

**О ходе реализации Программы
совместных научных исследований
на токамаке КТМ на 2024 -2026 гг.
в 2024 г.**

**двадцать пятое заседание Комиссии государств – участников
СНГ по использованию атомной энергии в мирных целях**

4 декабря 2024 года г. Нижний Новгород

И.Л. Тажибаева, НЯЦ РК



Токамак КТМ и его уникальность



Уникальность КТМ

- КТМ-первый в мире специализированный материаловедческий токамак.
- Наличие подвижного диверторного и транспортно-шлюзового устройства
- ИТЭРоподобная конфигурация плазмы с тепловой нагрузкой на материалы дивертора 10-20 МВт/м²

Большой радиус плазмы	0,9 м
Малый радиус плазмы	0,45 м
Аспектное отношение А	2
Удлинение плазмы K_{95}	1,7
Тороидальное магнитное поле на оси $B_{то}$	1 Тл
Ток плазмы	750 кА
Длительность тока	4 – 5 с
Мощность ВЧ-нагрева	5 – 7 МВт
Мощность тепловой нагрузки на приемные диверторные пластины	до 20 МВт/м ²



**Физический пуск КТМ
20 ноября 2019 года
(г. Курчатов, НЯЦ РК)**

Физический пуск КТМ осуществлен совместными усилиями казахстанских (НЯЦ) и российских специалистов (НИЦ КИ, НИИЭФА, ТПУ)

Миссия КТМ - верификация и, в последующем, сертификация конструкционных и функциональных материалов перед размещением в установках термоядерного синтеза. Исследование в области физики плазмы в пограничной области между сферическими и классическими токамаками.



Реализуемая Программа совместных исследований на токамаке КТМ в рамках Комиссии АТОМ-СНГ

Основа для реализации Программы – межправительственное Соглашение о совместном использовании токамака КТМ странами СНГ, подписанное в 26 мая 2017 года (Казахстан, Россия, Беларусь, Киргизия, Армения, Таджикистан)



Принципы финансирования НИР КТМ

«Финансирование совместных мероприятий, программ и работ, проводимых на базе КТМ осуществляется за счет средств, предусмотренных в национальных бюджетах соответствующим министерствам, ведомствам, государственным корпорациям или иным организациям для выполнения исследовательских проектов по соответствующим тематикам, а также за счет привлечения средств хозяйствующих субъектов и средств внебюджетных источников на договорной основе».

2018-2020 гг.

Программа совместных научных исследований на токамаке КТМ одобрена и утверждена на заседании Экономического Совета СНГ 2 марта 2018 года в г.Москва. (Успешно реализована)

2021-2023 гг.

Одобрена и утверждена на заседании Экономического совета СНГ 12 марта 2021 года. (Успешно реализована)



ПРОГРАММА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА КАЗАХСТАНСКОМ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ НА 2024–2026 ГОДЫ

Этап 1. Отработка методик проведения исследований на КТМ и средств контроля физических параметров высокотемпературной плазмы в процессе ее взаимодействия с материалами (РК, РФ)

Этап 2. Разработка и экспериментальное обоснование инновационных технологий для создания термоядерного реактора (РК, РФ)

Этап 3. Модернизация технологии подготовки КТМ к плазменным экспериментам (РБ, РК, РФ)

Этап 4. Экспериментальные и теоретические исследования эффектов воздействия плазмы, ионов водорода и гелия на приповерхностные и объемные слои материалов КТМ (РБ, РК, РФ)

Этап 5. Совершенствование технологических и физических методов диагностики плазмы (РК, РФ)

Этап 6. Совершенствование системы контроля и управления плазменным разрядом (РК, РФ)

Участники: РБ- ГНУ ИПМ, НИИ ЯП БГУ;

РФ-НИЦ Курчатовский институт, ФТИ им. Иоффе, НИИЭФА им. Ефремова, Томский ПУ, ТРИНИТИ, НИКИЭТ (АО Красная звезда), НИЯУ МИФИ;

РК- НЯЦ, ИАЭ НЯЦ, ИЯФ.

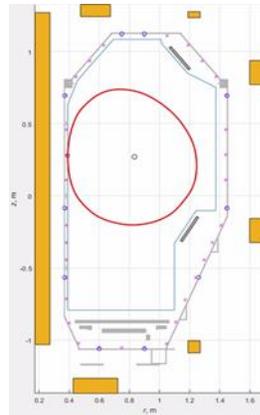
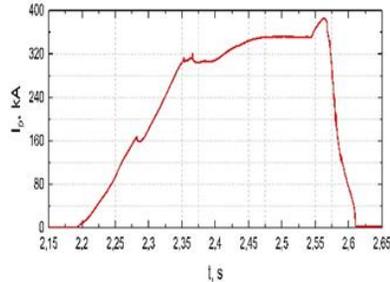
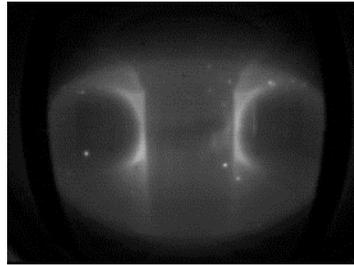


Результаты совместных работ по Программе

Хронология событий:

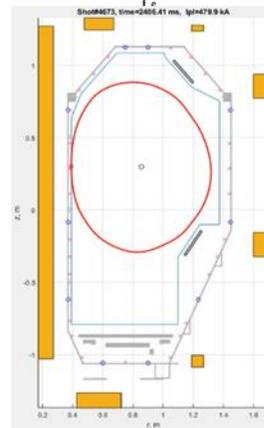
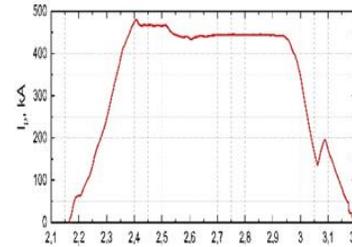
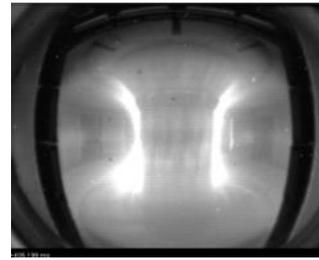
- 2019 год – физический пуск и ввод в эксплуатацию
- 2020 год- проведение экспериментов в омическом режиме нагрева плазмы с «круглой конфигурацией».
- 2021-2022 года -отработка сценария и повышение параметров плазменного разряда (тока плазмы и длительности разряда), а также настройка системы управления плазмой.
- 2023 – 2024 года получение разрядов с диверторной конфигурацией в режиме омического нагрева с близким к номинальному значению току плазмы.

