Программа совместных работ на материаловедческом токамаке КТМ

И.Л. Тажибаева

Совещание представителей научных организаций государств – участников СНГ

15 июля 2025 г., г. Москва

Токамак КТМ и его уникальность

Большой радиус плазмы	0,9 м
Малый радиус плазмы	0,45 м
Аспектное отношение А	2
Удлинение плазмы $К_{95}$	1,7
Тороидальное магнитное поле на оси $В_{то}$	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)

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

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.

История проекта КТМ

2012 год- образование Рабочей группы по совместной реализации проекта создания и проведения исследований на токамаке КТМ в рамках деятельности Комиссии АТОМ-СНГ.

Первое совещание РГ КТМ, **ноябрь 2012 год, г. Алматы -** Определение цели, основных направлений программы и потенциальных участников.

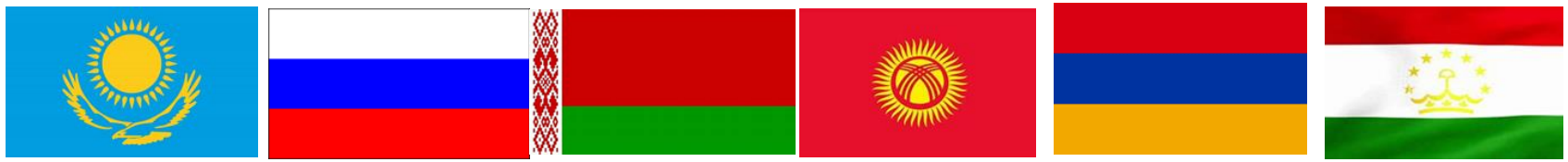
Основной целью совместной программы исследований на токамаке КТМ является обеспечение максимальной интеграции стран СНГ для исследований по термоядерному материаловедению и физике плазмы, разработке новых инновационных технологий и материалов, диагностических методов, включая решение практических задач в поддержку международного проекта ИТЭР, а также создание основ инновационной безуглеродной энергетики на базе управляемого термоядерного синтеза

Механизм реализации:

- **Разработка и подписание межправительственного Соглашение стран СНГ**
- Международный научно-технический совет КТМ
- Разработка и утверждение совместной программы научных работ

Основные этапы работ РГ КТМ. Разработка и подписание Межправительственного соглашения (МПС).

- ***2014-2016 гг.- разработка и согласование межправительственного Соглашение стран СНГ о совместном использовании токамака КТМ.***
- **26 мая 2017 г., г.Казань** - ***шесть стран СНГ (Россия, Казахстан, Беларусь, Армения, Киргизия, Таджикистан) подписали межправительственное Соглашение о совместном использование токамака КТМ.***



- **Главная цель Соглашения** – создать механизм проведения научных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке учеными из разных стран СНГ. Соглашение создает правовую основу для совместного использования специалистами уникального экспериментального комплекса на территории Казахстана.
- В Соглашении определены направления сотрудничества, предусмотрено назначение компетентных органов и создание консультативного научно-технического совета. Соглашение содержит статьи об экспортном контроле и о защите интеллектуальной собственности, а также о вопросах финансирования.

Принципы финансирования (ст.5 Соглашения)

- «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».

Основные этапы работ РГ КТМ. Разработка и подписание Программы совместных работ.

