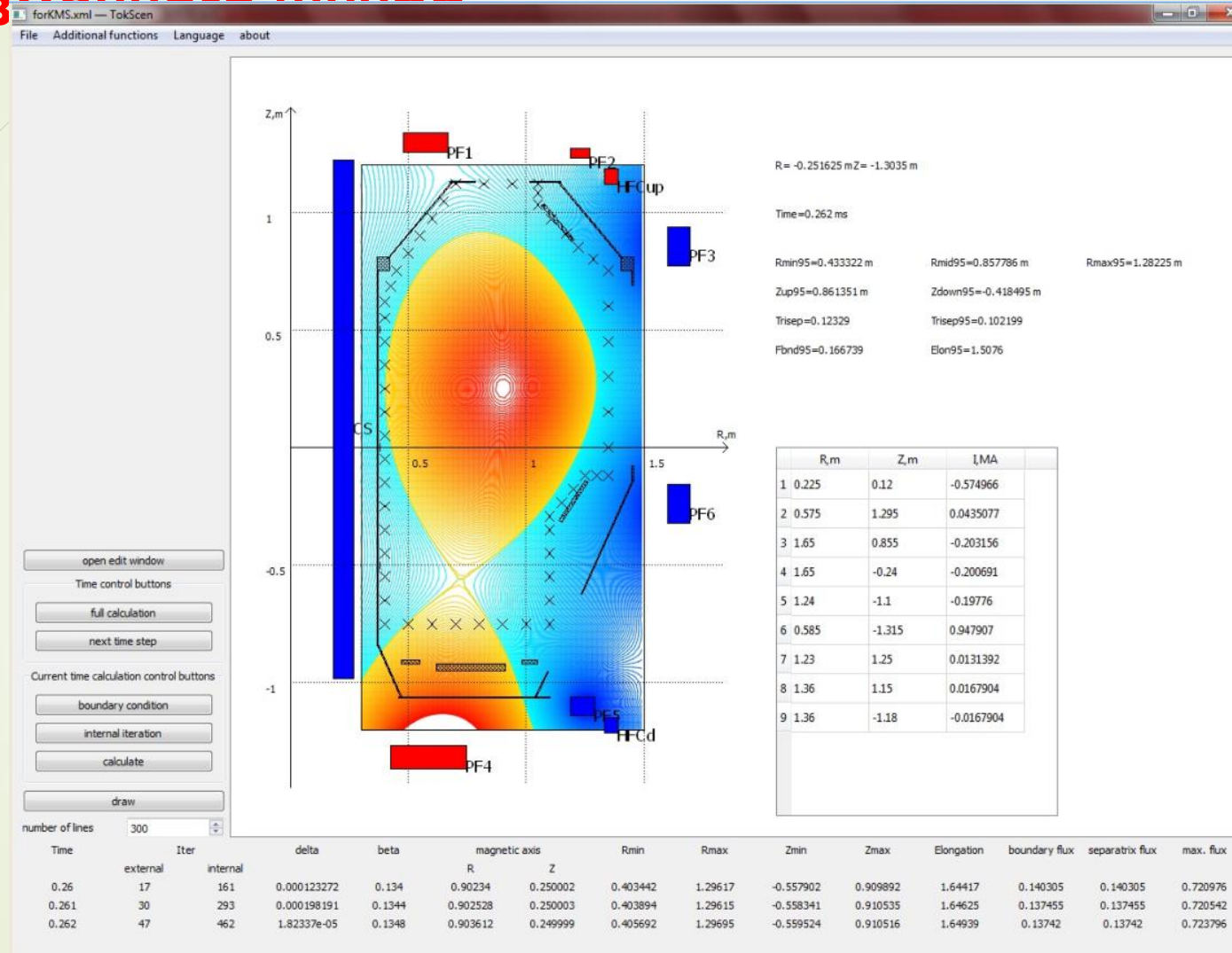


Эскиз размещения системы визуализации на вакуумной камере



Модельное поле изображения

Разработка кода для расчета эволюции плазмы

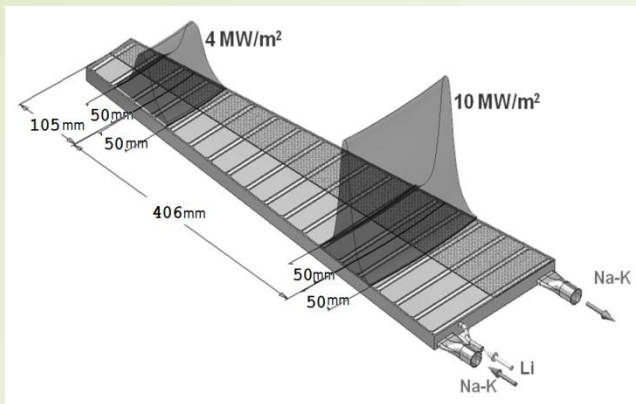


Вид результата расчета по коду эволюции плазмы в токамаке КТМ

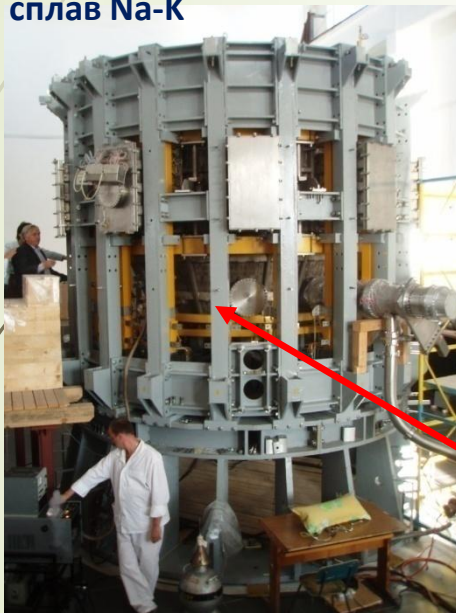
Опробование литиевых технологий

Литиевый дивертор токамака КТМ

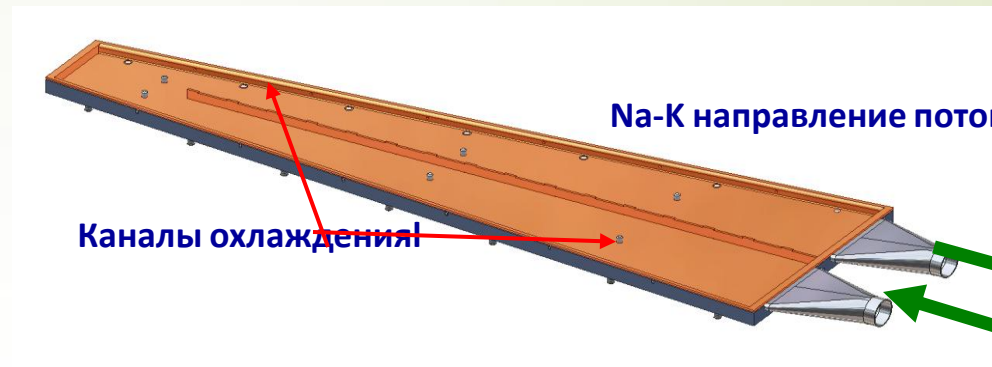
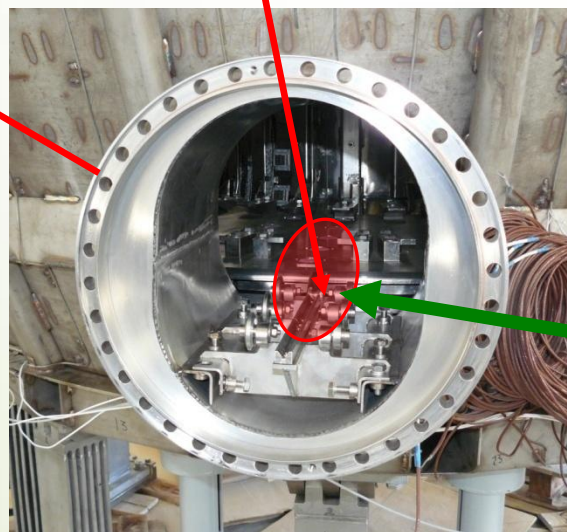
- **Цель**-разработка, создание и экспериментальное исследование модели литиевого дивертора токамака КТМ на основе капиллярно-пористой системы (КПС), что позволит отработать основные подходы к проектированию литиевого дивертора токамака КТМ, дивертора и внутрикамерных элементов ТЯР нового поколения типа ДЕМО, исследовать плазмо-физические аспекты влияния лития, отработать технологии работы с литием в условиях токамака.
- **Коллаборатор** - ENEA, Frascati, Италия
- **Лидирующий институт** – ИАЭ НЯЦ РК,
- **Участники** -ФГУП Красная Звезда, ТРИНИТИ,Р Ф.