2021



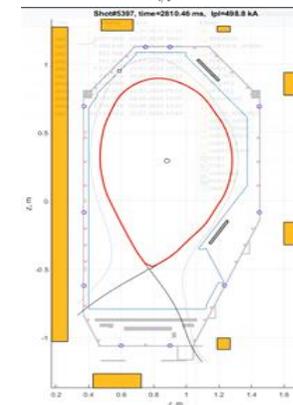
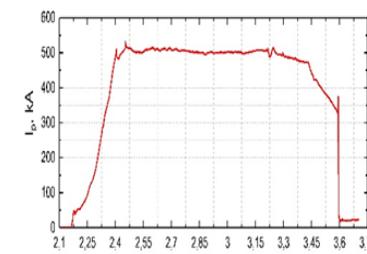
Ток плазмы 400 кА
Длительность разряда
0,5сек

2022



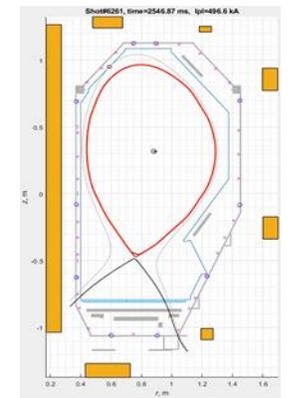
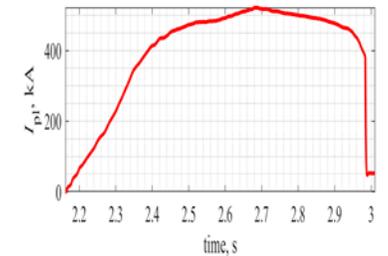
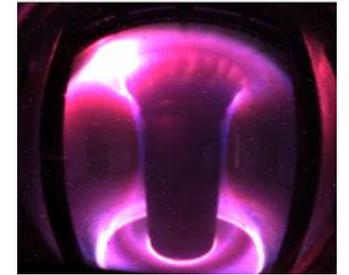
Ток плазмы 450 кА
Длительность разряда
до 1 сек

2023



Ток плазмы 500 кА
Длительность разряда
до 2 сек, диверторная

2024



Ток плазмы 700 кА
Длительность разряда
до 1 сек, диверторная



Финансирование работ по Программе в 2024 году

- **Республика Казахстан**

- **Министерство Энергетики РК** (бюджетная программа на **2024-2026 гг.** «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ» в рамках Целевой программы «Развитие атомных и энергетических проектов», мероприятие «Прикладные научные исследования технологического характера в сфере атомной энергетики». Общая сумма финансирования на 2024-2026 годы – 816,459 млн тенге (168,7 млн руб.). Исполнители: НЯЦ РК, ИАЭ НЯЦ РК, ИЯФ РК.

- **Российская Федерация**

- **ГК РОСАТОМ** (договор с НИИЭФА № 1/28123-Д от 18 июля 2023 г. на **2023 год.**)
(10 млн рублей). **Договор в 2024 год заключен не был.**
- **Министерство образования и науки.** Грант в форме субсидии на **2023-2024** гг. на 30 млн рублей. Соглашение МОН РФ с ТПУ №075-15-2023-615 от 30.08.2023 г. **На 2024 год – 15 млн руб.**
- **Исполнители: ТПУ, ФТИ и НИИЭФА.**

- **Республика Беларусь** – бюджетные средства **НАН РБ**

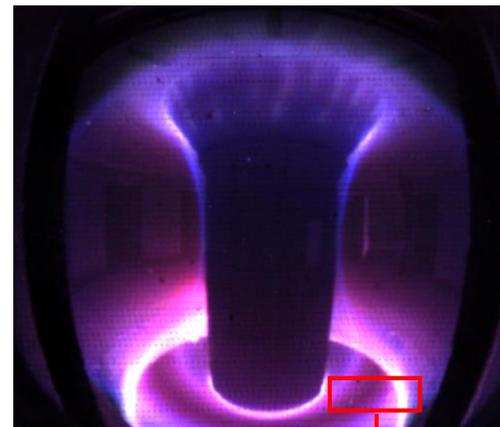
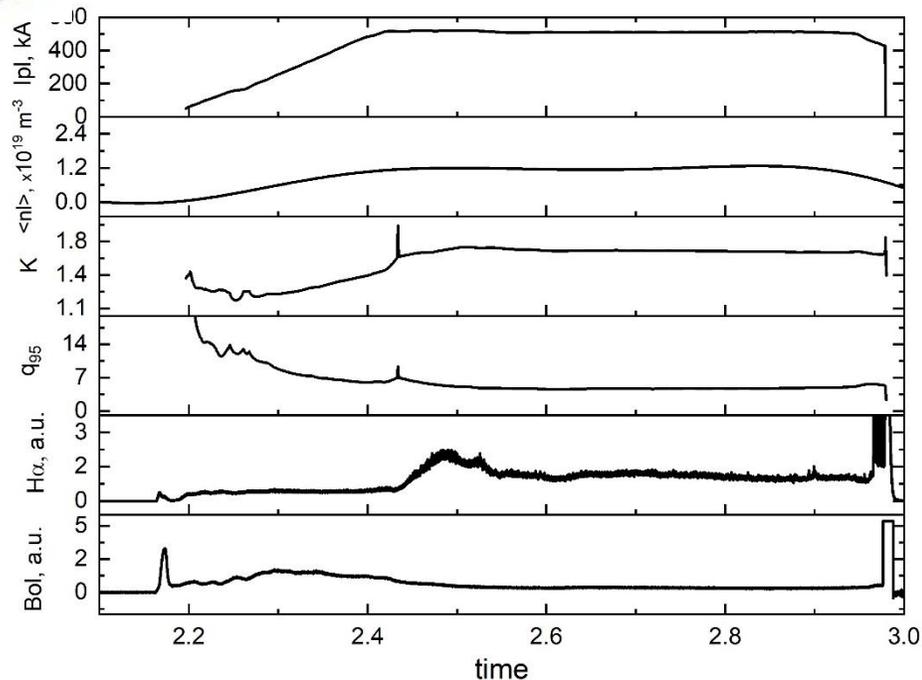


Результаты работ 2024 года

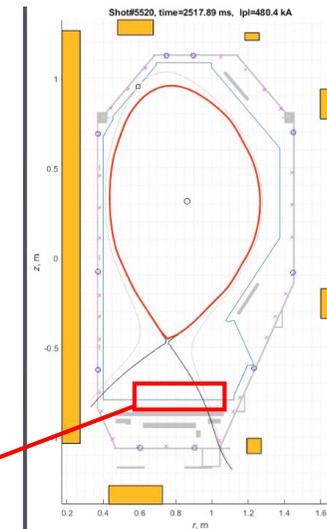
- Получены стабильные плазменные разряды в лимитерной и диверторной конфигурациях с током плазмы $I_p \approx 500$ кА в режиме омического нагрева плазмы с вытянутостью по вертикали k от 1,4 до 1,7 и длительностью разряда до 2 с; при тороидальном поле на оси равным 0.9 Тл и плотностью до плазмы до $2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Впервые были получены новые плазменные разряды со стартом от 25 кА тока в центральном соленоиде с током плазмы 500 кА с вытянутостью k до 1,6 и длительностью до 2 с. В ноябрьской кампании 2024 года получены плазменные разряды с током плазмы 700 кА, длительностью до 1 секунды и плотностью плазмы до $3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, мощность тепловой нагрузки на приемные диверторные пластины до 5 МВт/м²
- Проведены испытания системы ВЧ нагрева плазмы на эквиваленте активной нагрузки, получена заданная частота ВЧ генератора порядка 14 МГц. Показана работоспособность всех элементов ВЧ системы: лампы, фидера, генераторы. Разработана конструкция эквивалента плазменной нагрузки, которая позволяет достигать поглощения не менее 99% падающей мощности и высоких добротностей ($Q > 30$), при которых ожидается устойчивая работа автоколебательного генератора.
- В рамках разработки концептуального проекта диагностики томсоновского рассеяния для токамака КТМ предложены схемы зондирования плазмы и сбора рассеянного лазерного излучения. Сформулированы требования к диапазону значений температуры и концентрации электронов, измерение которых должна обеспечить данная диагностика.
- Проведена оптимизация контура управления положением и током плазмы, контура быстрого управления вертикальным положением плазмы в части повышения точности управления.



