



**РОСАТОМ**



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ТРОИЦКИЙ ИНСТИТУТ ИННОВАЦИОННЫХ И ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

## **Создание и испытание перспективных конструкций и технологий первой стенки и дивертора термоядерного реактора, включая жидкометаллические**

**Лазарев В.Б.  
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»**

# Проблемы первой стенки токамака-реактора



POCATOM

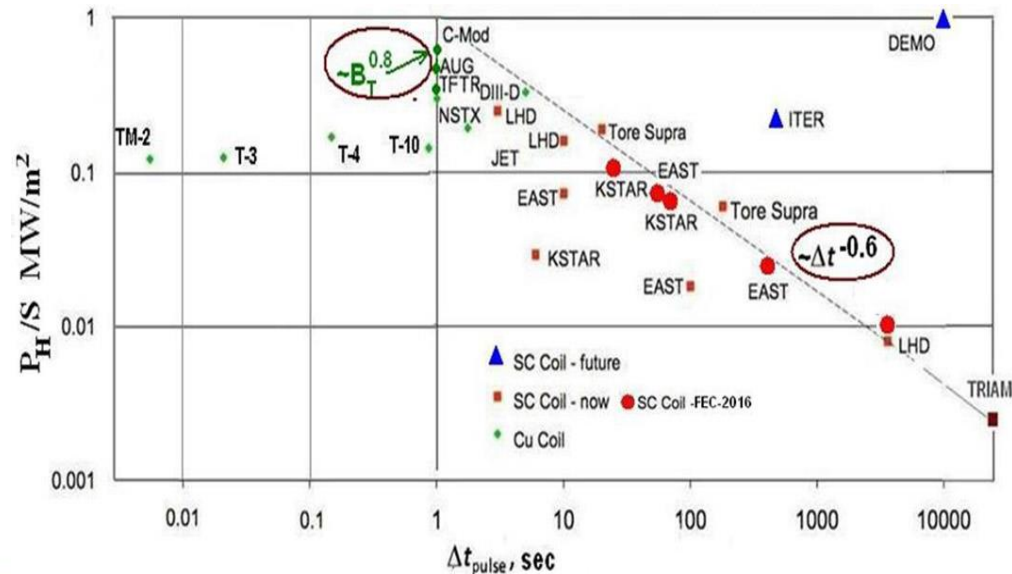
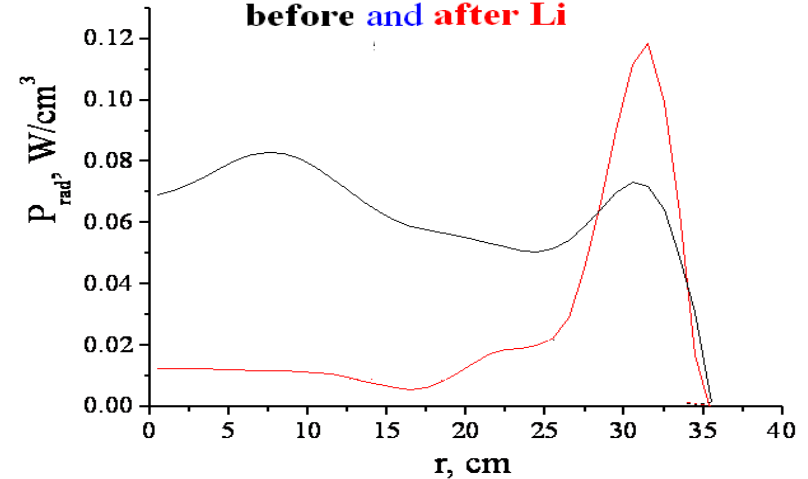
1. Эрозия и разрушение поверхностей внутрикамерных элементов, инжекция примесей в плазму токамака, охлаждение центральной области плазменного шнура.

Образование и накоплении в камере токамака мелкодисперсных частиц (пыли) из твердых материалов первой стенки – потенциальная емкость для накопления трития.

