



**О ХОДЕ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММЫ
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА КТМ
НА 2018-2020 ГОДЫ
И ПОДГОТОВКЕ ПРОЕКТА ПРОГРАММЫ
НА 2021-2023 ГОДЫ**

**21-е заседание Комиссии государств –участников СНГ
по использованию энергии в мирных целях**



ПРОГРАММА СОВМЕСТНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТОКАМАКЕ КТМ НА 2018-2020 ГГ

Основные организации-участники Программы:

- **Республика Казахстан** – НЯЦ РК, ИАЭ НЯЦ РК, ИЯФ РК,
- **Российская Федерация** -НИЦ «Курчатовский институт», НИИЭФА им. Д.В. Ефремова , ТРИНИТИ, АО «Красная Звезда», Томский политехнический Университет, НИЯУ МИФИ, ООО «ТомИУС», ФТИ им. Иоффе.
- **Республика Беларусь** - ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Белоруссии, НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета

Программа совместных научных исследований на токамаке КТМ на 2018-2020 гг. разработана в соответствии с Соглашением о совместном использовании токамака КТМ, подписанным 26 мая 2017 года в г. Казань. Программа совместных работ на токамаке КТМ одобрена на заседании Экономического Совета СНГ 2 марта 2018 года в г.Москва.

Основные направления работ

- 1.Проведение исследований по физике плазмы
- 2.Проведение исследований по физике взаимодействия плазмы с материалами первой стенки и дивертора при омическом нагреве плазмы
- 3.Материаловедческие исследования конструкционных и функциональных материалов
- 4.Исследование и реализация новых инновационных технологий. Отработка режимов работы литиевого дивертора токамака КТМ.
- 5.Создание и испытание диагностик для исследования взаимодействия плазма-стенка.
- 6.Развитие систем автоматизации, управления и сбора данных, экспериментальная проверка расчетных кодов.



ИТОГИ СОВМЕСТНОЙ ПРОГРАММЫ РАБОТ

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

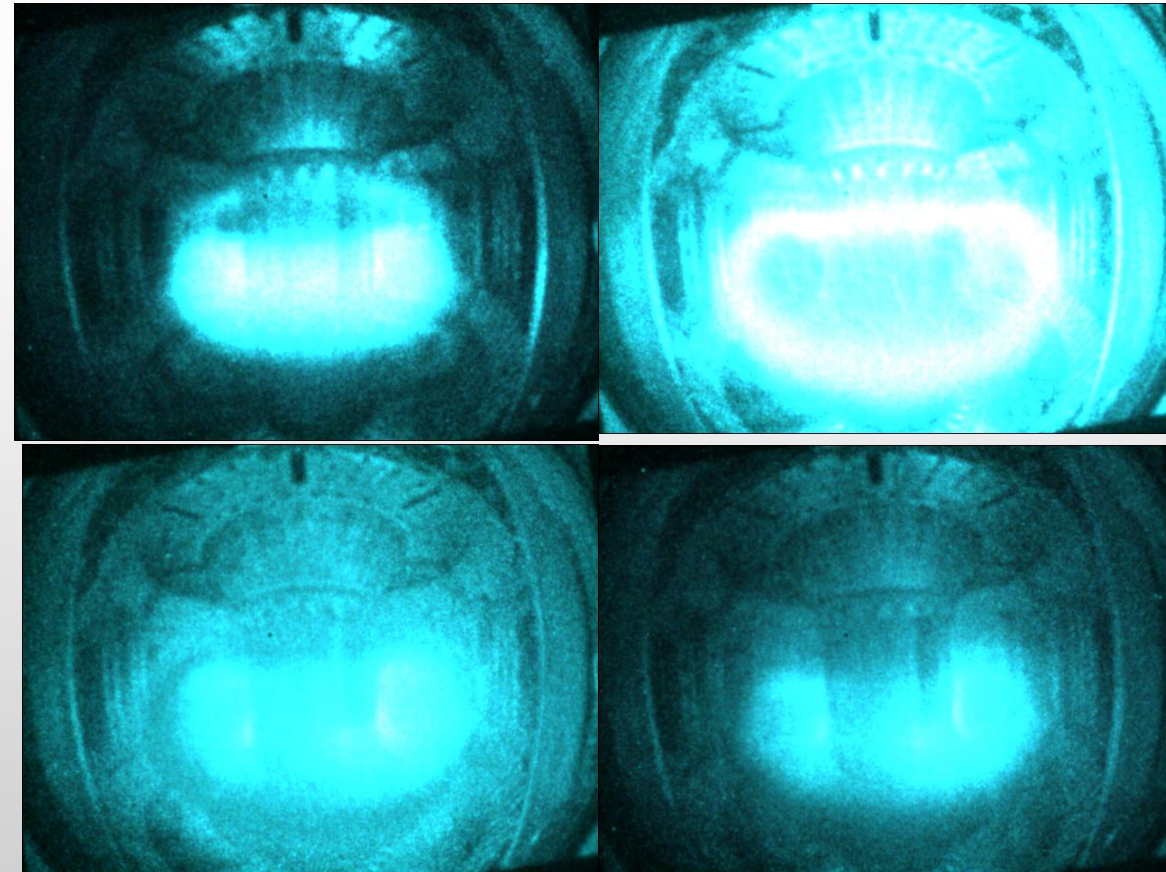
Основной итог: Физический пуск токамака КТМ и ввод в эксплуатацию.