Достигнутые параметры разрядов на КТМ в 2024 г.



Plasma image



Reconstructed plasma shape



Strike point heating zone

Thermal image of the divertor

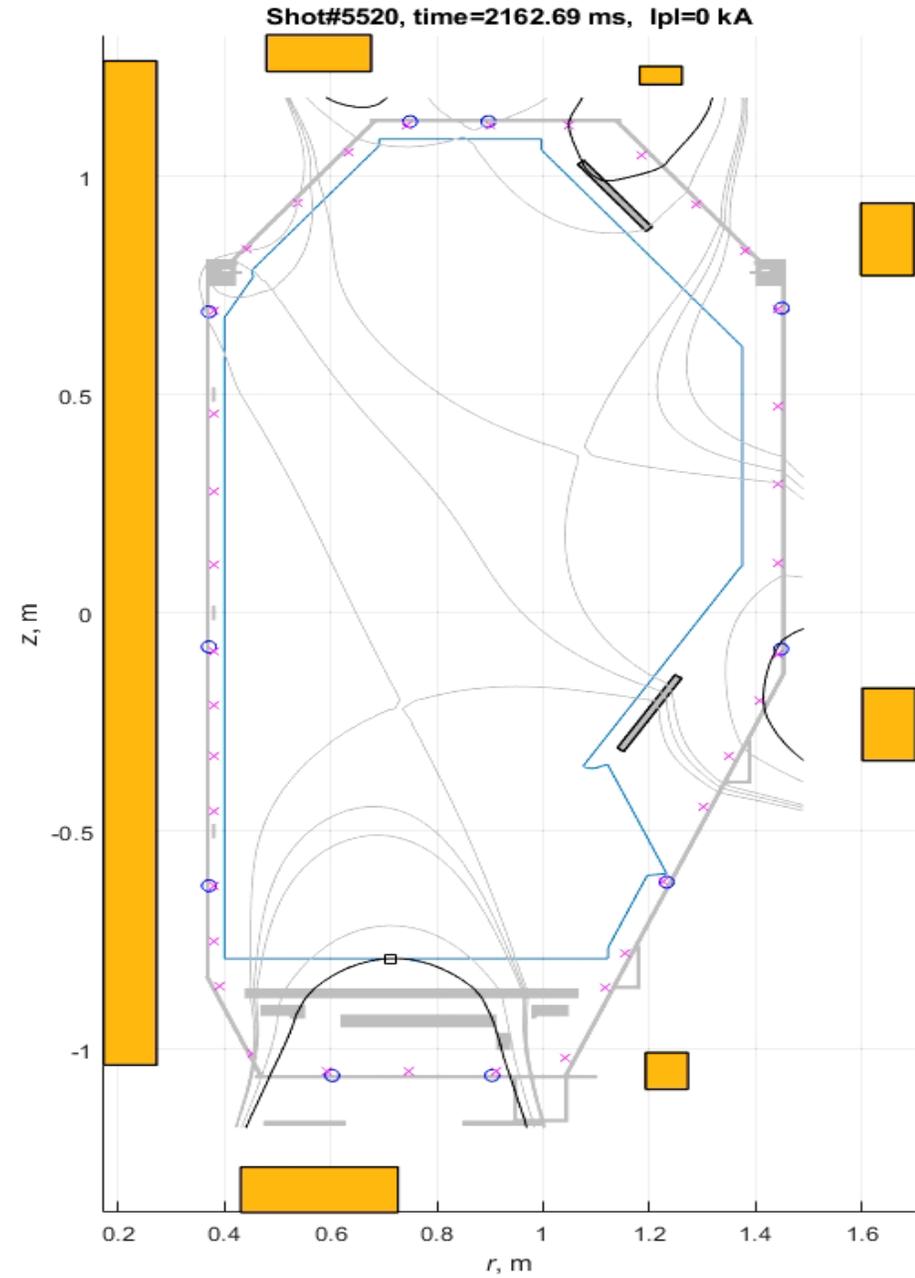
ДОСТИГНУТЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Ток плазмы	500 кА
Плотность плазмы	$2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$
Относительное удлинение	1,7
Продолжительность разряда	до 2 с

Торoidalное поле 0,9 Т

Достигаются стабильные, повторяющиеся разряды в диверторной конфигурации, разряды плазменного тока 700 кА достигнуты, но нуждаются в некоторой оптимизации.

2023 год: ток плазмы $I_p \approx 450-500$ кА; вытянутая по вертикали конфигурация $k=1,6$ длительность разряда до 2 с; плотность плазмы $1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$





Система ВЧ-нагрева плазмы токамака КТМ

1. Проведены эксперименты по проверке работоспособности и тренировке генераторной лампы ГУ-98АМ в режиме холостого хода.
2. Проведены испытания системы ВЧ нагрева плазмы на эквиваленте активной нагрузки (генератор-фидер), рассчитанный на выходную мощность 300 кВт.; получена заданная частота ВЧ генератора порядка 14 МГц.



генераторная лампа ГУ-98АМ в штатном месте установки генератора и штатные средства регулировки накала лампы в генераторе

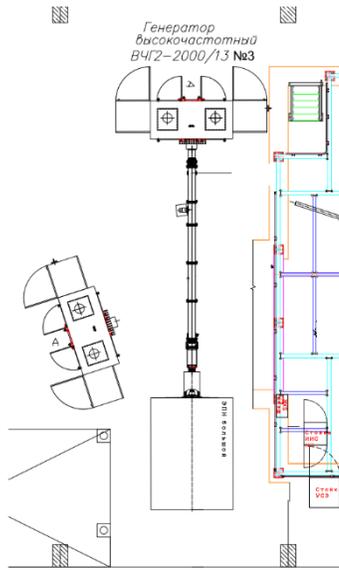
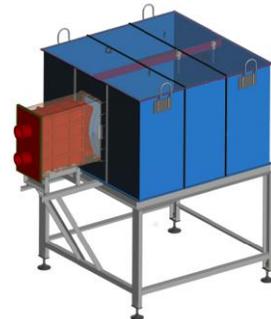


схема размещения большого эквивалента плазменной нагрузки



вид большого ЭПН

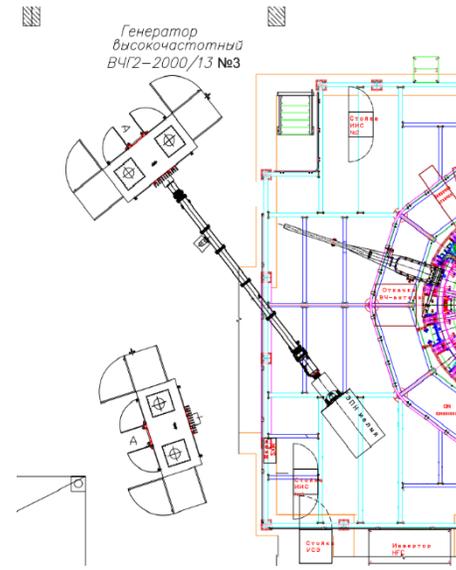
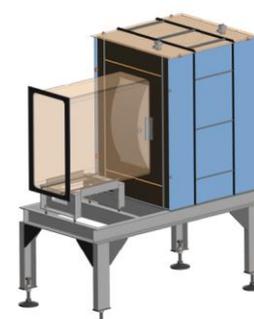