2. Ограничение длительности разряда токамака в результате накопления имплантированного в стенке камеры дейтерия до уровня выше критического

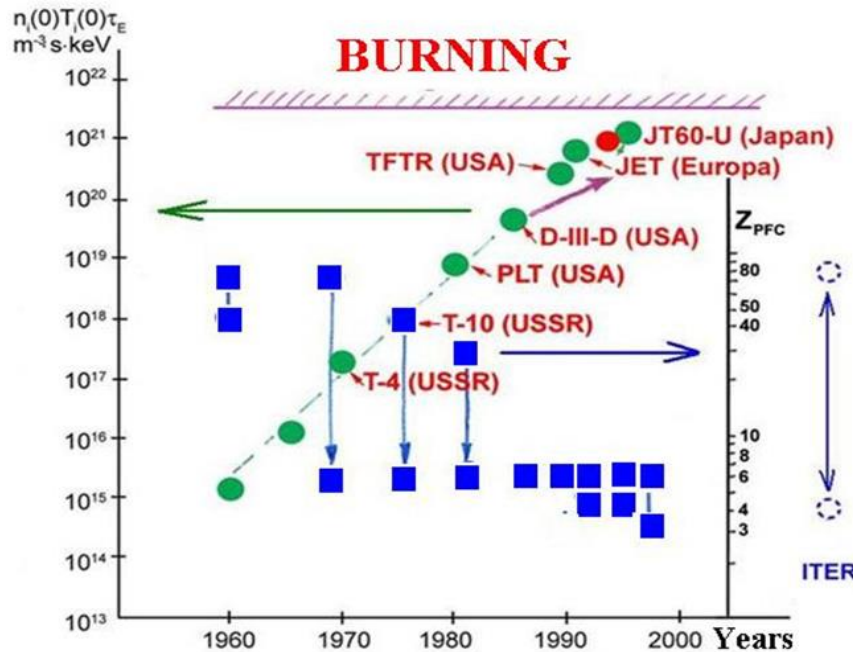
*Nucl. Fusion 59 (2019) 015001 (15pp)*  
*Tokamak evolution and view to future*  
*S.V. Mirnov*

Radial distribution of total radiation before and after Li



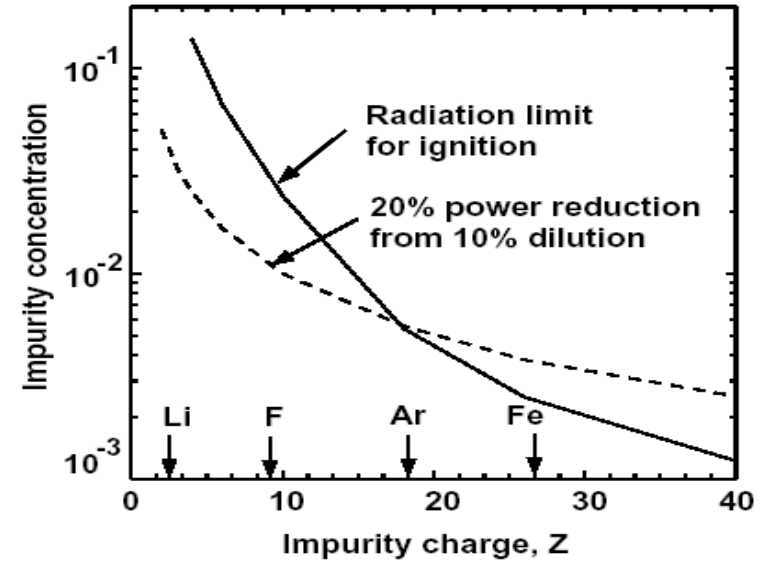
# Предельные концентрации примесей в реакторной плазме и проблема зажигания

В настоящее время установлено, что твердые материалы (графит, вольфрам) при взаимодействии с плазмой токамака в условиях близких к реакторным быстро разрушаются, что не только ограничивает время эксплуатации внутрикамерных элементов токамака-реактора, но и создает поток примеси в плазму, которая охлаждает «горячую» зону.



*Nucl. Fusion* 59 (2019) 015001 (15pp) Tokamak evolution and view to future S.V. Mirnov