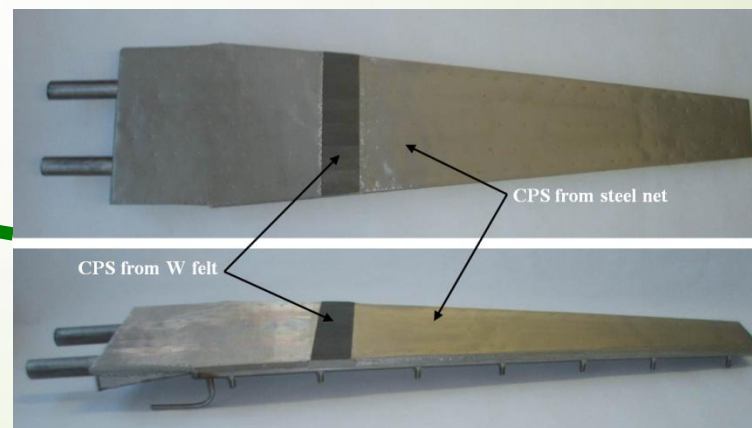
Для охлаждения выбран сплав Na-K



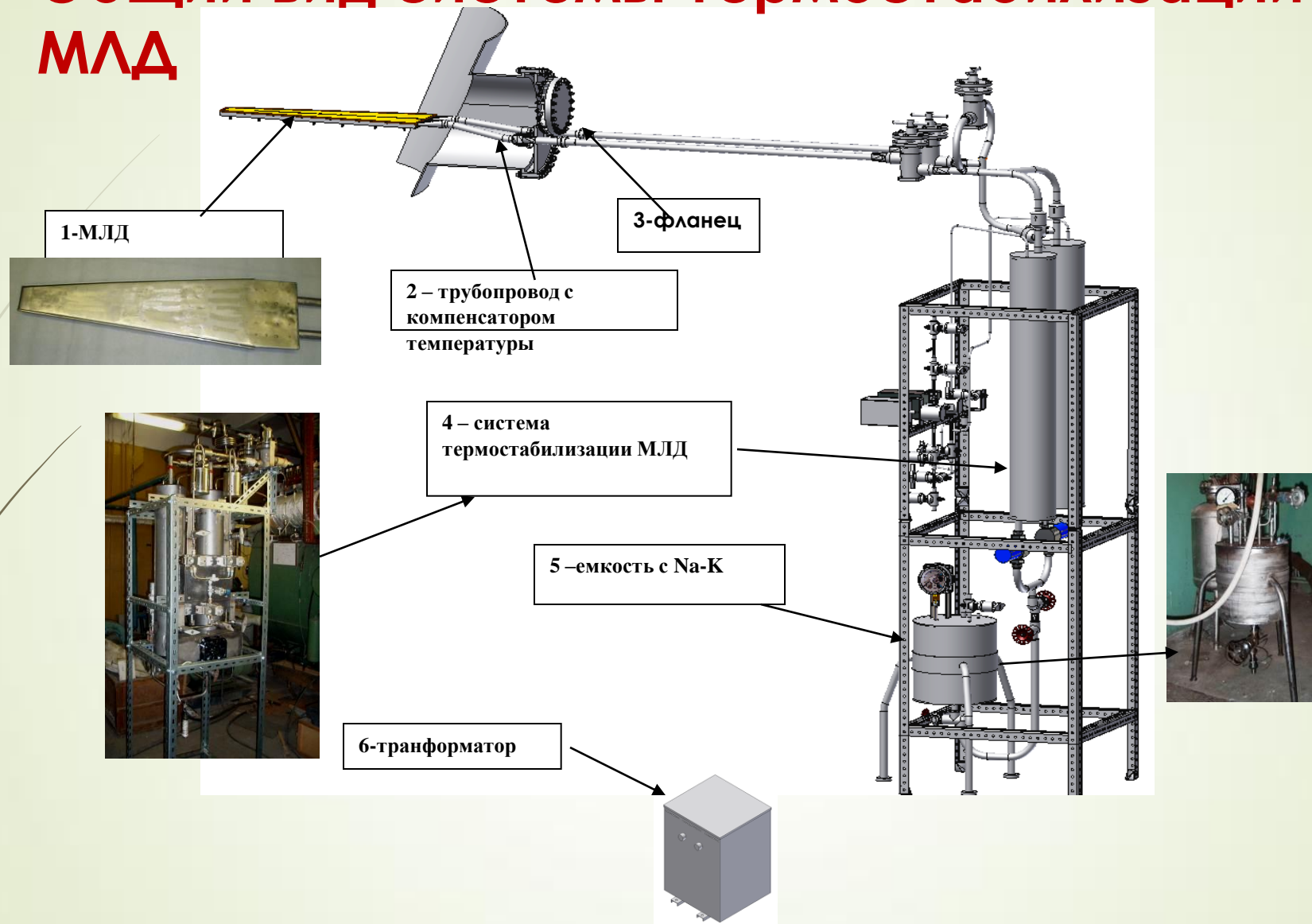
Макет литиевого дивертора размещен в одном из портов токамака КТМ (сектор 14) и замещает один из 24 модулей.