Физический пуск проведен совместно специалистами Казахстана и России.

Были 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 $5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$

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





РАБОТЫ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Финансирование казахстанской части работ проводится Минэнерго РК по программе НТП КТМ на 2018-2020 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».

Основные участники работ: Национальный ядерный центр РК, Институт атомной энергии НЯЦ РК, и Институт ядерной физики РК.

- ИАЭ НЯЦ РК проведена облицовка внутренней поверхности вакуумной камеры токамака КТМ графитовыми тайлами, отжиг вакуумной камеры вместе с тайлами, очистка внутренних поверхностей с помощью тлеющего разряда;
- ИАЭ НЯЦ РК совместно с ТПУ проведена отладка и настройка системы управления источниками импульсного электропитания электромагнитной системы (ЭМС) токамака КТМ;
- выполнена корректировка системы обратной связи.



РАБОТЫ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

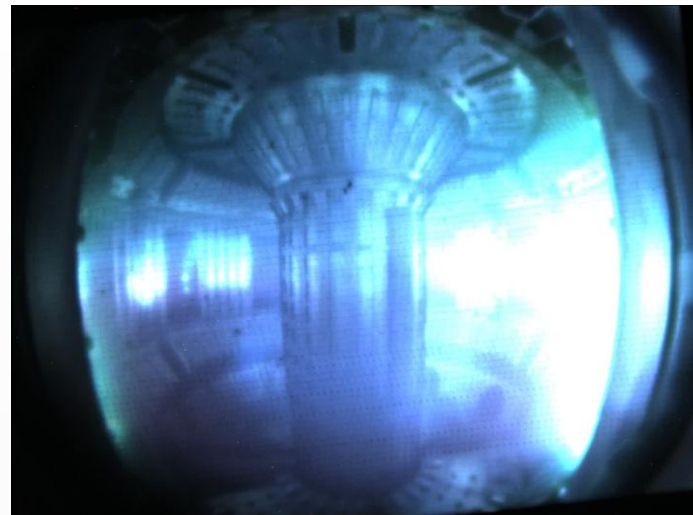
Исследование процесса формирования плазменного шнура токамака КТМ в режиме омического нагрева. проведены:

- расчеты сценария плазменного разряда с увеличенными параметрами тока плазмы, плотности, температуры и времени разряда относительно достигнутых на предыдущем этапе 2019 года.
- настройка и отладка режимов работы ИП с использованием регуляторов тока для получения задаваемого токового сценария в обмотках ЭМС токамака КТМ; настройка режима реверсирования тока ИП CS.
- эксперименты по получению плазменного разряда и исследованию процесса формирования плазменного шнура.

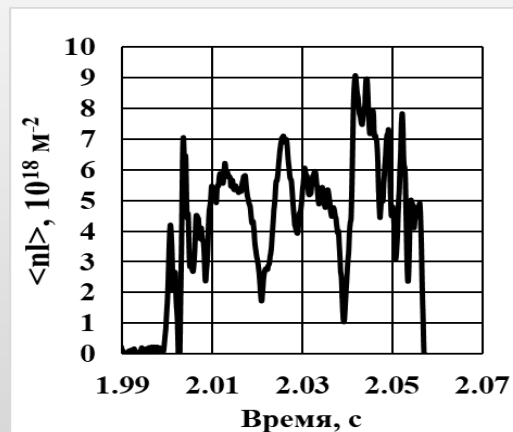
По результатам экспериментов был получен плазменный разряд токамака КТМ на увеличенных параметрах плазмы в режиме омического нагрева:

ток плазмы 120 кА, время разряда 65 мсек, тороидальное поле 1,1 Тл, напряжение на обходе 7В, сечение –круглое.

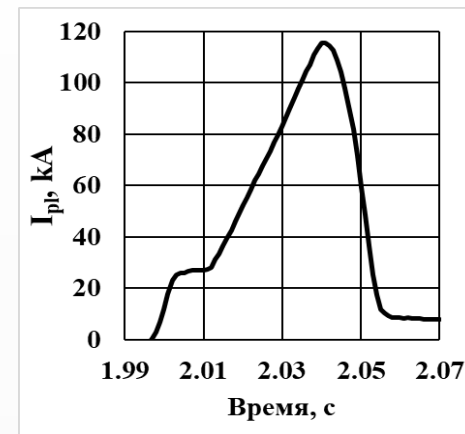
Максимальное значение радиационных потерь плазмы составило около 40 кВт.