Radiation limits from Summers & Hellermann, '93

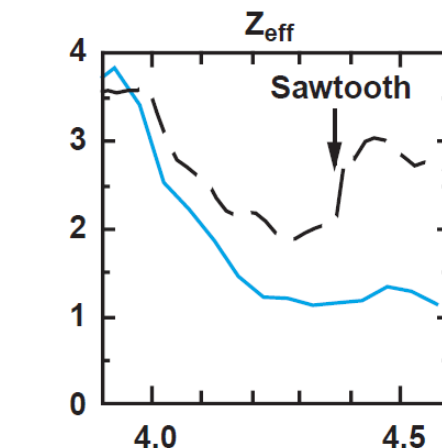
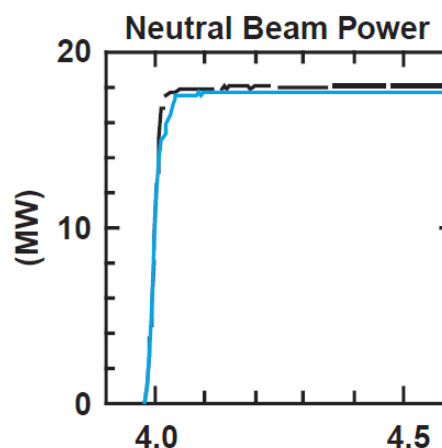
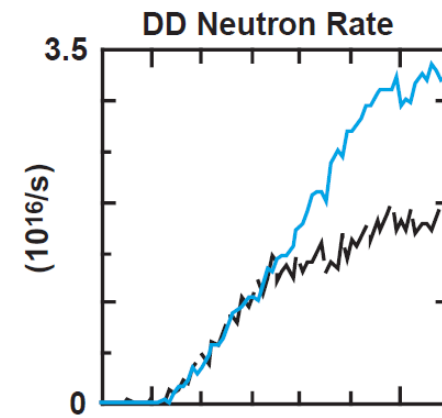
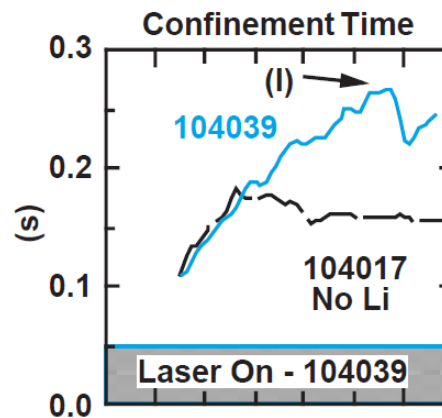
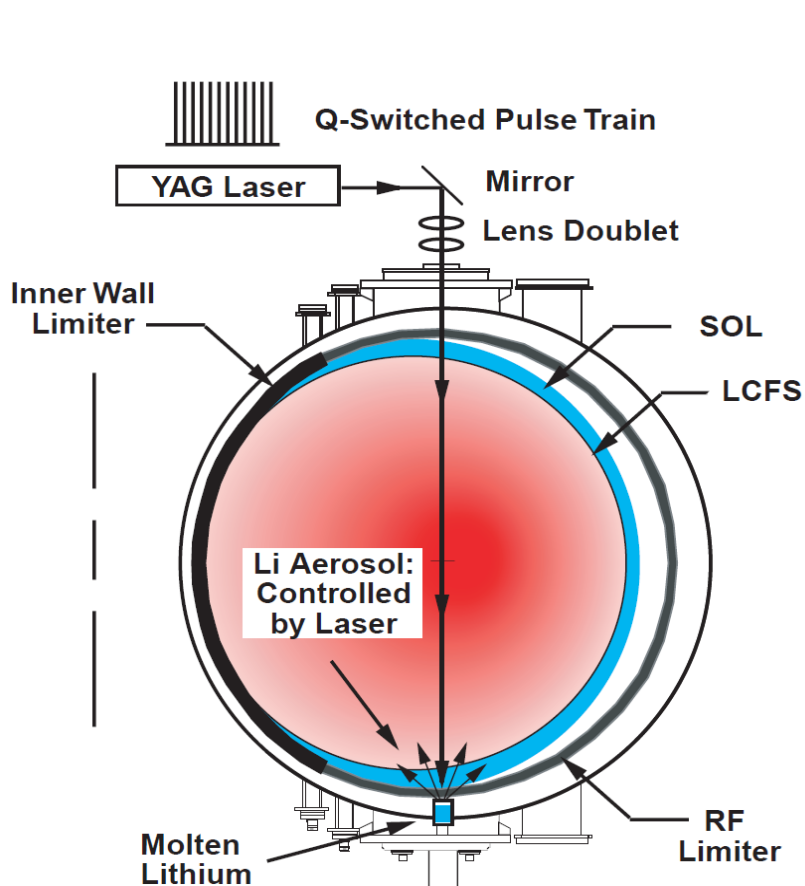


Использование защитного покрытия из жидкого металла с низким зарядом ядра  $Z$  (для Лития  $Z=3$ ) позволяет создать возобновляемое покрытие, которое, с одной стороны, практически не загрязняет центральную, реакторную область плазмы, а с другой – охлаждает за счет излучения периферийную плазму и снижает тепловую нагрузку на лимитер или дивертор.