- *2014-2016 гг.* - **Разработка, согласование программы совместных работ с использованием токамака КТМ в рамках Комиссии АТОМ-СНГ на условиях со-финансирования странами-участницами проекта.**
- **Подписана программа совместных работ РК-РФ с со-финансированием на 2016-2017 гг. для подготовки и проведения физического пуска токамака КТМ.**
- **Подготовлен, согласован и представлен в Исполком Комиссии проект положений Программы «Совместная реализация проекта создания и осуществления программы научных исследований на специализированном токамаке КТМ и финансово-экономическое обеспечение Программы КТМ» на 2018-2019 гг.**
- **Проект МПС СНГ и проект Программы совместных исследований получил одобрение на заседании Экономического Совета стран СНГ 11 сентября 2015 г. и 16-ом заседании Комиссии АТОМ-СНГ, Усть- Каменогорск, ноябрь, 2015.**
- **25 февраля 2016 г., Москва -заседание экспертной группы государств-участников СНГ, согласование проекта МПС и Программы совместных работ и представление на рассмотрение КЭВ СНГ.**
- **Рассмотрение проекта МПС и программы исследований на заседании КЭВ СНГ.**
- **Рассмотрение и одобрение Программы совместных работ на заседании Комиссии АТОМ-СНГ**

Совместная РК-РФ программа НИР по подготовке и проведению физического пуска токамака КТМ

СОГЛАСОВАНО
Президент НИЦ «Курчатовский институт»
Е.П. Велихов
_____ 2013 г.

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального директора - директор
Дирекции по научно-техническому комплексу
Госкорпорации РОСАТОМ
В.А. Першуков
«___» _____ 2013 г.

СОГЛАСОВАНО
Генеральный директор НЯЦ РК
Э.Х. Батырбеков
_____ 2013 г.

Председатель Комитета по атомной энергии
Министерства индустрии и новых технологий РК
Т.М. Жантикин
_____ 2013 г.

ПРОГРАММА РАБОТ
российских и казахстанских специалистов на токамаке КТМ
в поддержку ИТЭР и исследований по УТС

2016 -2017 гг.

1. ***Подготовка к физическому пуску токамака КТМ и выводу в рабочий режим первого этапа: экспертная оценка, отладка и тестирование всех систем, передача опыта и методик.***
2. ***Экспериментальная верификация сценария получения плазменного разряда (получение нуль-поля, пробой, рост и снижение тока плазмы)***
3. ***Проведение физического пуска токамака КТМ с выводом на рабочий режим первого этапа (омический нагрев плазмы)***

Участники первой очереди физического пуска КТМ

(специалисты Национального Ядерного Центра РК, НИЦ Курчатовский институт и Троицкого института инновационных и термоядерных исследований, РФ)

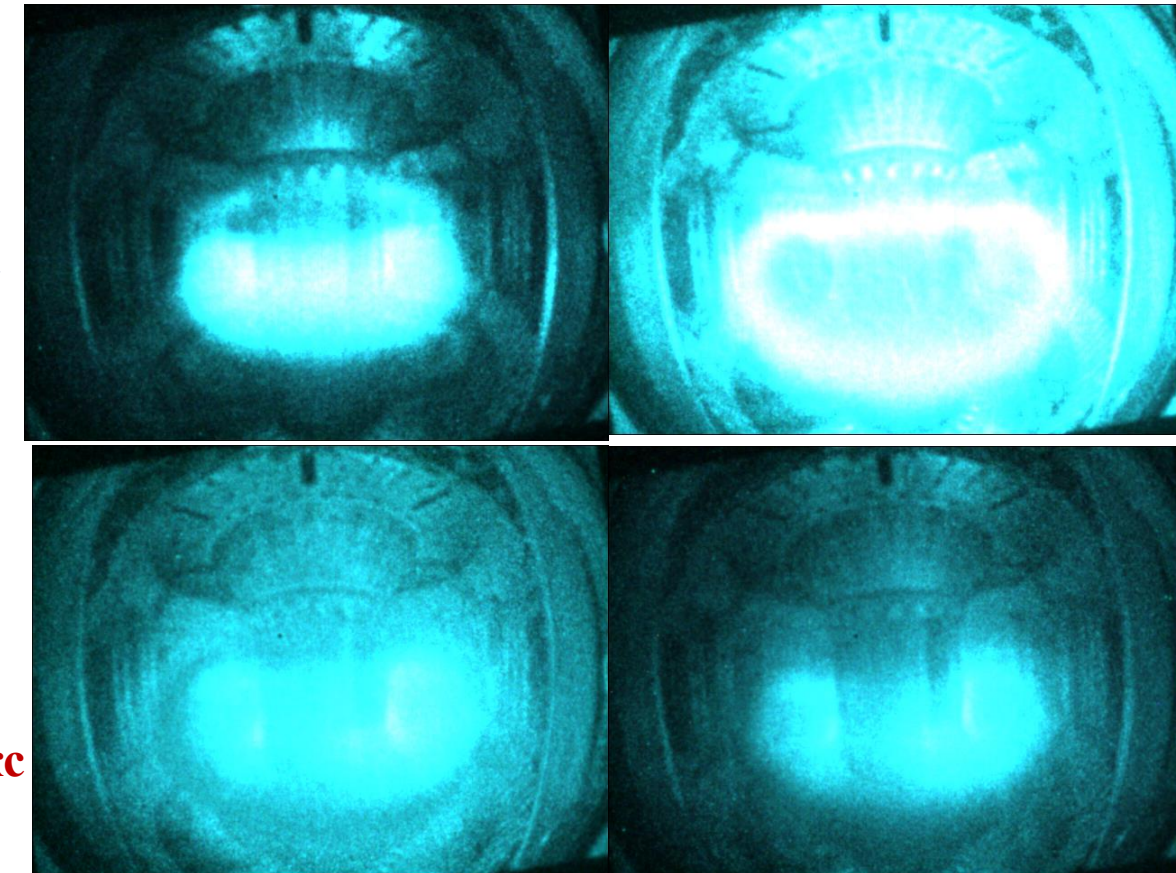
Физический пуск токамака КТМ и ввод в эксплуатацию.