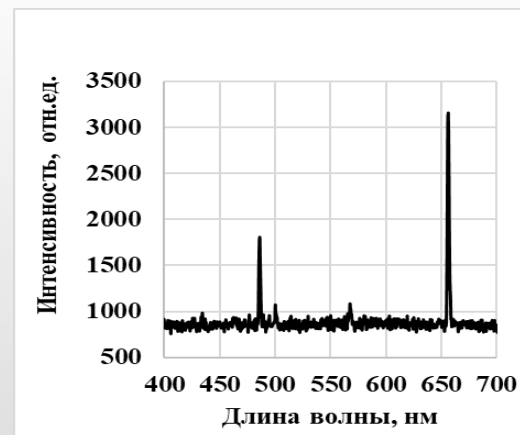
Кадр свечения водородной плазмы с видеокамеры



Измерение среднехордовой плотности плазмы



Полный ток плазмы



Спектр излучения плазмы

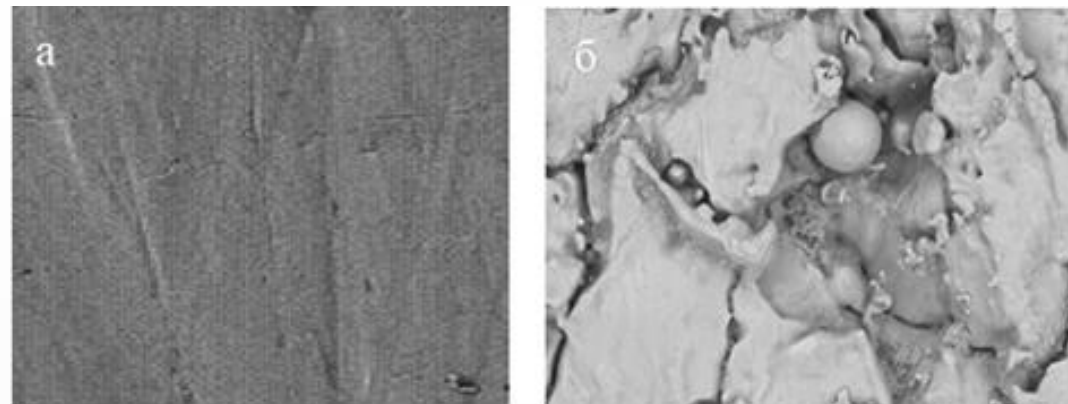


РАБОТЫ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

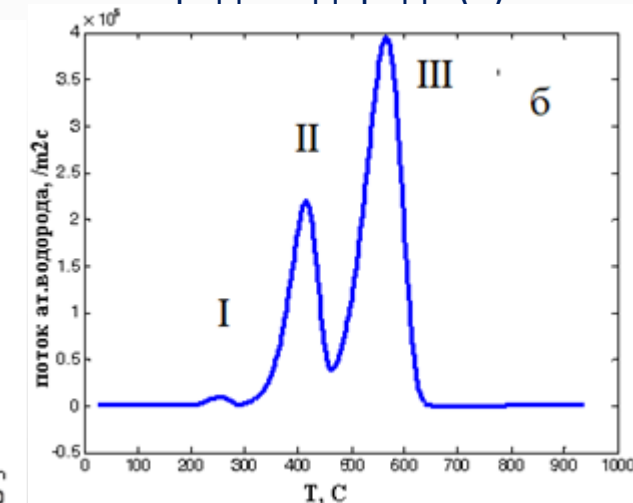
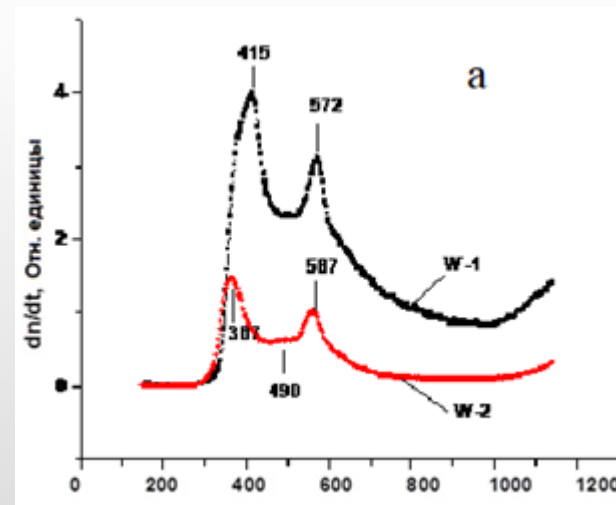
Изучение газовыделения, изменений структуры и механических свойств вольфрама, облученного нейтронами в атмосфере водорода.

Показано, что ОБЛУЧЕНИЕ НА РЕАКТОРЕ ВВР-К НЕЙТРОНАМИ В СРЕДЕ ВОДОРОДА DFW ВОЛЬФРАМА:

- не приводит к существенному изменению кристаллической структуры, фазовым превращениям, формированию выделений новых фаз, наблюдается уширение рентгеновских рефлексов от генерируемых облучением дефектов структуры;
- приводит к изменениям механических свойств: микротвердость уменьшается на 13%;
- ведет к кардинальному изменению структуры поверхности: появлению трещин, уширению границ зерен. Толщина слоя - составляет ~ 20 - 25 мкм.
- на температурной зависимости выделения водорода из облученного образца вольфрама наблюдается 2 пика. Первый пик связан с выходом водорода из комплексов вакансии - атом водорода. Второй пик связан с выходом водорода из комплексов дивакансия - атом водорода.