# Пример: Эксперименты с инъекцией лития на токамаке TFTR



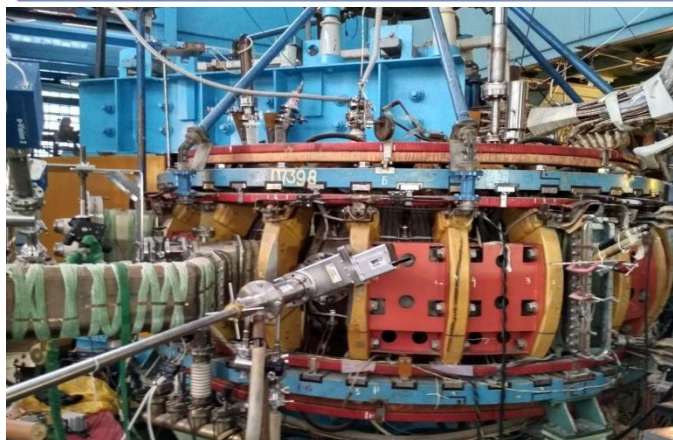
POCATOM



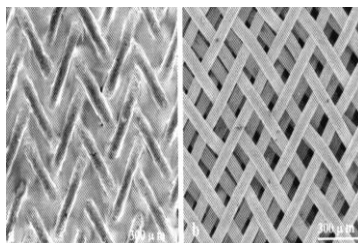
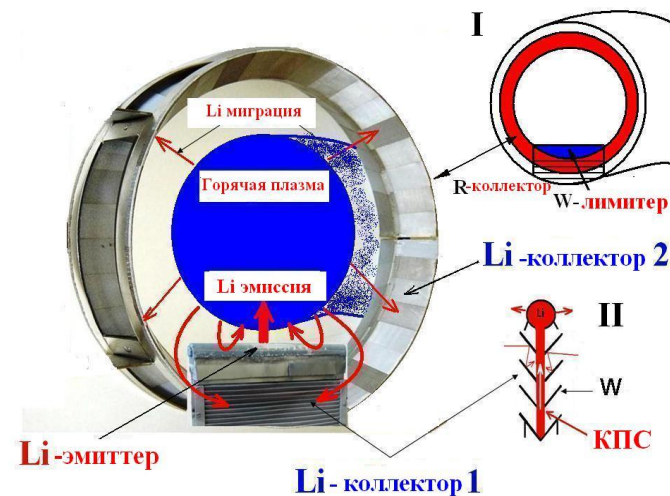
Time (s)

Производительность инжектора  
20 mg/s ( $2 \times 10^{21}$  atoms/s)