Цель: получение и исследование процесса формирования плазменного шнура на токамаке КТМ в режиме омического нагрева на пониженных параметрах с использованием водорода в качестве рабочего газа.

Физический пуск проведен совместно специалистами Казахстана и России.

В результате бысли достигнуты следующие параметры плазменного разряда:

- **максимальный ток в импульсе плазменного разряда ~ 100 кА**
- **время импульса плазменного разряда ~ 70 мс**
- **ток тороидального поля 50 кА (~ 0.9 Тл)**
- **круглое сечение плазменного шнура**
- **электронная плотность плазмы n_e не превышала – $5 \cdot 10^{18}$ м$^{-2}$**



Это соответствует расчетным параметрам заключительного этапа физического пуска токамака КТМ. В декабре 2019 г. экспериментальный комплекс КТМ введен в эксплуатацию.

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.

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)

2024-2026 гг.

Программа совместных научных работ стран СНГ с использованием токамака КТМ на 2024-2026 гг. одобрена на заседании Комиссии по экономическому сотрудничеству стран СНГ и утверждена на заседании Экономического совета СНГ в декабре 2023 г. (Реализуется)

Основные организации-участники Программы:

- **Республика Казахстан** – НЯЦ РК, ИАЭ НЯЦ РК, ИЯФ РК,
- **Российская Федерация** -НИЦ «Курчатовский институт», НИИЭФА им. Д.В. Ефремова , АО «Красная Звезда» (НИКИЭТ), Томский политехнический Университет, ФТИ им. Иоффе, НИЯУ МИФИ и др.
- **Республика Беларусь** - ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН, НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета, ООО «Прикладные системы», ГНПО порошковой металлургии.