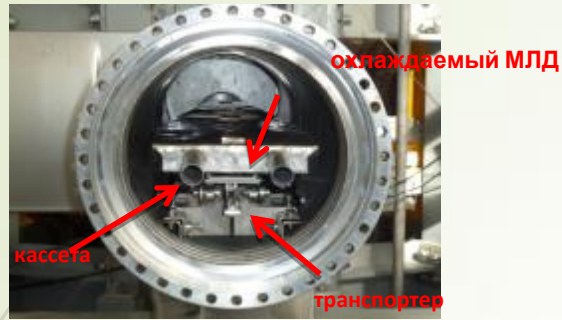
Na-K



Общий вид системы термостабилизации МЛД



Работы с охлаждаемым МЛД



Загрузочная камера ТШУ

1. Разработан вспомогательный вакуумный стенд на базе штатного транспортно-шлюзового устройства токамака КТМ
2. Проведены пуско-наладочные испытания внешней системы термостабилизации (СТС) и МЛД на модельном теплоносителе этаноле. Цель - проверка работоспособности всех элементов и подсистем, определение гидравлических характеристик и настройка рабочих режимов работы СТС. В результате проведенных испытаний была получены значения расхода модельного теплоносителя через охлаждаемый модуль МЛД и зависимость расхода теплоносителя через МЛД от давления сжатого азота, подаваемого в газовую систему стойки СТС.
3. Проведены автономные испытания макета МЛД и внешней системы термостабилизации с рабочим теплоносителем Na-K
4. Испытания на теплоносителе Na-K подтвердили работоспособность всех элементов и подсистем системы термостабилизации в течение всего цикла испытаний в интервале температур 20-200°C.
5. Определены входные параметры и временные диаграммы работы системы в режимах «Разряд» и «Пауза», обеспечивающие величины расхода

Работы с неохлаждаемым МЛД

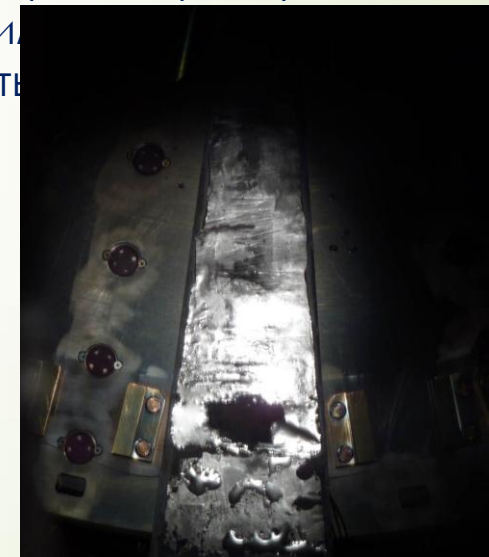


Размещение модели на диверторном столе токамака -вид из камеры токамака

1. Неохлаждаемая модель была размещена на штатной кассете диверторного стола токамака КТМ.
2. Удаление защитной фольги выполнялось через гермоввод с помощью проволоки, которая была предварительно закреплена на дальней скобе защитной фольги МЛД
3. На фотографии видна блестящая поверхность жидкого лития, пропитывающего капиллярно-пористую систему модели с низки