# Первые эксперименты на Т-11М с литиевым лимитером на основе капиллярно-пористой системы



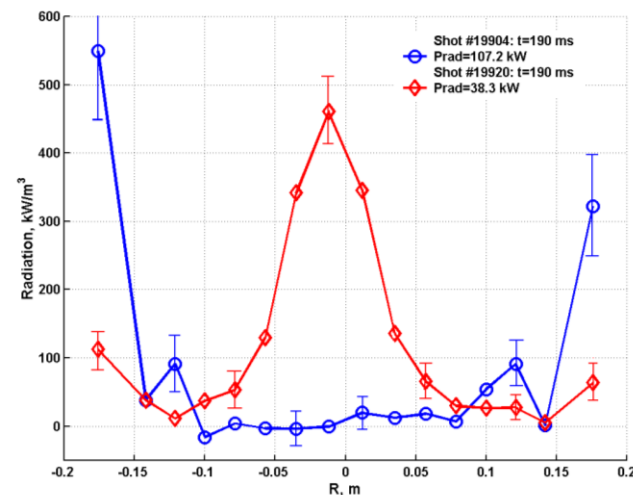
Камера Т-11М с литиевым лимитером



Структура КПС литиевого лимитера [1] на основе сеток



Литиевый лимитер



Профиль радиационных потерь разряда с литиевым и с графитовым лимитером

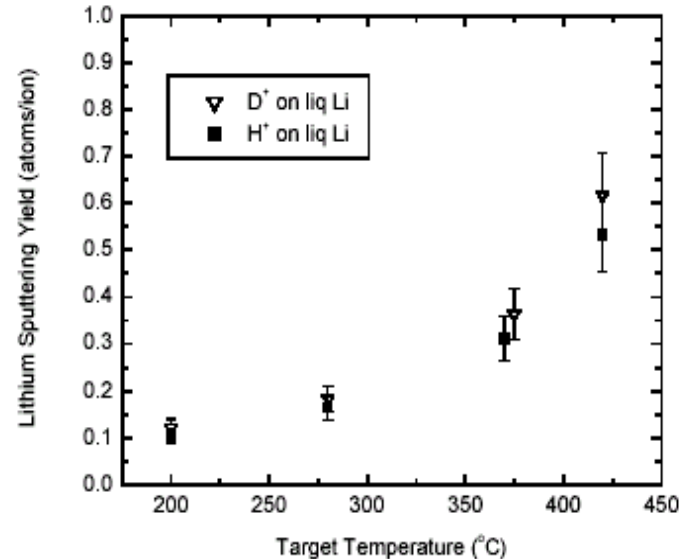
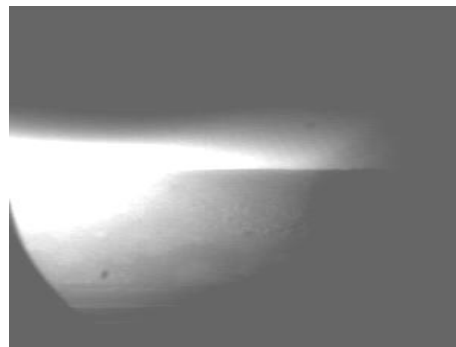
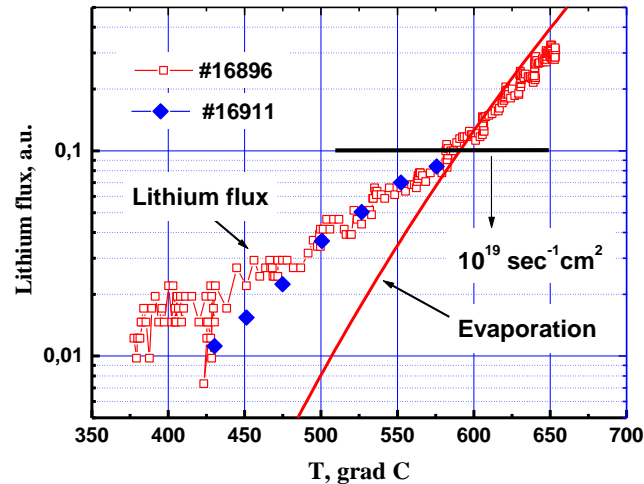
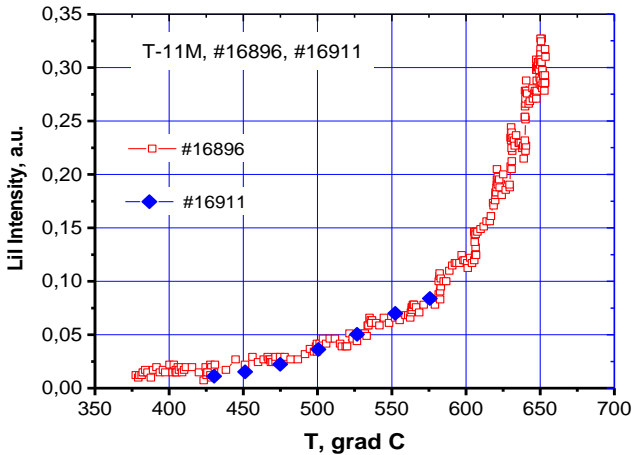
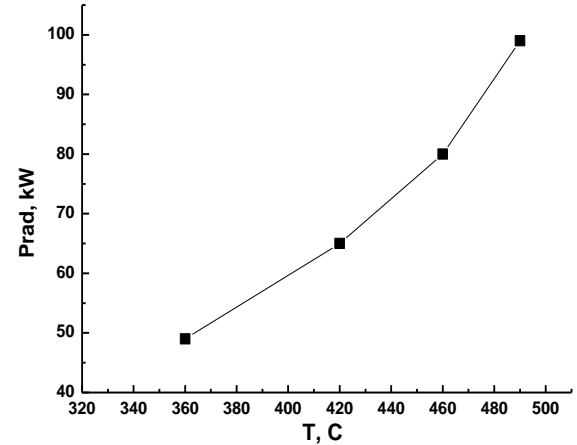
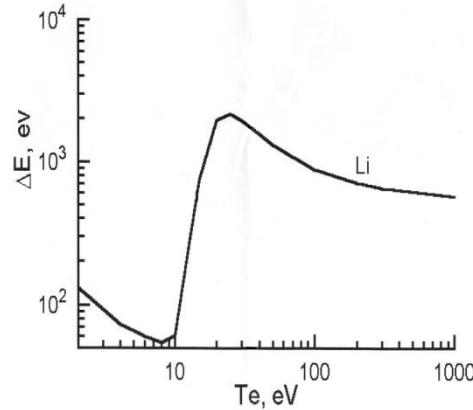
# Температурные зависимости потоков лития, полученные на T-11M с литиевым лимитером на основе капиллярно-пористой системы