схема размещения малого эквивалента плазменной нагрузки



вид малого ЭПН

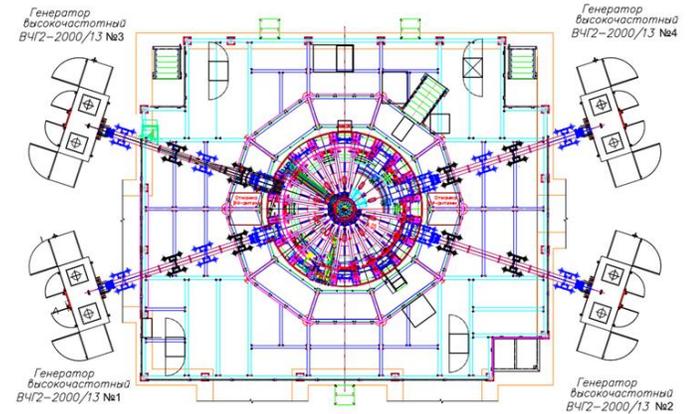


схема расположения генераторов с антенно-фидерными устройствами на токамаке КТМ

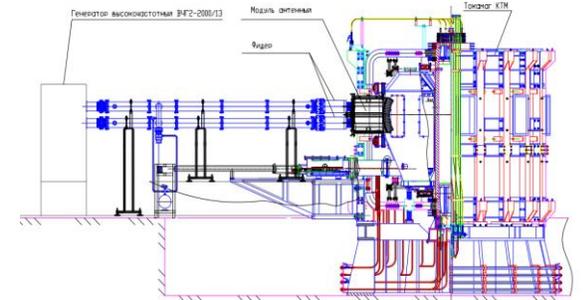


схема одного модуля ВЧ системы нагрева плазмы токамака КТМ



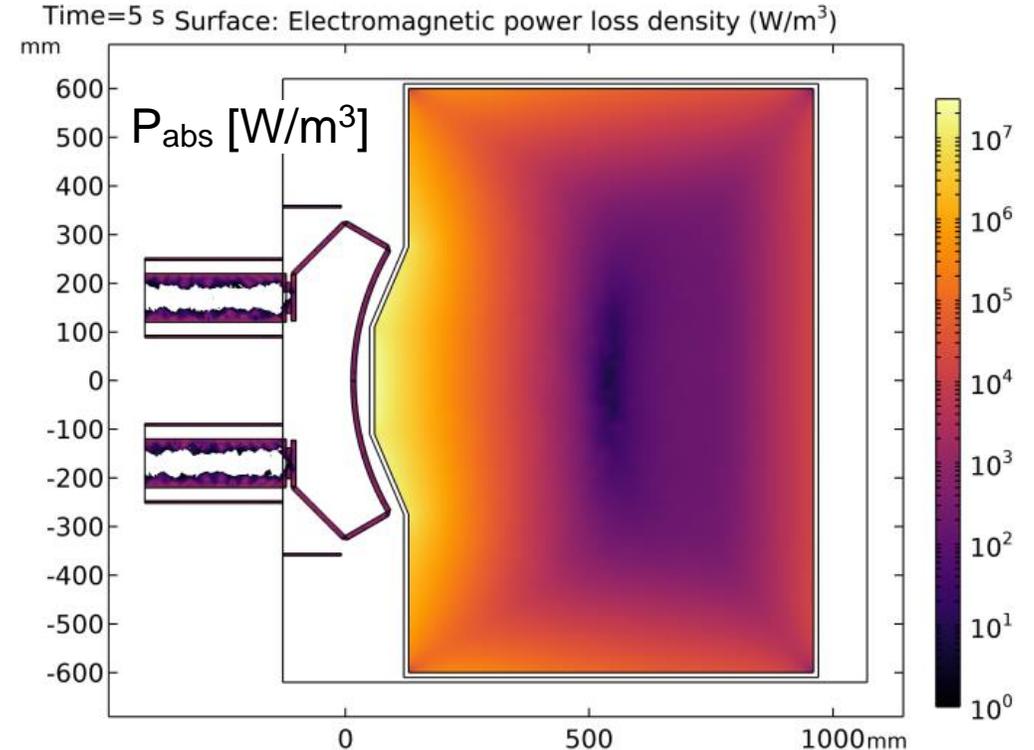
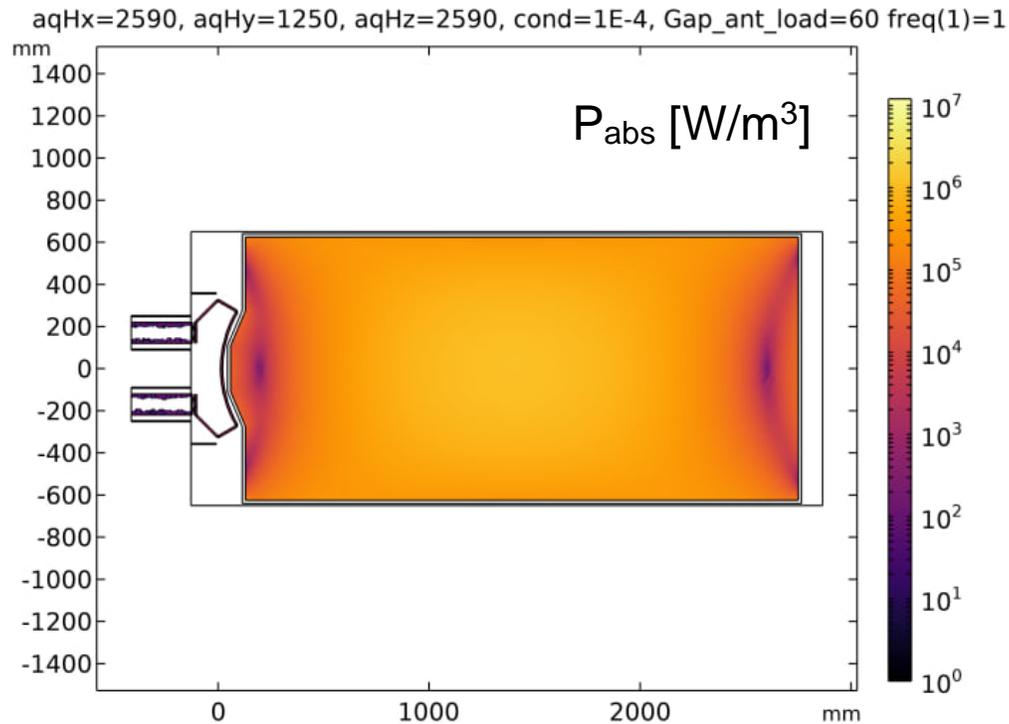
антенно-фидерные устройства на токамаке КТМ



эквивалент активной нагрузки с фидером и ВЧ-генератором



Спроектированы эквиваленты плазменной нагрузки для ИЦР системы токамака КТМ (НИИЭФА, ФТИ, ИАЭ)