Структура поверхности образца вольфрама до облучения (а) и после облучения нейтронами в среде водорода (б)



Нормированные на массу спектры выхода водорода из образцов W, облученных на реакторе в среде водорода (а); расчётный спектр термодесорбции водорода из вольфрама (б); плотность дислокации $\rho = 10^{12} \text{м}^{-2}$

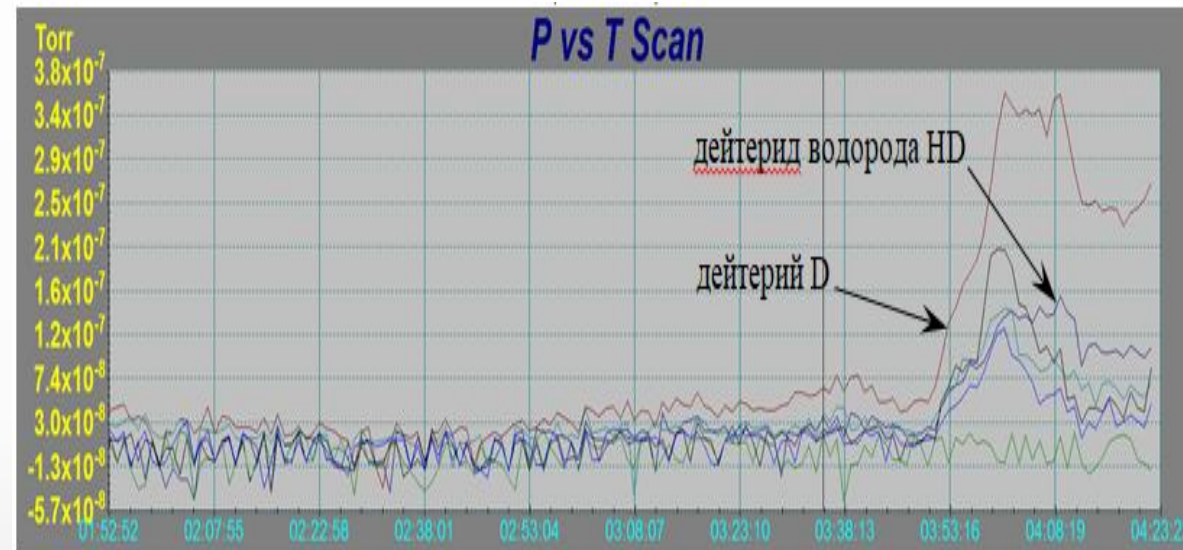


РАБОТЫ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Экспериментальные исследования влияния покрытий на свойства материалов, обращенных к высокотемпературной плазме, на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой

Результаты:

- проведены эксперименты по нанесению карбидного покрытия на образцы вольфрама; получен патент на изобретение «Способ получения карбидов вольфрама в плазменно-пучковом разряде»
- создана и отработана методика исследования водородопроницаемости вольфрама с использованием плазменно-пучковой установки (ППУ)
- Показано, что монокарбидное покрытие оказывает существенное влияние на проницаемость дейтерия сквозь вольфрам.



Зависимость парциальных давлений остаточных газов от длительности воздействия ионов дейтерия на поверхность вольфрама с карбидным покрытием WC



РАБОТЫ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Испытания литиевой КПС модернизированного модуля МЛД

- отработана методика испытаний литиевой КПС в условиях облучения на плазменно-пучковой установке (ППУ).
- проведены эксперименты по облучению литиевой КПС дейтериевой плазмой ($3 \cdot 10^{17} \text{ D}^+/\text{м}^3$) на ППУ, выполнен анализ экспериментальных данных.

Проведенный анализ полностью подтверждает перспективность применения литиевой КПС в качестве ОПМ в установках УТС.



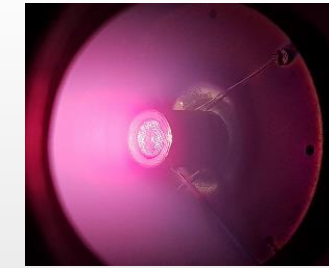
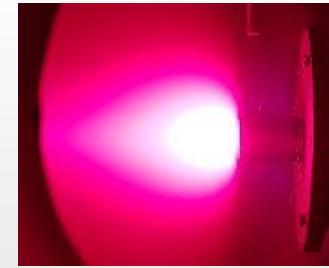
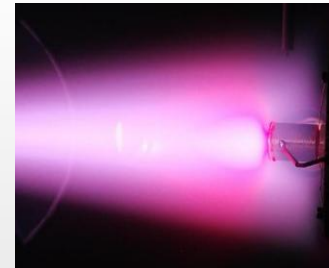
Загрузка мишени