POCATOM

$$\Gamma_{Li} \approx 7 \cdot 10^{20} s^{-1}$$

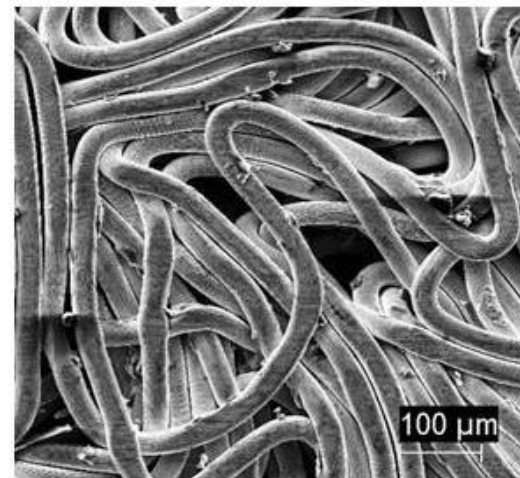
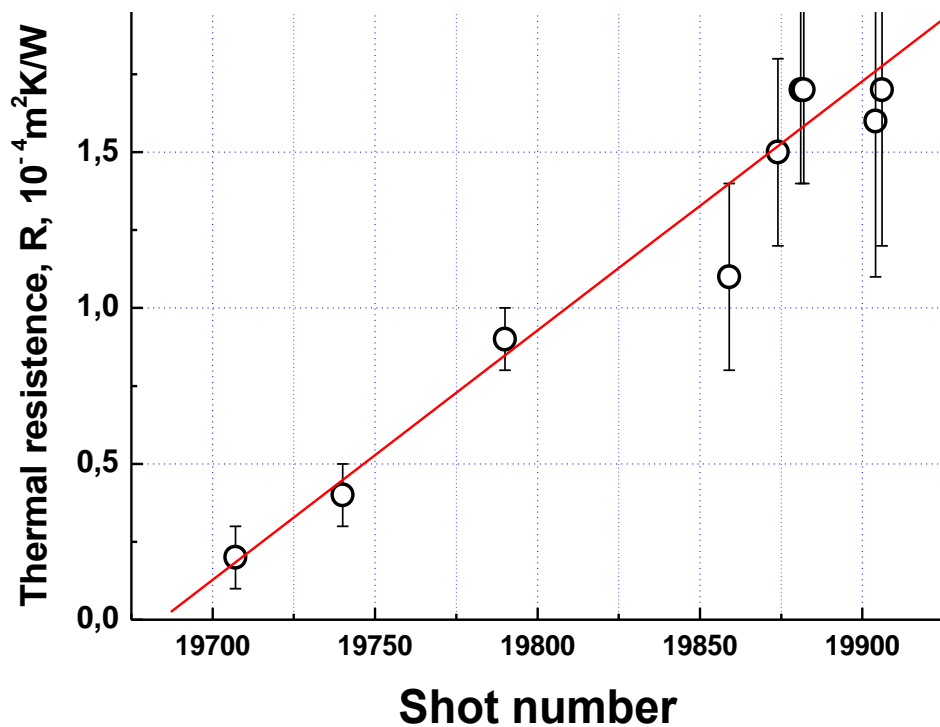
“Price” of Li atom