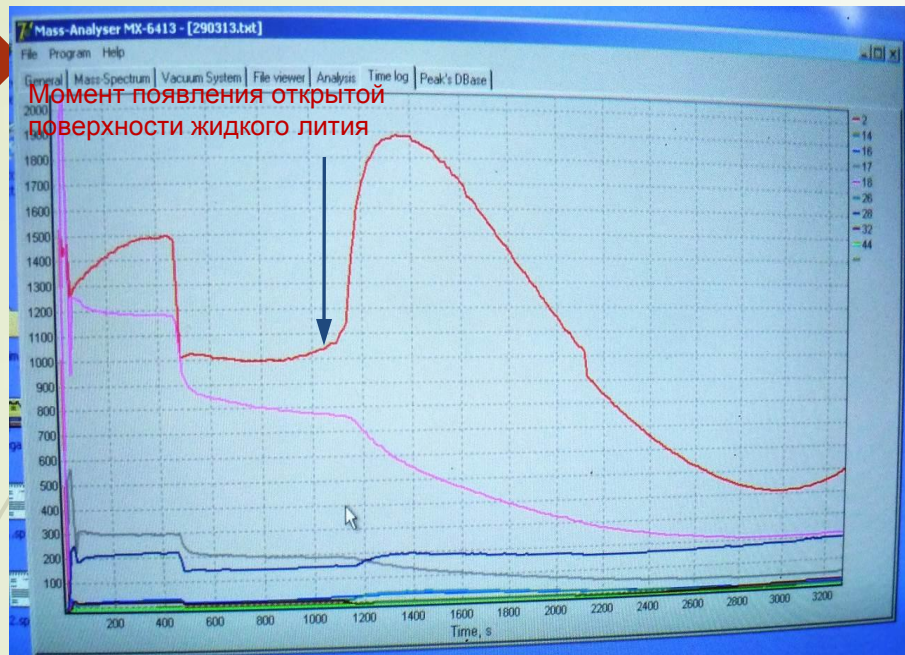


Удаление защитной фольги



Поверхность жидкого лития модели дивертора после снятия защитного экрана в камере токамака

Работы с неохлаждаемым МЛД



Динамика изменения интенсивности составляющих среды остаточных газов в камере токамака

7. Получено, что вакуумные условия в разрядной камере КТМ после установки неохлаждаемого модуля и снятия с него защитной фольги значительно улучшились, а в частности парциальные давления основных газов характерных для вакуумных систем уменьшились на порядки, а некоторые пики вообще исчезли.

4. Наиболее заметным эффектом появления открытой поверхности жидкого лития в вакуумной камере токамака явилось падение интенсивности пика H_2O и одновременный рост интенсивности пика H_2 , что явилось следствием протекания реакции $2\text{Li} + \text{H}_2\text{O} = \text{Li}_2\text{O} + \text{H}_2$. С течением времени интенсивность пика водорода падала в результате его поглощения литием.
5. В результате взаимодействия лития с атмосферой остаточных газов в камере токамака его поверхность изменяла степень своей черноты – становилась темнее



Работы с неохлаждаемым МЛД

8.В момент снятия защитной фольги с приемной поверхности МЛД жидкий литий активно начал взаимодействовать со свободным кислородом, а также с кислородом, находящимся в соединении (вода). В результате чего, как видно на графике, резко увеличилось парциальное давление водорода и практически пропал пик кислорода, а парциальное давление воды и ее составляющих заметно стало снижаться. Также видно, что после резкого выхода водорода в объем вакуумной камеры через некоторое время литий начал сорбировать водород до того момента, пока не начали нагрев модуля до температуры 300 °С.