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)

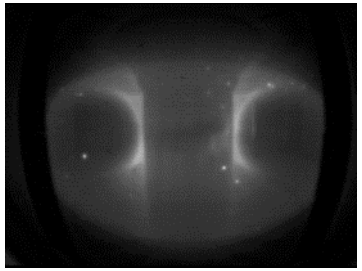
Этап 6. Совершенствование системы контроля и управления плазменным разрядом (РК,РФ)

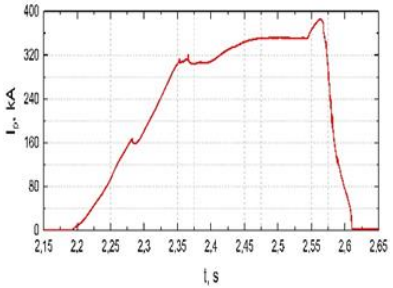
Результаты совместных работ по Программе

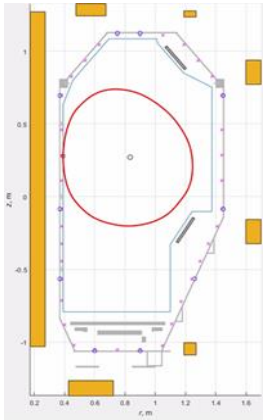
Хронология событий:

- 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 – 2025 года получение разрядов с диверторной конфигурацией в режиме омического нагрева с номинальным значением тока плазмы.