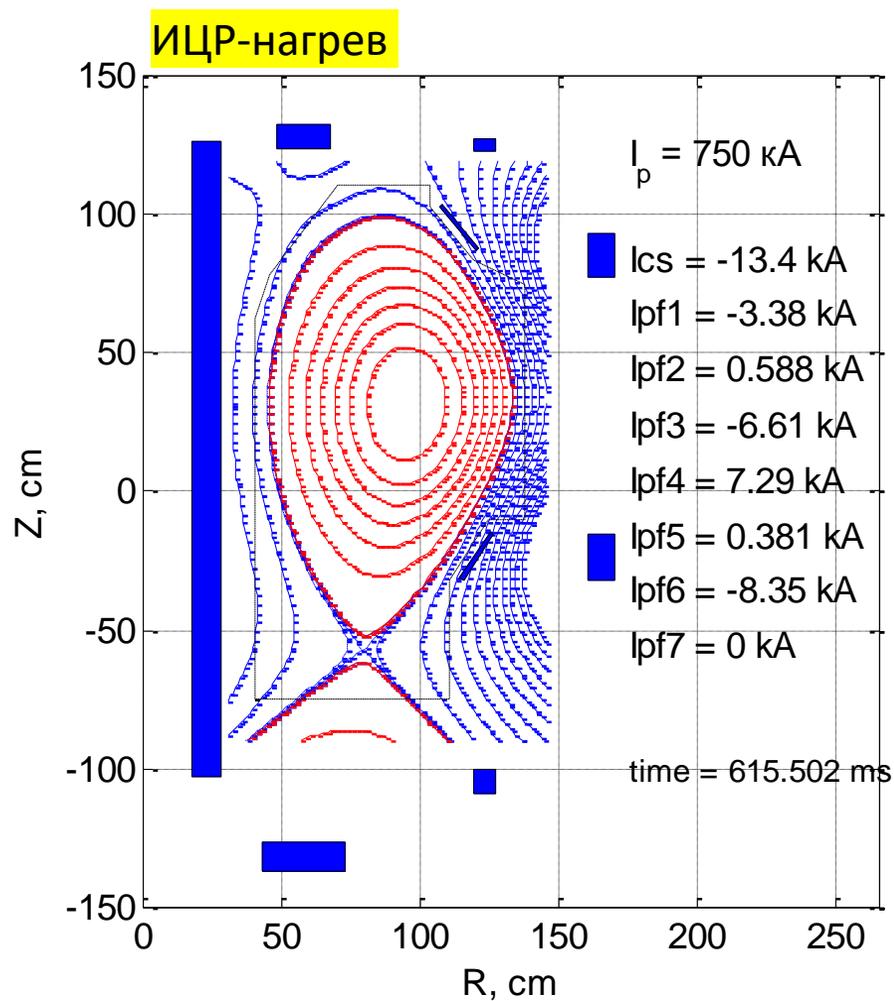
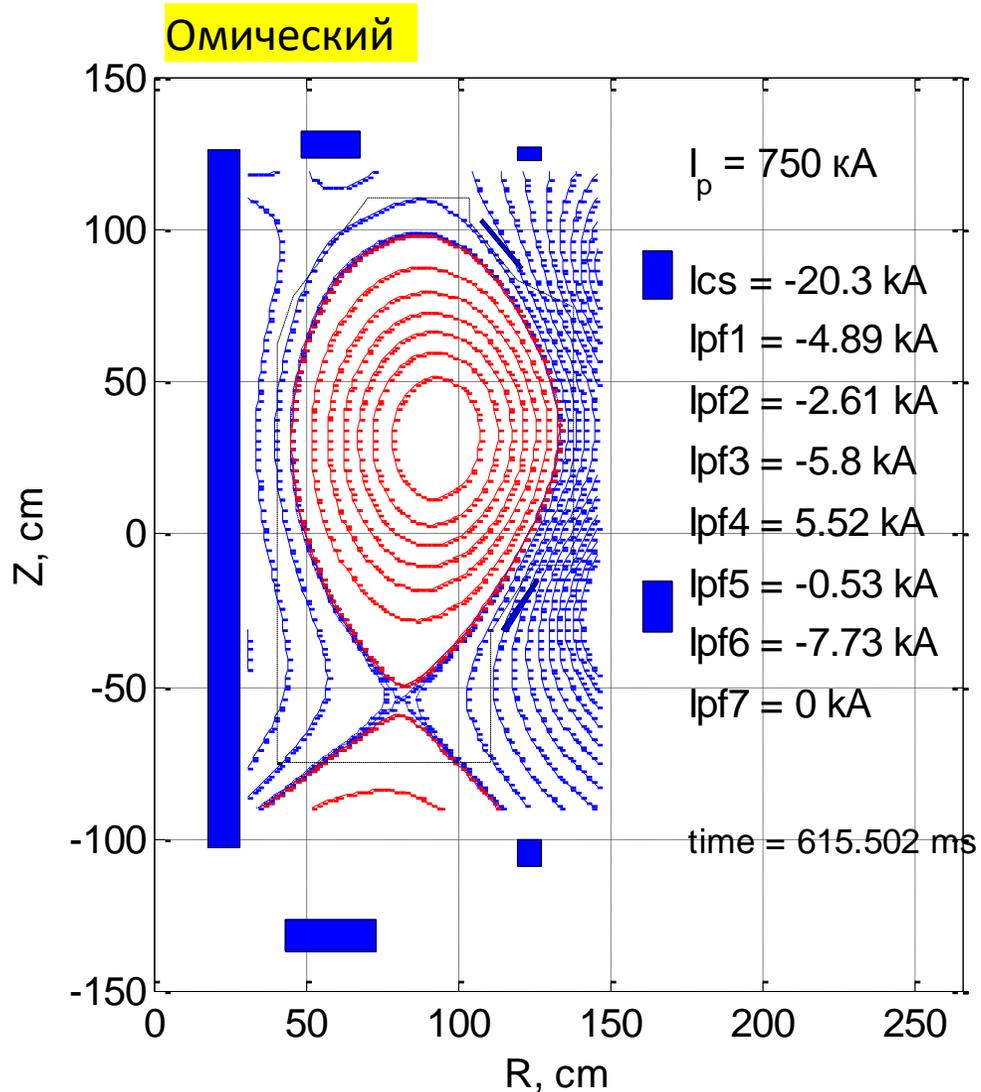
Предложены две конструкции резонаторов с поглотителем в виде бака с водно-солевым раствором с возможностью поглощения до 99% вложенной ВЧ мощности.