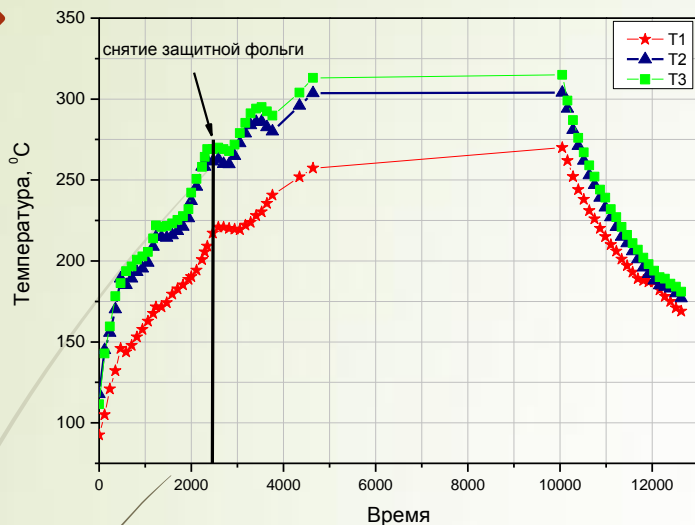
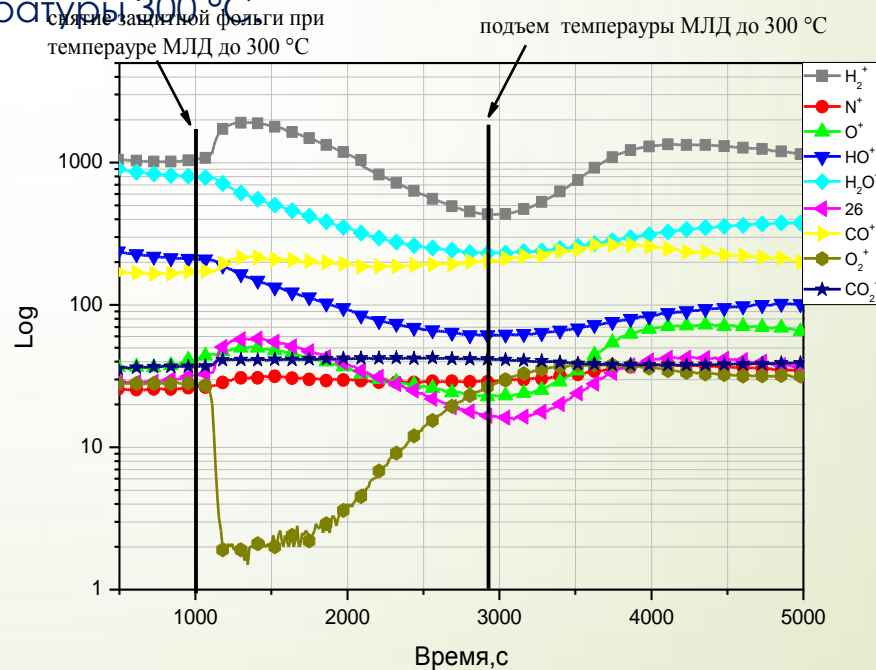
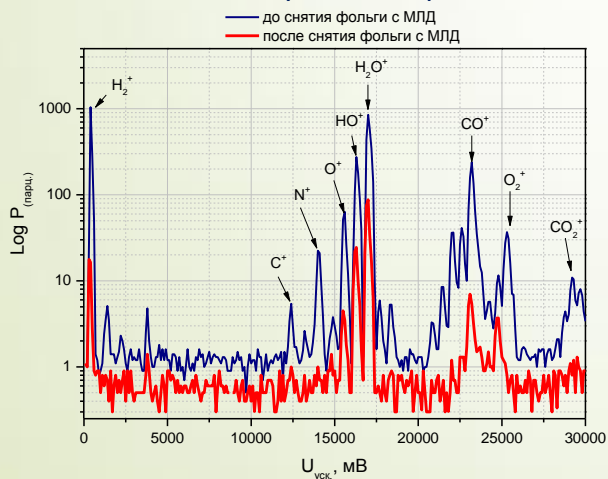
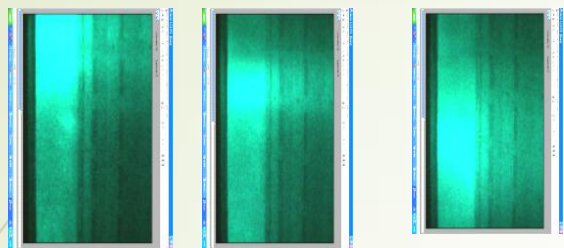


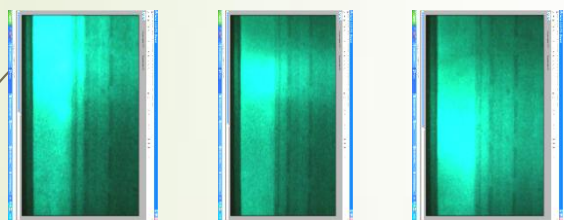
График изменения температуры литиевого модуля со временем.



Плазменные эксперименты с МЛД



Без нагрева Li-МЛД



С нагревом Li- МЛД (200°C)

4 мс

10 мс

13
мс

Сравнение параметров плазменного разряда показало, некоторые отличия в деталях динамики их изменения, однако существенного эффекта присутствия в вакуумной камере токамака КТМ нагретого до 200°C лития не было обнаружено, что связано с пониженными параметрами плазменного

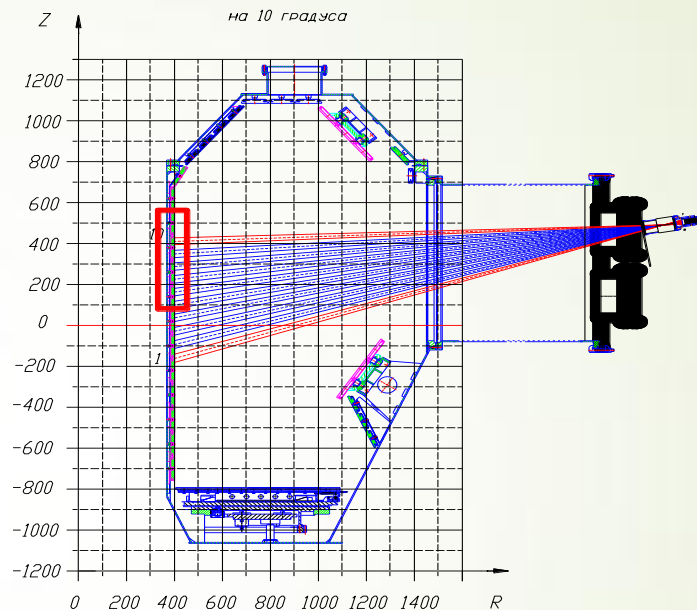


Схема контроля параметров плазменного разряда диагностикой Na-Da (хорды наблюдения синим цветом) и быстрой видеокамерой (вертикальная область видеосъемки красным прямоугольником)