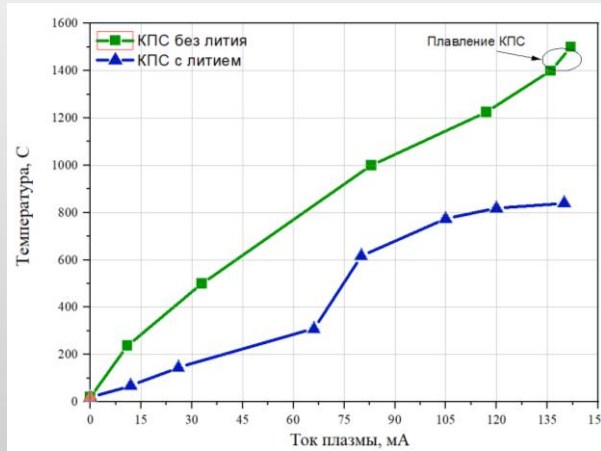
Образец литиевой КПС



Мишень с литиевой КПС на узле ППУ



Визуальное отображение эксперимента по облучению литиевой КПС дейтериевой плазмой на ППУ



Зависимость температуры мишени от тока дейтериевой плазмы



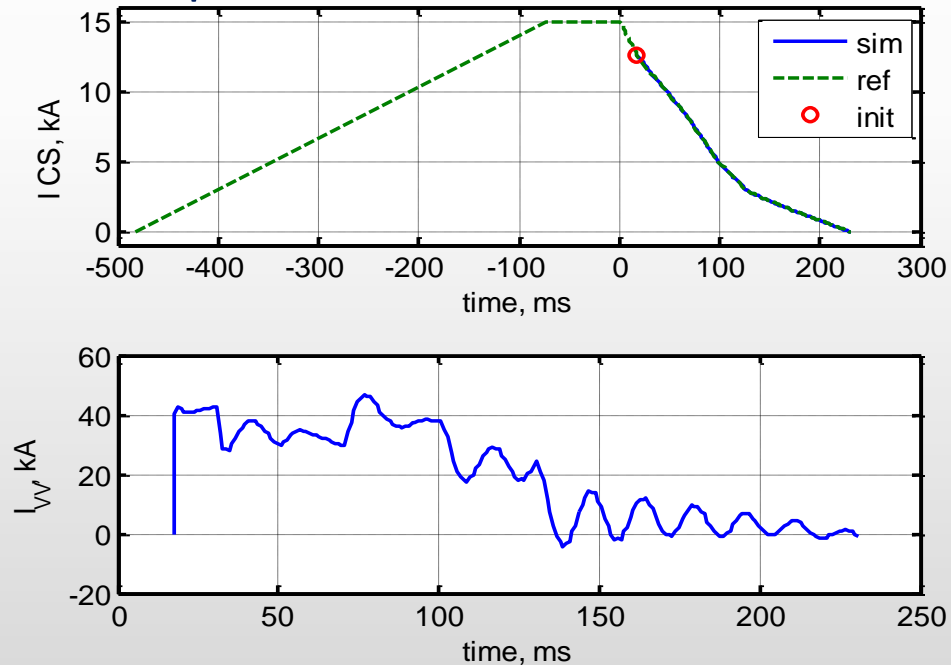
РАБОТЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

- Финансирование работ российских организаций проводится за счет Министерства науки и высшего образования, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 гг.»
- Основные организации - участники программы работ в 2019-2020 гг.: НИЦ Курчатовский институт, НИЯУ МИФИ, АО Красная Звезда, ФТИ им Иоффе, Томский политехнический университет, НИИЭФА им.Ефремова.

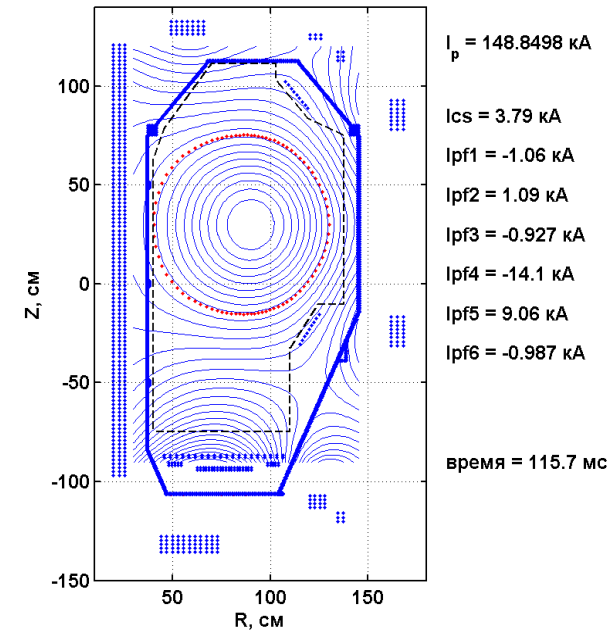


РАБОТЫ НИЦ КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ

- Продолжается работа по отработке сценария развития плазменного разряда токамака КТМ. Ведутся работы по моделированию сценариев кодом ДИНА с продолжением сценариев начальной стадии, рассчитанных по коду TRANSMAK при напряжениях по тороидальному обходу ~ 6 и 7 В на момент пробоя. Улучшенный сценария разряда: тороидальное поле – 0.86 Тл, ток плазмы- 150 кА, максимальная плотность $-1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, максимальный малый радиус круглой плазмы – 45 см, положение магнитной оси по вертикали – 30 см.