2021

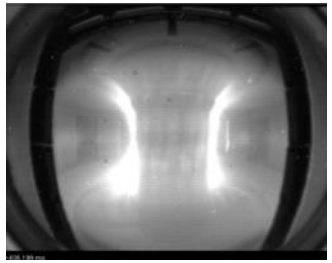


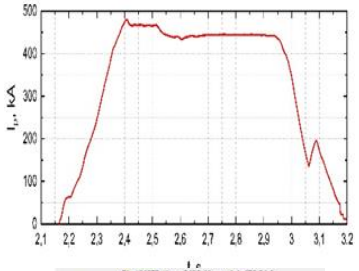


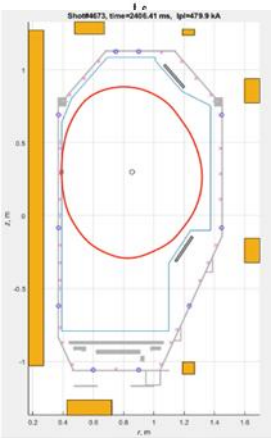


Ток плазмы 400 kA
Длительность разряда 0,5сек

2022

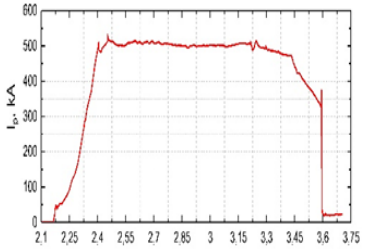


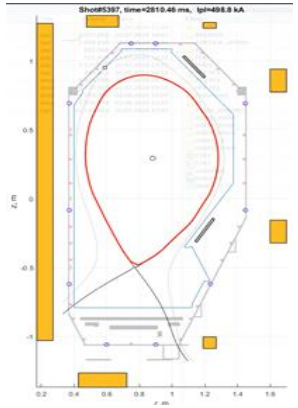




Ток плазмы 450 kA
Длительность разряда до 1 сек

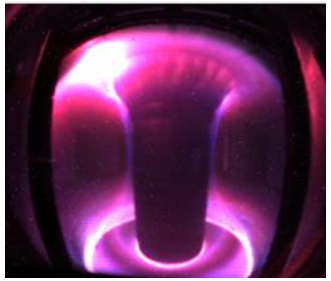
2023

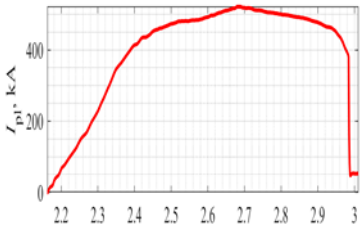


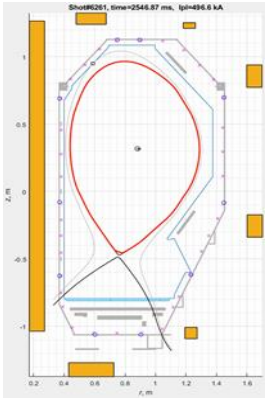


Ток плазмы 500 kA
Длительность разряда до 2 сек, диверторная

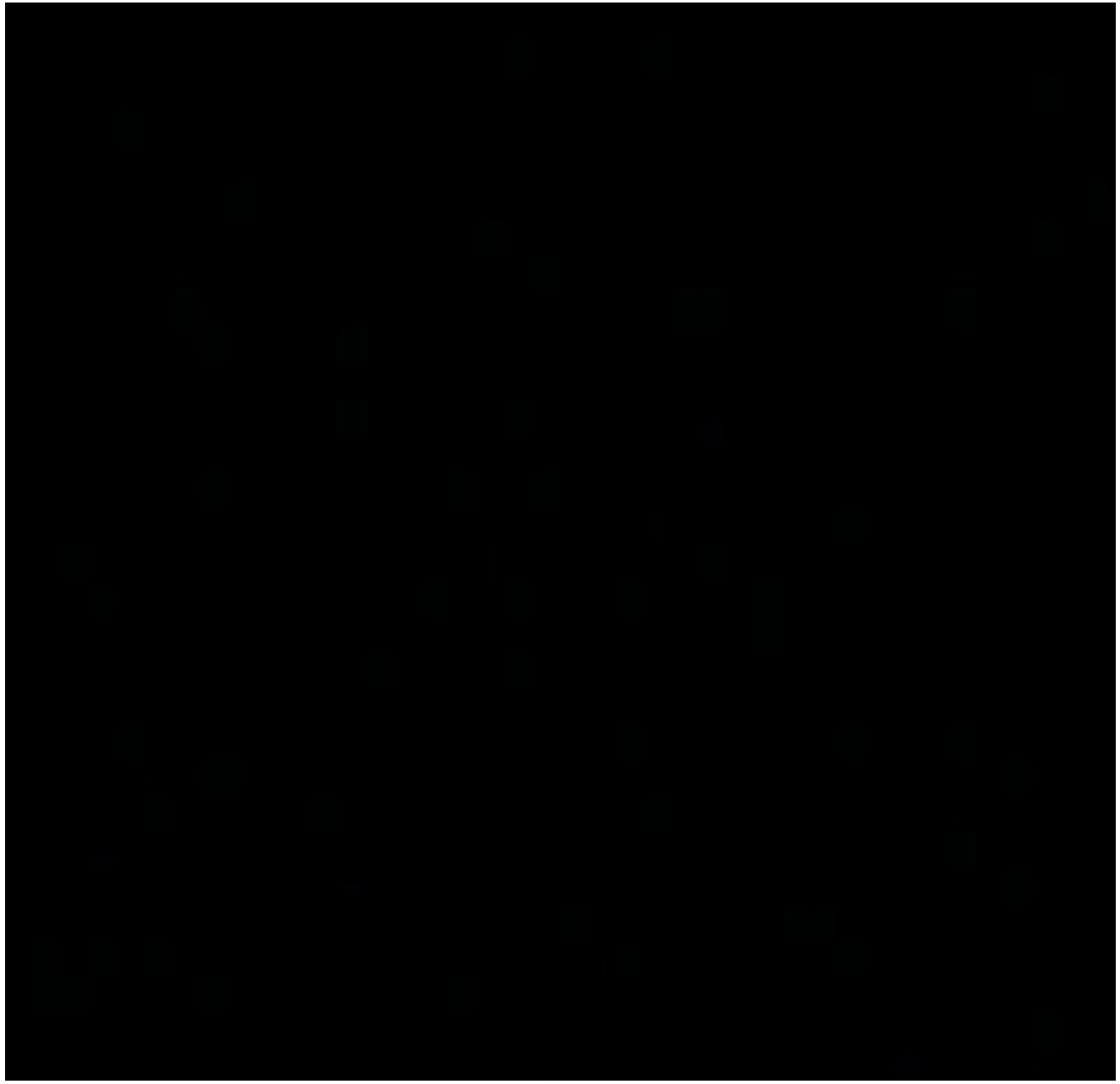