$$P_{ICRH} = 2 \text{ МВт} \times 4$$
$$f_{ICRH} = 12.5 - 13.5 \text{ МГц}$$



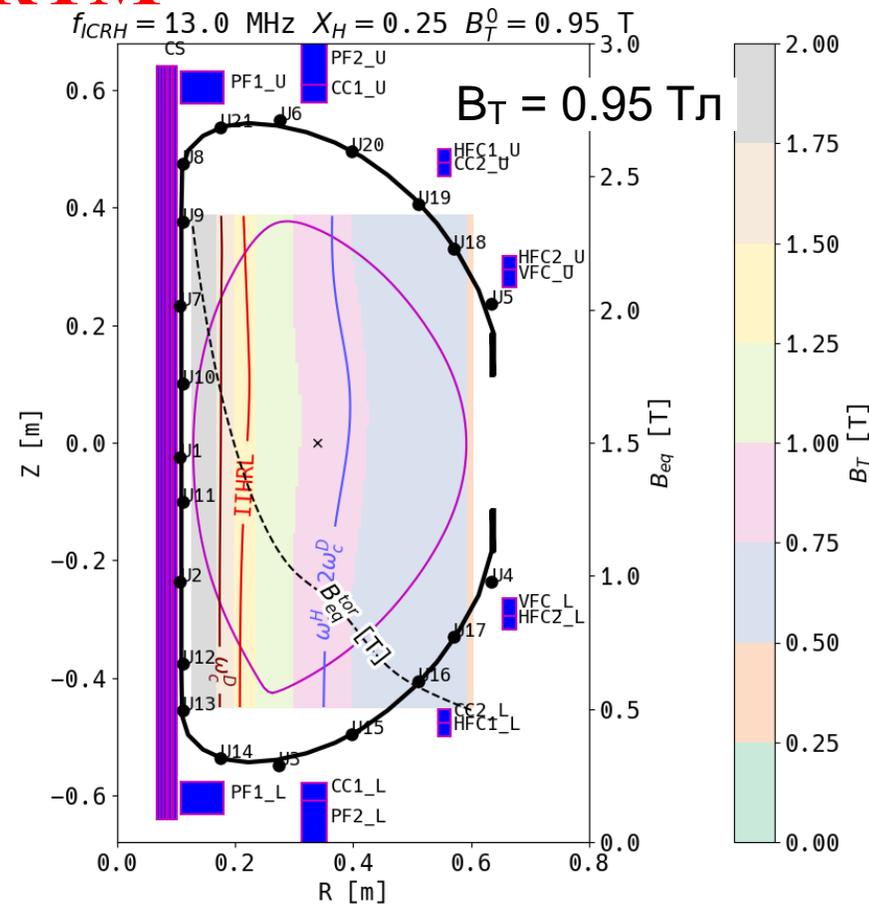
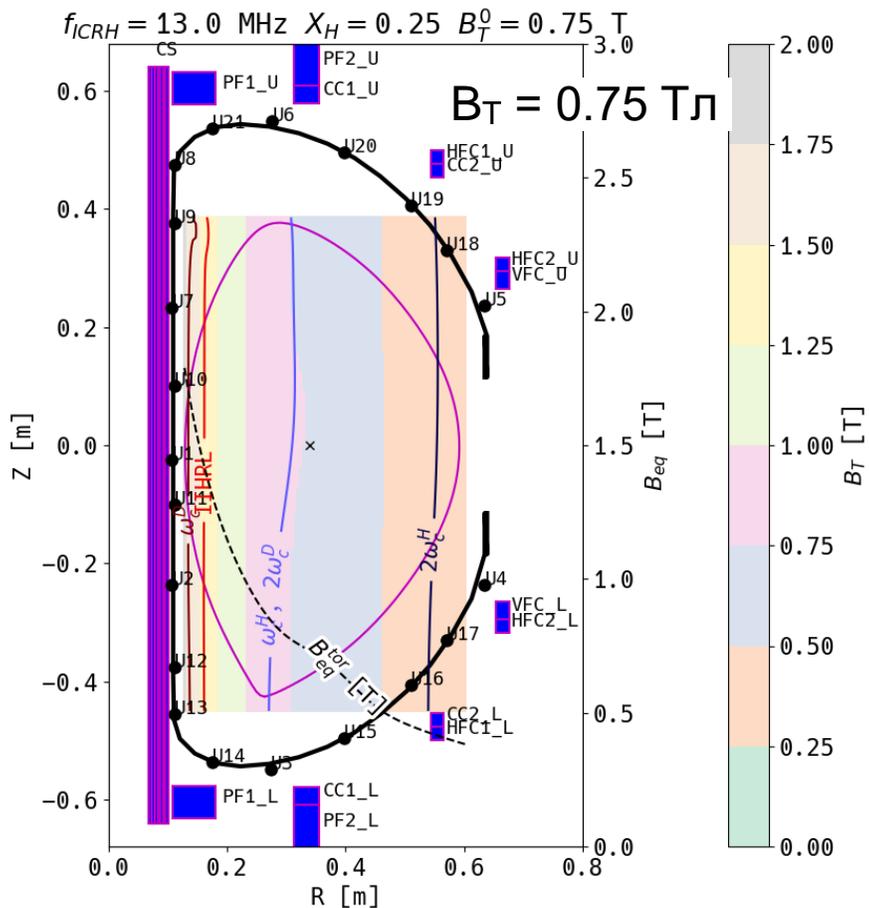
Конфигурация плазмы в КТМ с омическим и ИЦР-нагревом

Сделаны расчеты разряда в КТМ с ИЦР-нагревом (ФТИ им. Иоффе)





Исследование ИЦР на второй гармонике дейтерия и в режиме малой добавки водорода на Глобус-М2 (ФТИ) в условиях, идентичных разрядам КТМ

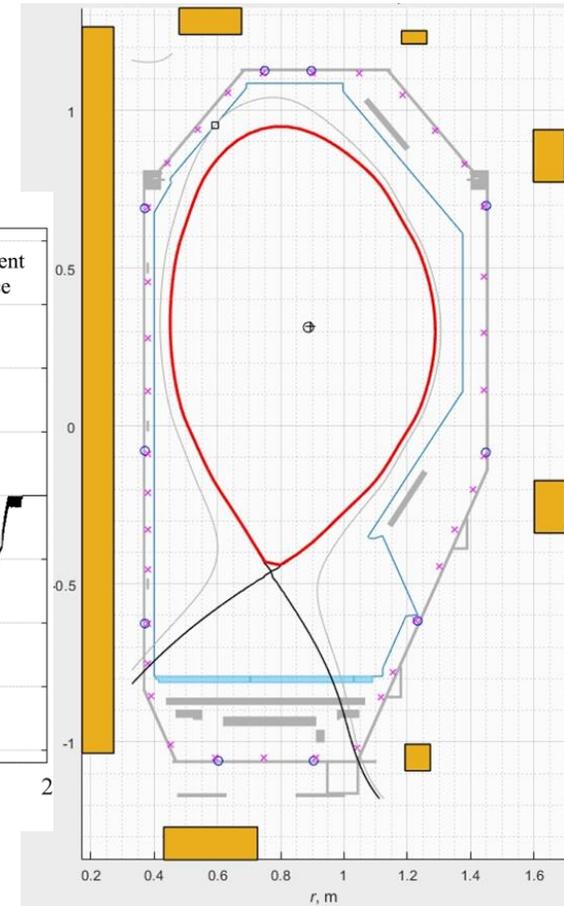
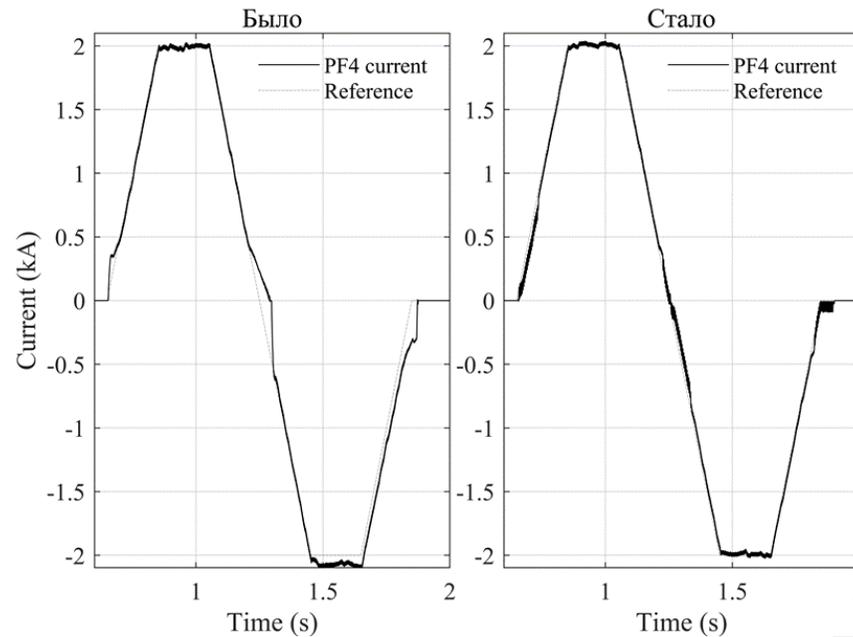


КТМ и Глобус-М2 обладают одинаковым B_T и, соответственно, частотами ИЦР

	КТМ	Глобус-М2
B_T [Тл]	1.0	0.7 - 1.0
f_{ICRH} [МГц]	12.5 - 13.5	11.0 - 13.0
P_{ICRH} [МВт]	2 x 4	0.5 x 1

Работы ТПУ, выполненные в 2023-2024 гг.