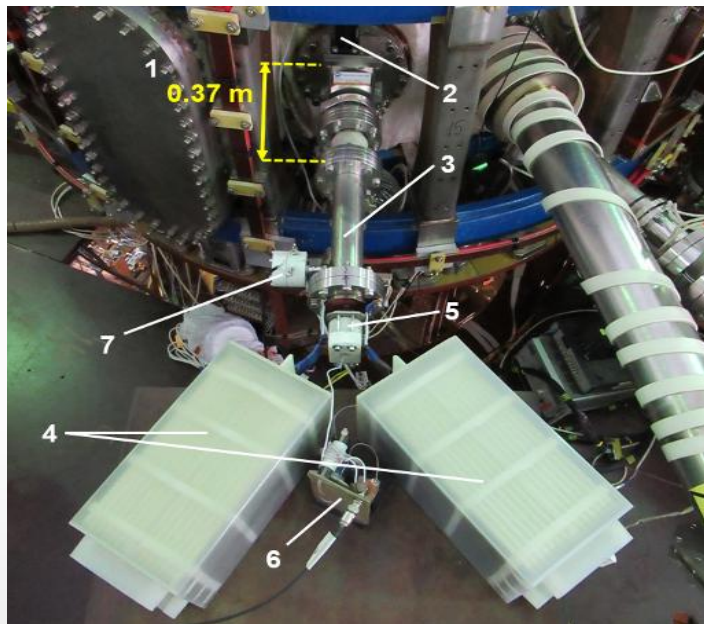
Ток в обмотке индуктора и суммарный ток в вакуумной камере в процессе развития разряда



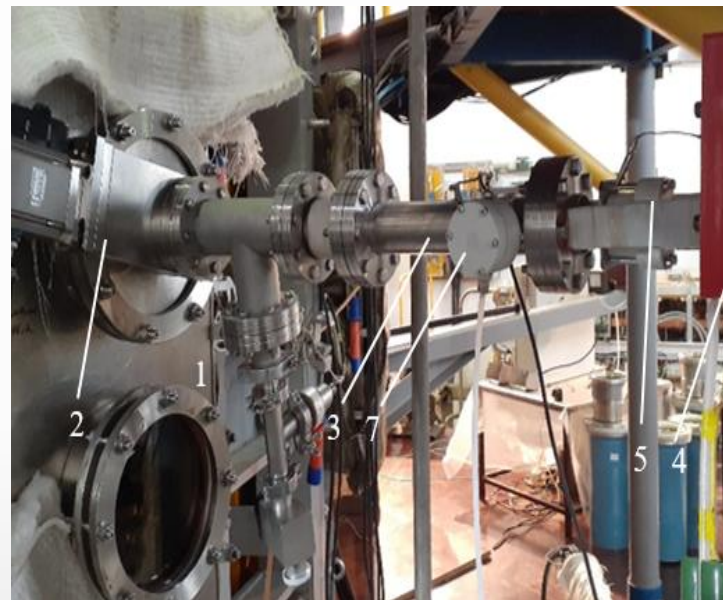
Равновесие в начале стадии плато тока.
Ток плазмы $I_p \sim 150$ кА



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБОЯ И ИОНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ГАЗА НА ТОКАМАКАХ ГЛОБУС-М2 И КТМ



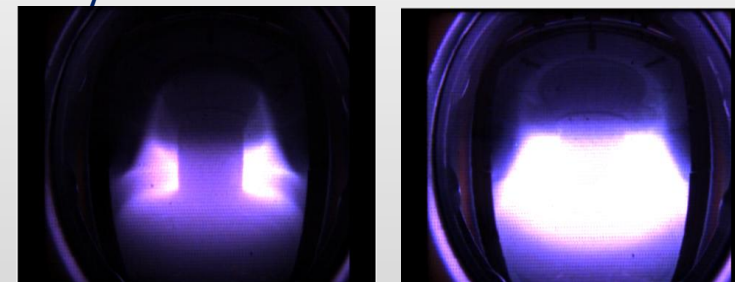
Вид сверху элементов плазменного ускорителя, установленного на токамаке Глобус-М2: 1- токамак, 2- вакуумный шибер, 3- коаксиальный ускоритель, 4- конденсаторный накопитель, 5- коммутатор тока, 6- система запуска коммутатора тока, 7- электродинамический клапан, 8- источник питания клапана, 9- зарядное устройство, 10- система напуска рабочего газа.



Ускоритель плазменной струи на токамаке КТМ:

1 – фланец экваториального патрубка;
2 – затвор; 3 - коаксиальный ускоритель;
4 - конденсаторный накопитель;
5 - коммутатор тока; 6 - система запуска коммутатора тока;
7 - электродинамический клапан.