# Время жизни КПС лимитера из Мо сеток и W «войлока»



POCATOM



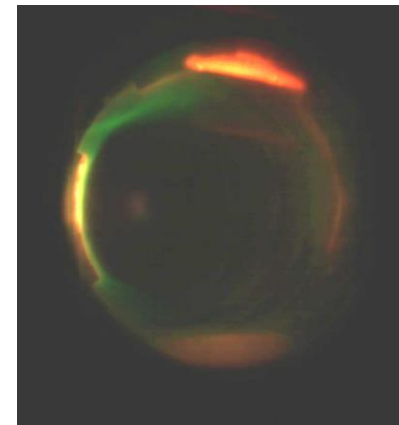
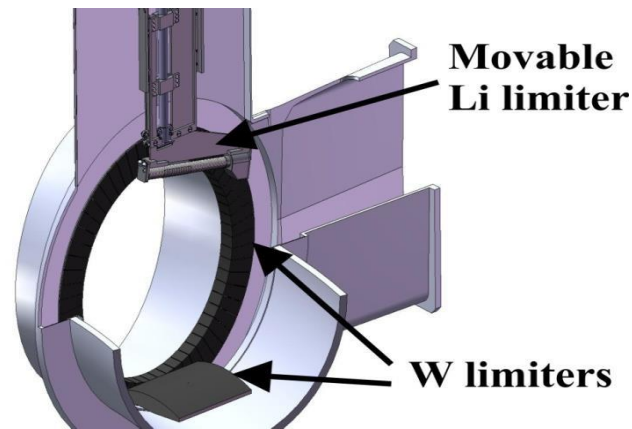
Вольфрамовый «войлок»



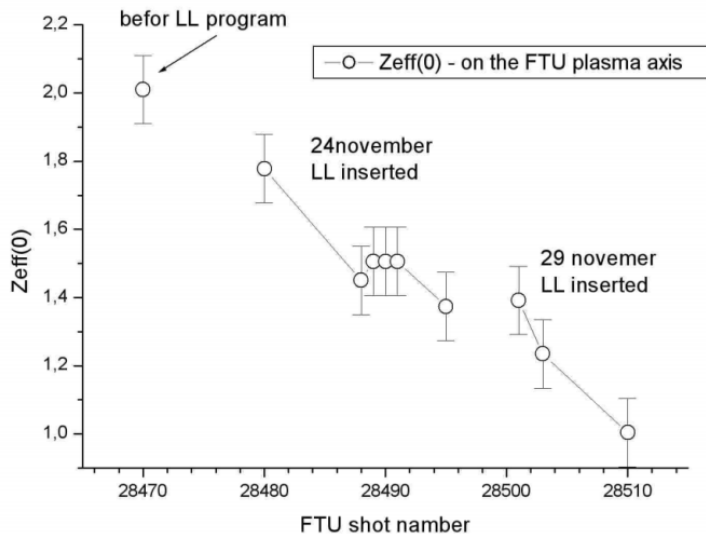
## Лимитер на FTU



## Токамак T-10



## Снижение $Z_{\text{eff}}$ после литиизации на FTU :



## Эффекты литиизации на T-10:

- Интенсивность свечения линий примесей (C, O) снижается в 10-20 раз;
- $Z_{\text{eff}}$  снижается от ~3 до 1.15;
- радиационные потери из центра (W) снижаются 20-30 раз;
- интенсивность of WI линии уменьшается 3-5 раз