2024/2025

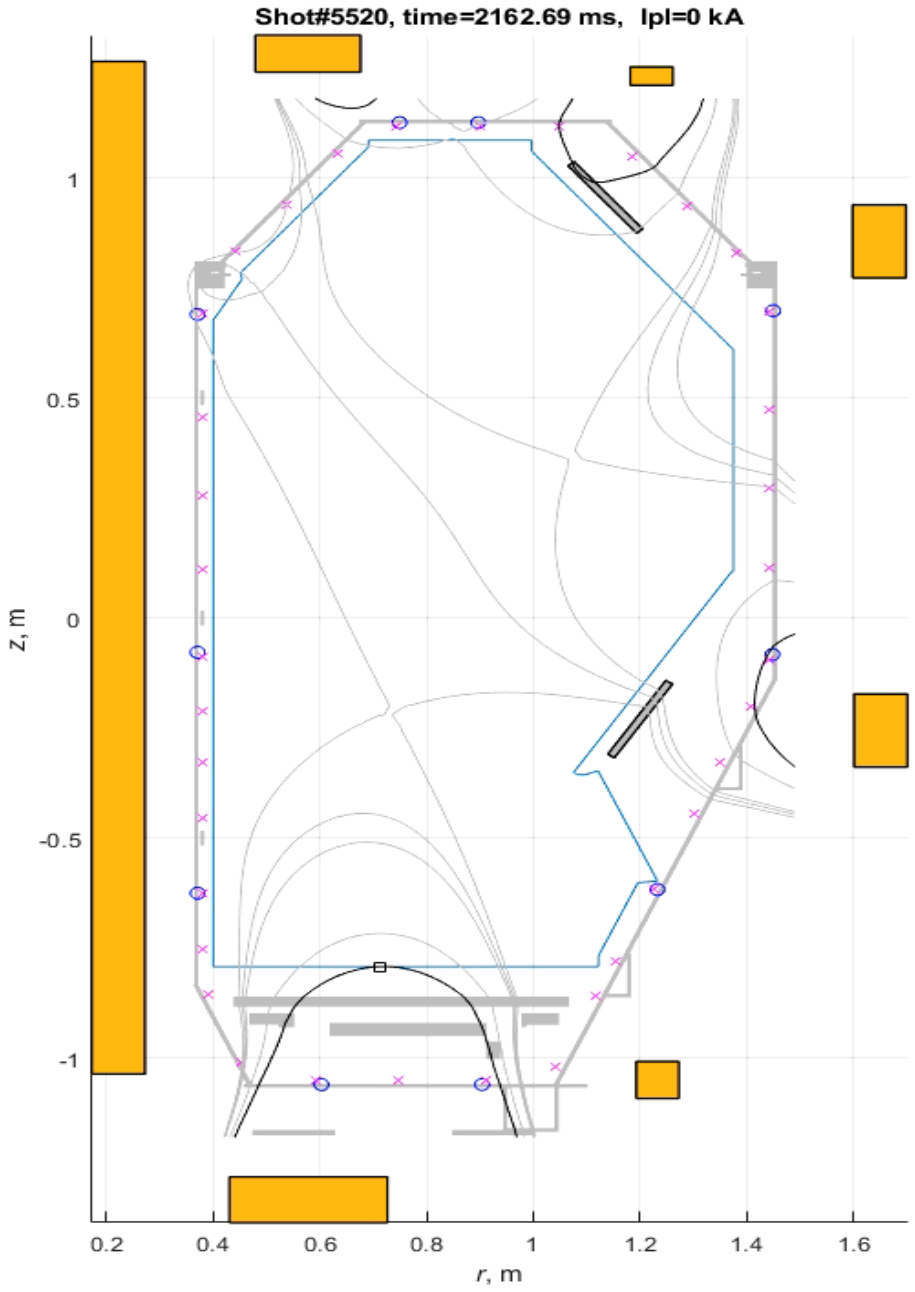






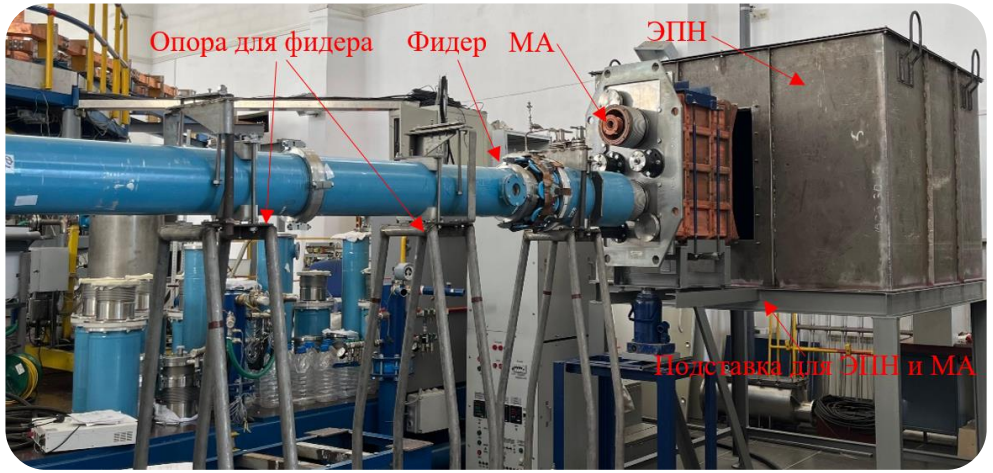
Ток плазмы 700-750 kA
Длительность разряда до 1 сек, диверторная




Shot#5520, time=2162.69 ms, Ipl=0 kA
1
0.5
0
-0.5
-1
z, m
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
r, m

Ввод в эксплуатацию системы ИЦР-нагрева

1. Проведены испытания первого ВЧ-генератора на эквивалент активной нагрузки - каждая лампа по отдельности.
2. Впервые проведены испытания ВЧ-генератора на эквивалент активной нагрузки одновременно двух