Результаты экспериментов на токамаке КТМ показали, что пробой рабочего газа происходит на 6 мс раньше по сравнению с чисто индукционным разрядом. Пробой при использовании инжекции плазменной струи происходит при напряжении на обходе 4 В, в то время как чисто индукционный пробой - при напряжении на обходе 6 В. Таким образом, происходит снижение напряжения на обходе на 33%. В целом, при использовании ускорителя плазменной струи происходит облегчение пробоя и повышение его стабильности, пробой достигается во всех случаях.

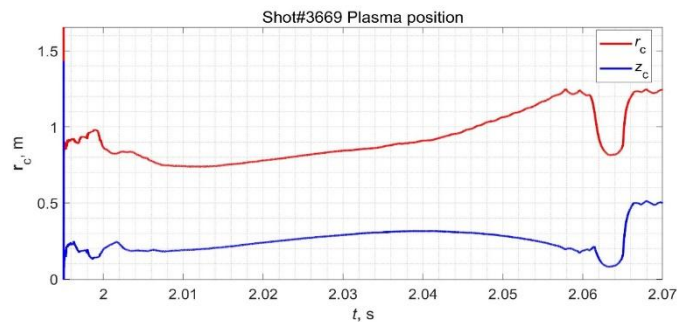
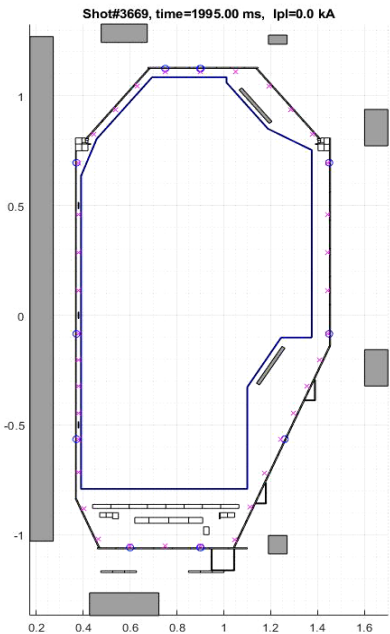


видеокадр инжекции плазмы в ВК КТМ
плазменной пушкой



РАБОТЫ ТПУ

Тема: совершенствование программных комплексов моделирования плазмы и восстановления ее параметров



Создание имитационной модели системы импульсного электропитания (СИЭП) и электромагнитной системы (ЭМС) токамака КТМ

Задачи:

- Разработка низкоуровневых алгоритмов управления силовыми преобразователями, реверса тока и др;
- Оценка внешних характеристик источников питания;
- Синтез регуляторов управления токами в обмотках ЭМС токамака;
- Синтез регуляторов управления током, положением и формой плазмы (с использованием линеаризованной модели плазмы);
- Разработка алгоритмов противоаварийной защиты;
- Проектирование СИЭП новых токамаков.

Реконструкция границы, положения и тока плазмы



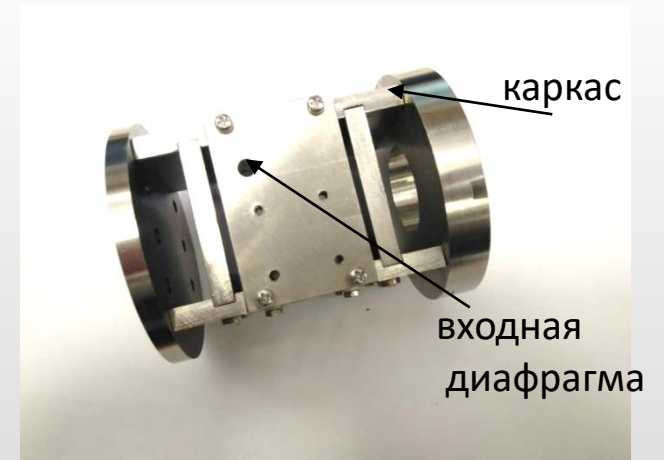
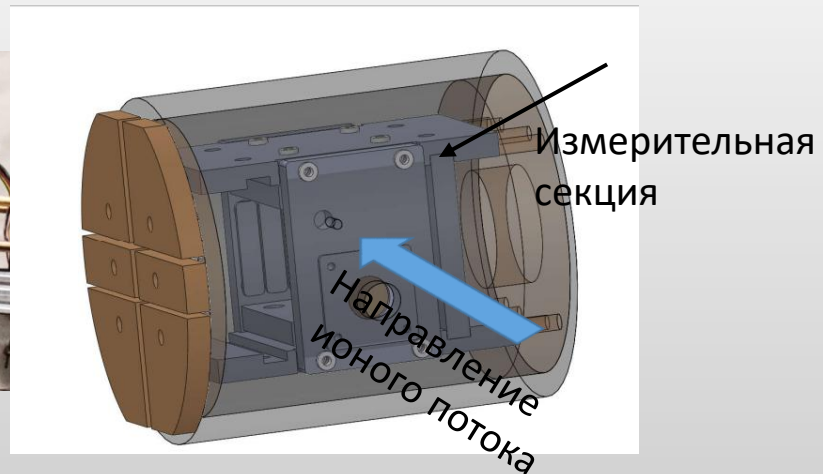
РАБОТЫ НИЯУ МИФИ

Выполнены работы по созданию материаловедческого зонда для исследования взаимодействия плазма-стенка; изготовлен образец материаловедческого зонда, испытательный стенд, блоки питания, сбора и обработки информации. Осуществлено тестирование зонда на испытательном стенде в НИЯУ МИФИ.