Дорожная карта проекта



Международное сотрудничество



Россия

- Комплексная программа работ РК – РФ (2006, 2011)
- Совместная рабочая группа по КТМ, Мемо о сотрудничестве НЯЦ – НИЦ КИ; НЯЦ-ФТИ им. Иоффе



Беларусь

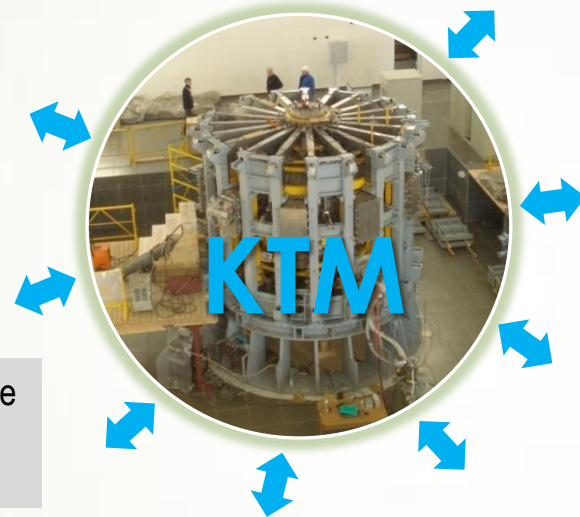
- Соглашение о сотрудничестве НЯЦ РК – ГНУ «Сосны», РБ (2013)



- Кооперация в рамках программы по мирному использованию атомной энергии АТОМ-СНГ (2012), РГ КТМ



Казахстан



Япония

- Меморандум о сотрудничестве JAEA – НЯЦ (2007, 2014)
- Координационный комитет
- Стажировка молодых специалистов ИАЭ на JT-60
- Проекты МНТЦ



ЕВРАТОМ

- Межправительственное соглашение РК – ЕВРАТОМ по УТС (2002)
- Координационный комитет РК – ЕС
- Проекты МНТЦ
- Создание «Клуба пользователей КТМ»



Испания

- Меморандум о сотрудничестве СИМАТ – НЯЦ (2008)
- Участие в разработке программы НИР
- Стажировки специалистов ИАЭ



Италия

- Меморандум о сотрудничестве НЯЦ – ENEA (2010)
- Стажировки на FTU



Великобритания

- Ознакомление с опытом совместного использования странами ЕС токамака JET
- Определены области сотрудничества по работам на токамаках JET, MAST и КТМ
- Обучение менеджеров, англ. языку, стажировки молодых специалистов по программе CNCP



Программа исследований.

Исследование материалов и взаимодействия плазма- стенка

- ▶ - исследование поведения кандидатных материалов приемных пластин и других элементов диверторных устройств;
- ▶ - изучение процессов распыления, эрозии, дугообразования и др. на приемных диверторных пластинах;
- ▶ - исследование процессов поверхностного и объемного нагрева и элементов дивертора;
- ▶ - испытание различных способов организации теплового контакта приемных пластин дивертора с теплоотводящей и механической структурой диверторного устройства (ДУ);
- ▶ - испытания различных методов, схем и конструкций систем охлаждения приемных пластин и внутрикамерных структур;
- ▶ - изучение поведения материалов диверторных пластин при различных температурах;
- ▶ - исследование методов снижения локальных тепловых нагрузок на приемные пластины (например, путем быстрого изменения положения X-точки в горизонтальном и вертикальном направлениях);



Исследование материалов и взаимодействия плазма-стенка

- ▶ - изучение возможности снижения тепловых нагрузок на дивертор возбуждением излучательной (RI-моды) при инжекции тяжелых инертных газов в приграничную плазму (SOL);
- ▶ - исследование возможности снижения потоков в диверторную область изменением треугольности плазменного шнура;
- ▶ - исследование поведения различных материалов защиты первой стенки (рециклинг, распыляемость, эрозия, термостойкость в нормальных режимах и при срывах тока и т.д.);
- ▶ изучение влияния материала защиты первой стенки на Zэфф;
- ▶ испытания защитных экранов антенн ВЧ-нагрева;
- ▶ - исследование диафрагм (лимитеров) различного типа в т.ч. капиллярно-пористых литиевых диафрагм и их влияние на параметры плазменного шнура;
- ▶ - исследование капиллярно-пористых Li-структур и других вариантов жидкометаллических устройств в качестве диверторных приемников энергии;
- ▶ - исследование процессов формирования активного диверторного слоя (ASOL) и его влияния на параметры и процессы удержания плазменного шнура.