ламп в совместном режиме. Для испытаний был изготовлен второй эквивалент активной нагрузки.
3. Изготовлены два эквивалента плазменной нагрузки (большой и малый).
4. Ведется подготовка к испытанию первого генератора на эквивалент плазменной нагрузки.
5. Работы ведутся при поддержке специалистов НИИЭФА и ФТИ им. Йоффе

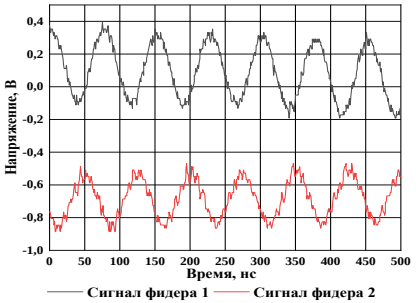


Сборка большого ЭПН в центральном зале токамака КТМ

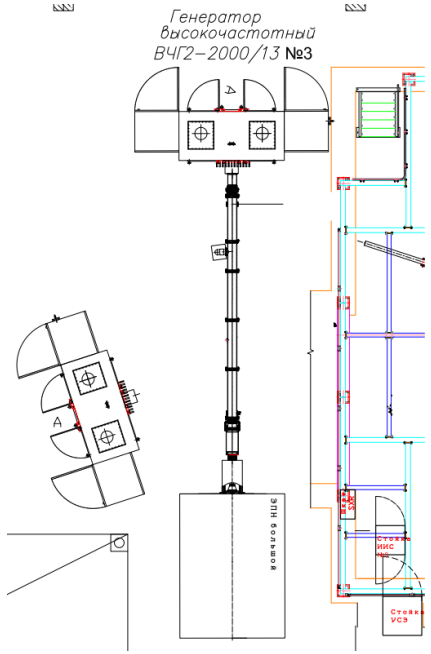
К концу 2025 года запланировано проведение первых экспериментов по ИЦР нагреву плазмы КТМ