- Изменен алгоритм управления током в обмотках PF, улучшено качество реверса тока, повышена точность управления током в обмотках PF.
- Разработан прототип устройства фильтрации для измерения сигналов ЭМД и диагностики МГД.
- Разработан алгоритм реального времени реконструкции формы плазмы для использования в составе контура управления формой плазмы.
- Разработан контур управления плотностью плазмы.
- **Разработанные регуляторы** позволили получить устойчивую диверторную конфигурацию плазмы со следующими параметрами: ток плазмы 500 кА, вытянутость 1.65, треугольность 0.2, длительность разряда 2 сек.





Разработка диагностики томсоновского рассеяния.

2024 г.-разработан концептуальный проект

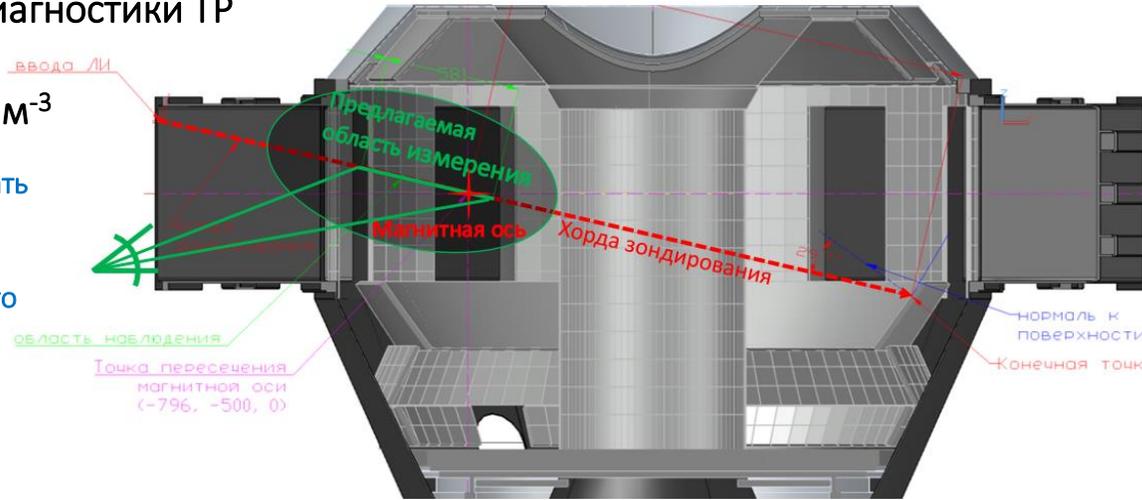
Диапазон измерения диагностики ТР

$$T_e - 5 \text{ эВ} \div 1.8 \text{ кэВ}$$

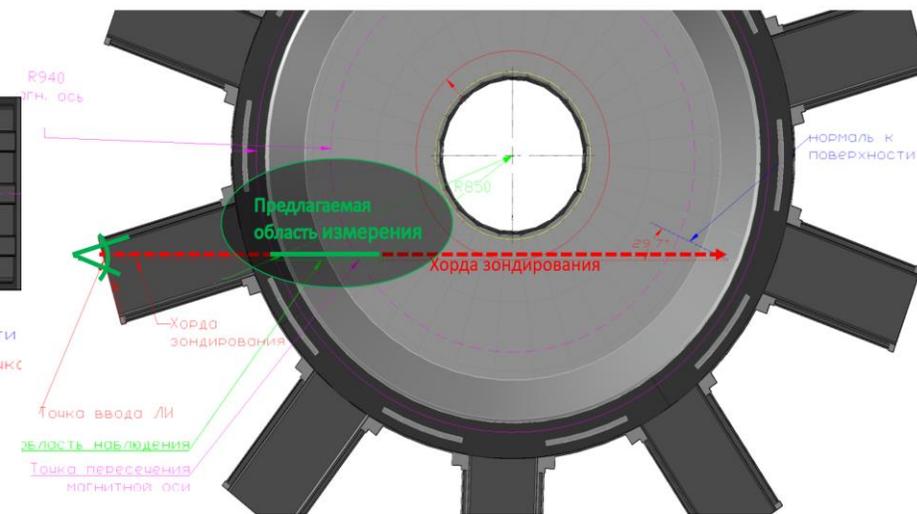
$$n_e - 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3} \div 20 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$$

Диагностика ТР будет обеспечивать прямое измерение плотности и температуры электронов высокотемпературной плазмы, что напрямую повлияет на качество исследований, проводимых на токамаке КТМ.