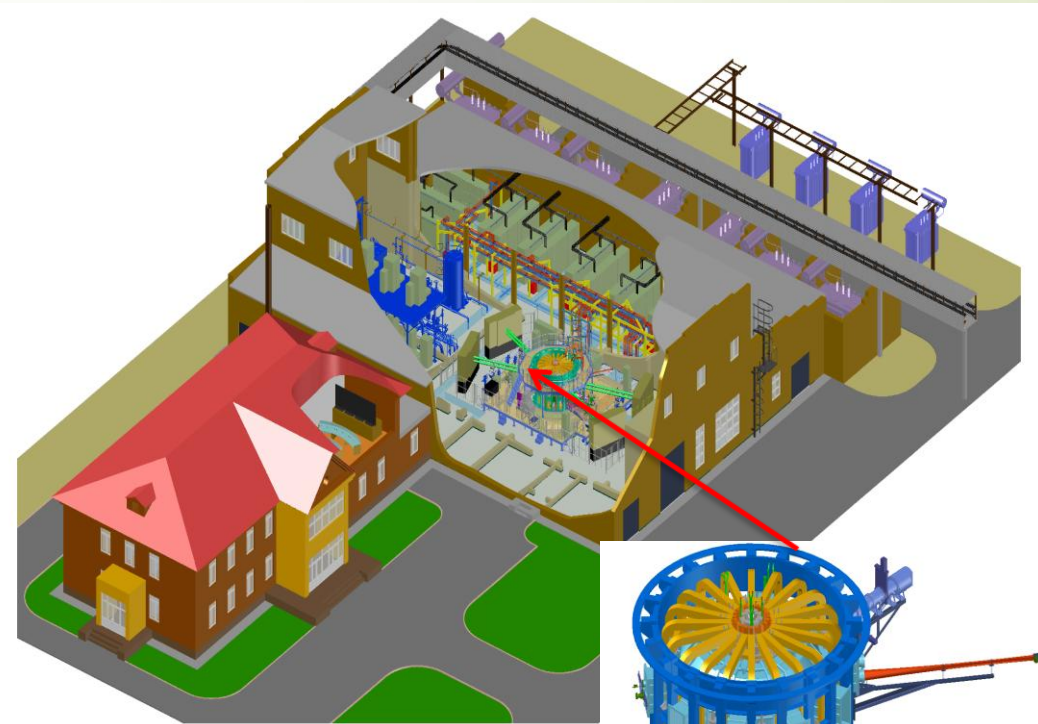


Плазмофизические задачи

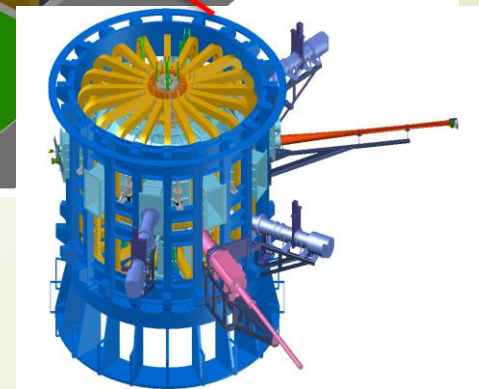
- исследование процессов термоизоляции термоядерной плазмы в токамаках с аспектным отношением $A=2$ и предельных ее параметров при мощном ВЧ-нагреве;
- - исследование процессов формирования и устойчивости различных конфигураций плазмы (вытянутость, треугольность), а также процессов и параметров плазмы в пристеночной и диверторной зонах;
- - исследование сценариев и механизмов эффективного ВЧ-нагрева и режимов неиндукционного поддержания тока и др.

Работы по подготовке к презентации комплекса КТМ на площадке размещения ЭКСПО-2017 в г. Астана

- ▶ Разработка концепции презентации стенда, посвященного термоядерной энергетике, а также стендовому комплексу токамака КТМ.
- ▶ Оформление выставочного павильона с он-лайн трансляцией экспериментов на комплексе КТМ.



Макет токамака КТМ



Приглашаем в Курчатов