Два ЭАН установленные на фидерах

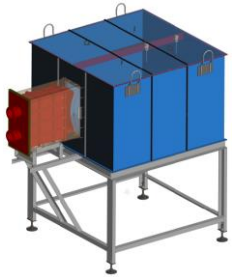
Эквиваленты активной нагрузки в сборе с коаксиальными фидерами и генератором



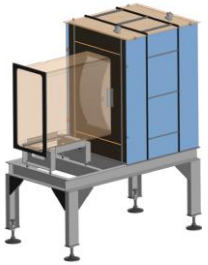
Сигналы с фидеров во время работы ламп на два ЭАН в совместном режиме



Компоновка большого эквивалента плазменной нагрузки (ЭПН) в центральном зале КТМ



Большой ЭПН



Малый ЭПН

Финансирование работ по Программе.

- **Республика Казахстан**

  - **Министерство Энергетики РК** (бюджетная программа «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». В настоящее время администратором Программы является созданное Агентство по атомной энергии при Президенте РК.

  - **Российская Федерация**

  - **ГК РОСАТОМ** (договора с НИИЭФА им. Ефремова. Исполнители НИИЭФА и ФТИ им. Иоффе)
  - **Министерство образования и науки. Г**рант в форме субсидии Соглашение МОН РФ с ТПУ. **Исполнители: ТПУ, ФТИ и НИИЭФА.**

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

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 5·10^19 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*1019м-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, в т.ч. С различными покрытиями (B4C,BN и др.) и макет сегмента литиевого дивертора на основе КПС с системой охлаждения парогазовой смесью низкого давления. Рассматриваются и другие варианты.

Организационные мероприятия:

- Для реализации межправительственного Соглашения о совместном использовании токамака КТМ, администраторам Программы каждой страны-участницы необходимо определять источник финансирование Программы.
- Для организации работ по Программе проводятся по мере необходимости, но не реже, чем один раз в месяц, оперативные совещания ответственных исполнителей научной программы работ на КТМ по ВКС и телефону для корректировки совместных исследований.
- Принимающая сторона (КТМ, НЯЦ РК) предоставляет рабочее место с доступом к компьютеру и интернету, обеспечивает проживание специалистам других стран- участникам Программы КТМ, время для работы на КТМ в соответствии с предварительно согласованной программой НИР.
- Специалисты, командированные на КТМ , обеспечивают финансирование своей поездки, имеют возможности временного ввоза оборудования и образцов для проведения исследований.

Потенциальные проблемы и риски международных научных проектов

- 1.Обязательность и необходимость наличия юридической основы любого международного проекта- Соглашение о совместном использовании объекта, отслеживание выполнения всех договоренностей с помощью коллективного органа управления проектом.
- 2.Распределение интеллектуальной собственности во время сооружения, эксплуатации и проведении НИР: (в соответствии с понесенными затратами???)
- 3. Возможность коммерциализации технологий и результатов совместных исследований – может быть потенциальной проблемой при неправильном распределении прав на интеллектуальную собственность.
- 4. Необходимость государственной поддержки научных исследований на объектах совместной интеллектуальной собственности.

Потенциальные риски и угрозы невыполнения совместной международной Программы работ

- **Административные и юридические риски**

Различие в правовых системах: патентное право, интеллектуальная собственность, экспортный контроль

- **Финансовые риски**

Неравномерное финансирование: одни участники могут иметь более ограниченные ресурсы по сравнению с другими.

- **Политическая нестабильность**

санкции, смена власти, изменения внешнеэкономической политики.

- **Научные и организационные риски**

Разные научные подходы и методологии: возможны конфликты в понимании целей и методов.

Несовпадение ожиданий: по темпам работы, степени участия, приоритетам.

Трудности в координации: особенно при большом числе партнёров

Проблемы с управлением проектом: неопределенность в распределении ответственности.