Вакуумный объём с прозрачной стенкой



3D Модель материаловедческого зонда

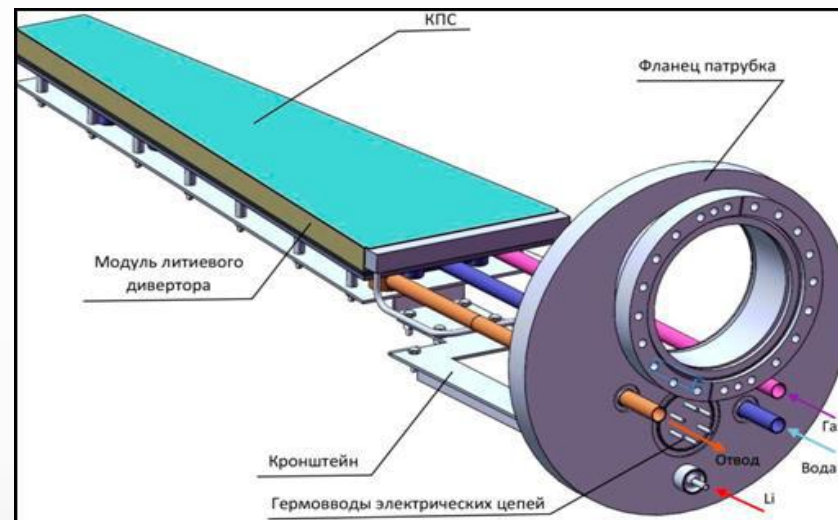


Измерительная секция зонда.



РАБОТЫ АО «КРАСНАЯ ЗВЕЗДА»

1. Разработан эскизный проект макета литиевого дивертора для токамака КТМ на основе капиллярно-пористых систем (КПС) с системой термостабилизации парогазовой смесью низкого давления.
2. Изготовлен макета литиевого дивертора (МЛД) токамака КТМ на основе КПС с системой термостабилизации парогазовой смесью низкого давления.
3. Проводится экспериментальная отработка режимов работы макета литиевого дивертора на основе КПС в стендовых условиях при тепловых нагрузках до 5 МВт/м^2





РАБОТЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

- Финансирование Республики Беларусь осуществляется за счет программ Национальной академии наук.
- Участники работ- ГНУ ОИЭЯИ - СОСНЫ НАН Беларусь, НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского Госуниверситета.

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ

- В соответствии с Указом Президента Республики Казахстан К. Токаева с 16 марта 2020 года на всей территории Республики Казахстан было объявлено чрезвычайное положение и инициированы соответствующие карантинные мероприятия, направленные на ограничение распространения новой коронавирусной инфекции COVID-19. Так как большой процент персонала НЯЦ РК, как и специалисты российских организаций, работали длительное время в режиме удаленного доступа, то это сделало невозможным реализацию подготовительных наладочных и экспериментальных работ на стендовом комплексе казахстанского материаловедческого токамака КТМ в запланированные календарными планами сроки и сдвинуло график выполнения работ.
- Карантинные меры были также введены и продолжаются до настоящего времени в Российской Федерации, что сделало невозможным командировки российских специалистов для участия в экспериментах. В связи с этим, исследование процесса формирования плазменного шнура токамака КТМ на повышенных параметрах в режиме омического нагрева с током плазмы до 500-700 кА и тороидальным полем до 1.0 Тл. провести не удалось. Не проведена также отладка на токамаке КТМ материаловедческого зонда, изготовленного в МИФИ. Эти работы будут входить в план совместных работ 2021-2022 гг.
- Все остальные работы выполнены в соответствии с календарным планом.



ПРОГРАММА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА КАЗАХСТАНСКОМ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ НА 2021–2023 Г.Г.

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

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

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

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

Этап 5. Совершенствование технологических и физических методов диагностики плазмы (Исполнители: РФ)

Этап 6. Совершенствование системы контроля и управления плазменным разрядом (Исполнители: РФ)



ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

- Проводятся по мере необходимости, но не реже, чем один раз в месяц, оперативные совещания членов рабочей группы и ответственных исполнителей научной программы работ на КТМ по скайпу и телефону для корректировки совместных исследований.
- Разработан проект научной программы совместных работ на токамаке КТМ на 2021-2023 гг. с перспективой до 2030 года. Проект программы разослан Секретариатом Комиссии на согласование в страны-участницы Программы.
- Программу совместных работ на 2021-2023 гг. необходимо утвердить на 21-ом заседании Комиссии АТОМ-СНГ и на Экономическом Совете СНГ.
- Для реализации межправительственного Соглашения о совместном использовании токамака КТМ, администраторам Программы каждой страны-участницы необходимо определить источник финансирования Программы.