Экваториальное сечение

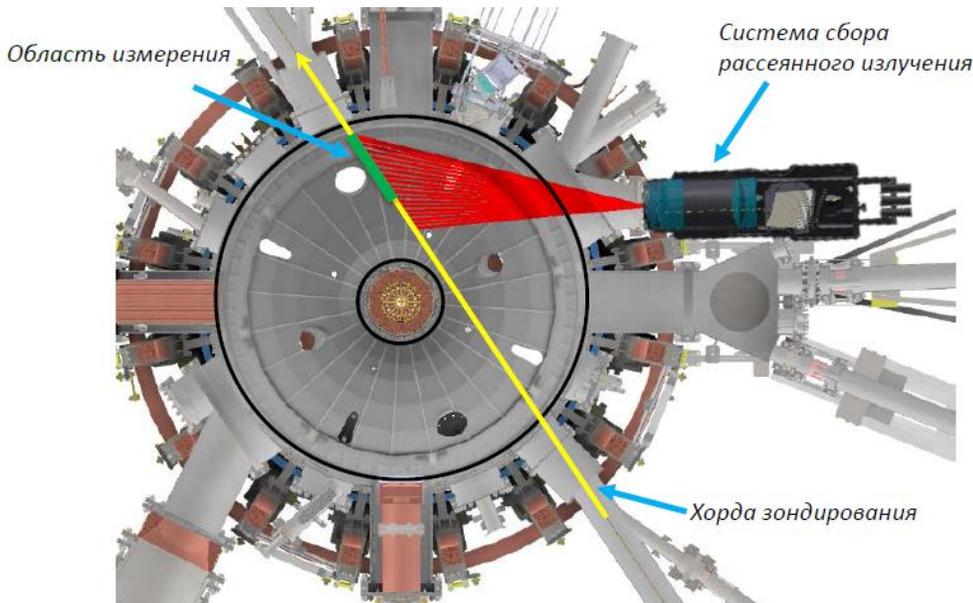


Вид сверху



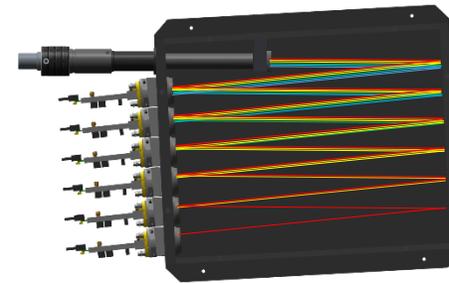
Примеры диагностики ТР на токамаках

Предлагаемая схема тангенциального зондирования диагностики ТР на токамаке КТМ



Основные оборудования для диагностики ТР

Фильтровый полихроматор



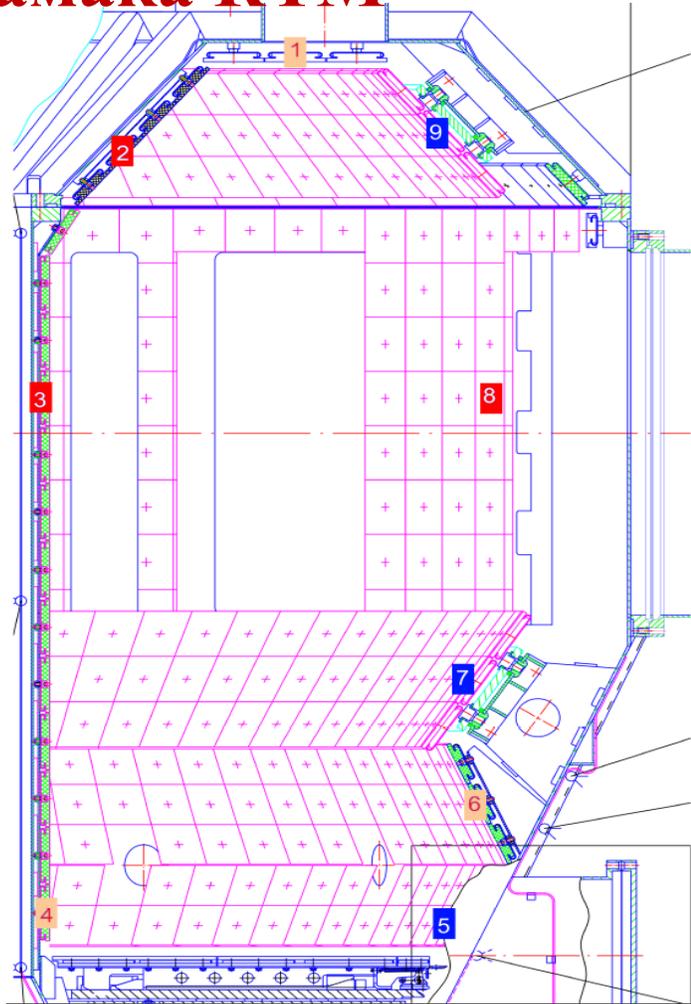
- Высокая чувствительность (широкие фильтры)
- Детекторы с внутренним усилением
- Оптимизированный фильтровый набор
- Простая обработка
- Один прибор на одну пространственную точку

Импульсный лазер Solar LQ929A

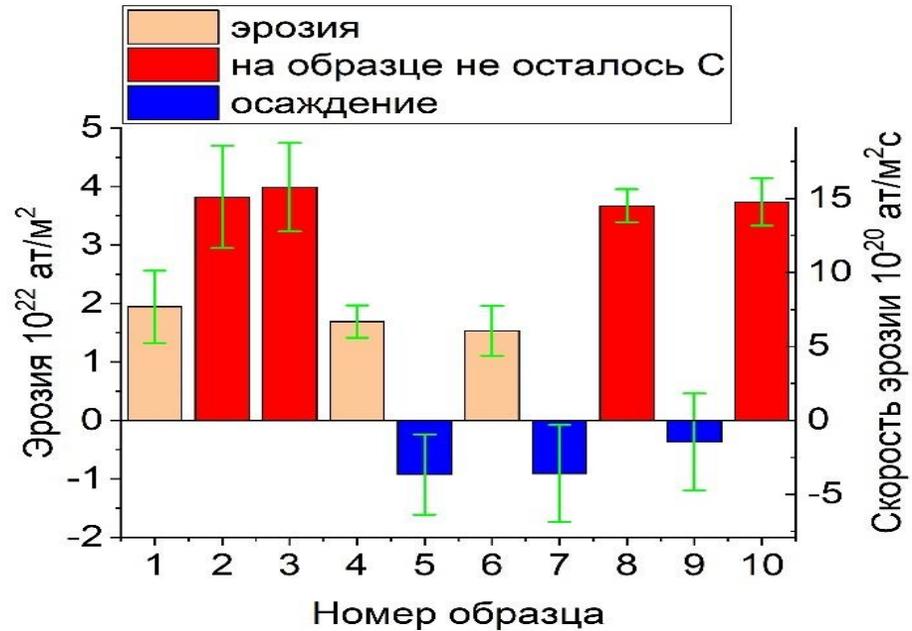




Совместные работы с НИЯУ МИФИ по разработке диагностики транспорта (эрозии и осаждения) материала в камере токамака КТМ



а



б

Распределение эффективных скоростей эрозии и осаждения по полоидальному сечению токамака КТМ в период зимней кампании 2023 года и весенней кампании 2024 года (разряды с 5242 по 5690)

Рисунок а – качественное распределение; красным цветом отмечены диагностические винты, с которых полностью удалено диагностическое углеродное покрытие и возможна только оценка скорости эрозии снизу, бежевым – винты, толщина диагностического покрытия на которых уменьшилась (зона эрозии), синим – толщина покрытия на которых увеличилась (зона осаждения).

Рисунок б – гистограмма скоростей эрозии и осаждения по номерам диагностических винтов. Положительные величины – эрозия, отрицательные – осаждение.

Показана работоспособность масштабируемой системы измерения баланса эрозии и осаждения в токамаке на временах сравнимых с временем экспериментальной кампании.



Планы на будущее.

2025 год

- Планируется проведение первых экспериментов по вводу дополнительной мощности ВЧ нагрева плазмы на КТМ.
- Отработка и оптимизация сценариев плазменного разряда в омическом режиме с током плазмы 750 кА и плотностью до $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Разработка контура управления формой плазмы.
- Реализация проекта диагностики томсоновского рассеяния лазерного излучения на токамаке КТМ
- **2026-2027 гг.** - будут проведены эксперименты по отработке и оптимизации сценариев плазменного разряда и режимов работы ВЧ генераторов. Разработка концепта системы управления реактивной мощности и интеграции ее в САЭ КТМ для совместной работы с системой управления плазмой
- В результате экспериментов должны быть использованы все четыре ВЧ генератора и достигнуты проектные параметры плазменного разряда на токамаке КТМ в режиме с дополнительным нагревом плазмы: 5 с при токе плазмы 750 кА и плотности $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, удельные тепловые потоки плазмы на дивертор должны достигнуть значения до 10 МВт/м².
- Разработка проекта и реализация пассивной схемы диагностики потоков атомов перезарядки на токамаке КТМ.

2028 г. и далее – будут начаты первые полномасштабные эксперименты по исследованию кандидатных материалов первой стенки и дивертора. Одними из первых образцов материалов, планируемых к тестированию на КТМ являются вольфрам и макет литиевого дивертора на основе КПС с системой охлаждения парогазовой смесью низкого давления. Рассматриваются и другие варианты.



Спасибо за внимание!