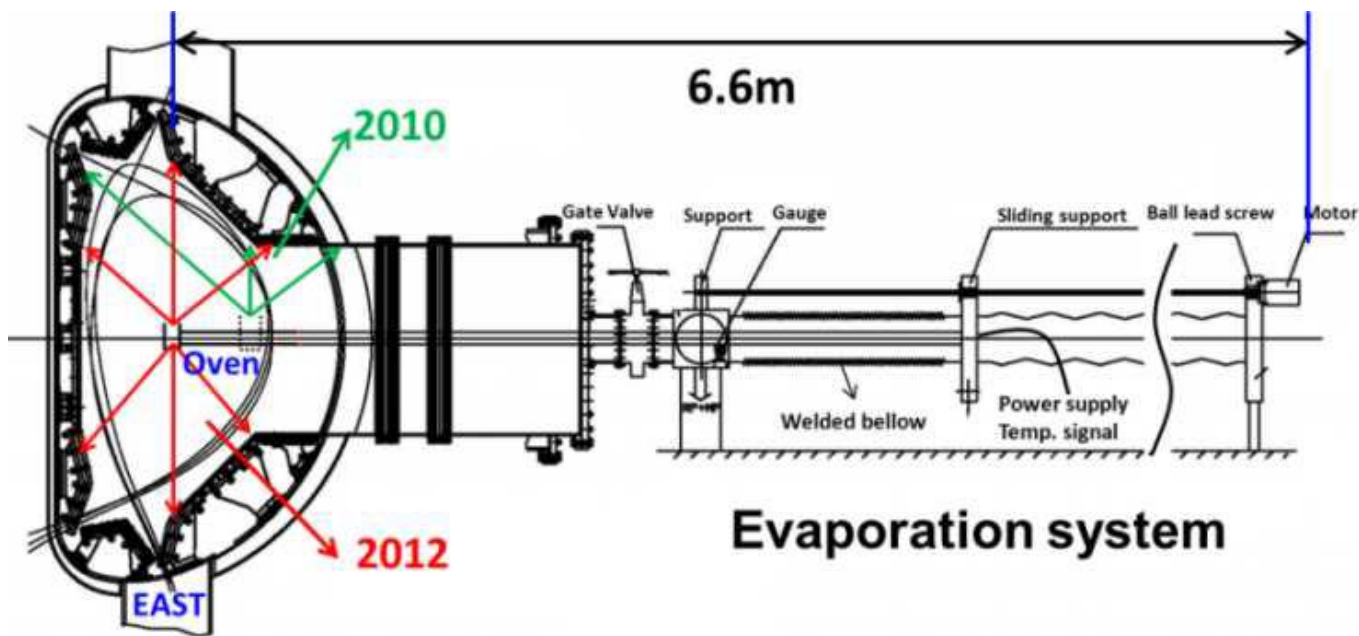
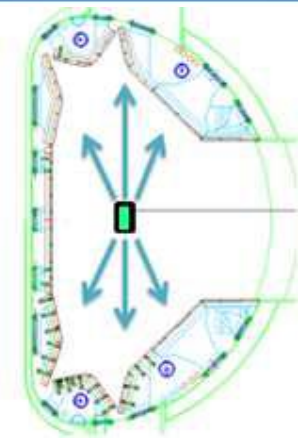
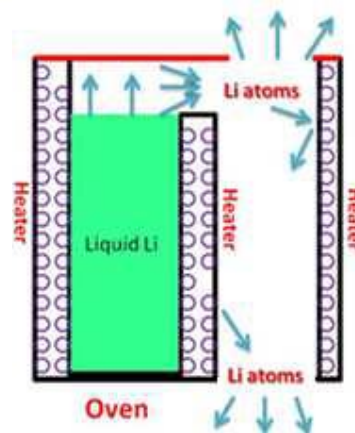


# Пример: литизация первой стенки на токамаке EAST с помощью двусторонних испарителей лития

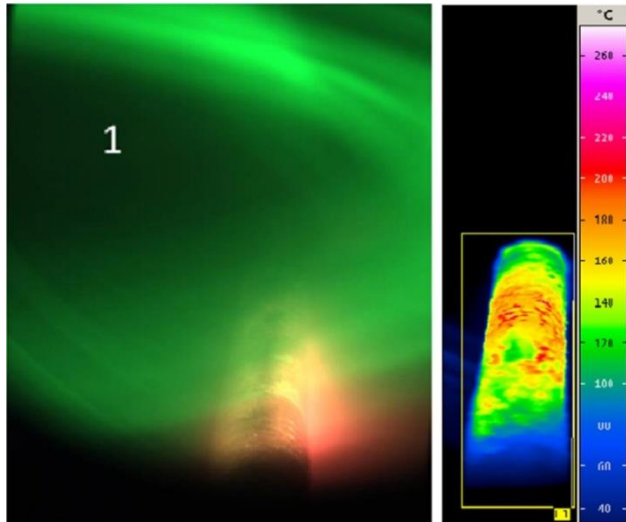
**Важный вывод:** не только уменьшает примеси, но и снижает содержание H.

Li уменьшает отношение  $H/(H+D)$  что повышает эффективность ICRF нагрева на малой добавке.

10-50g Li - расход лития на одно покрытие

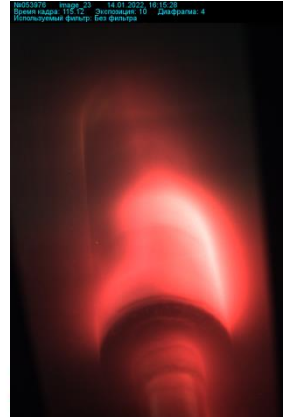
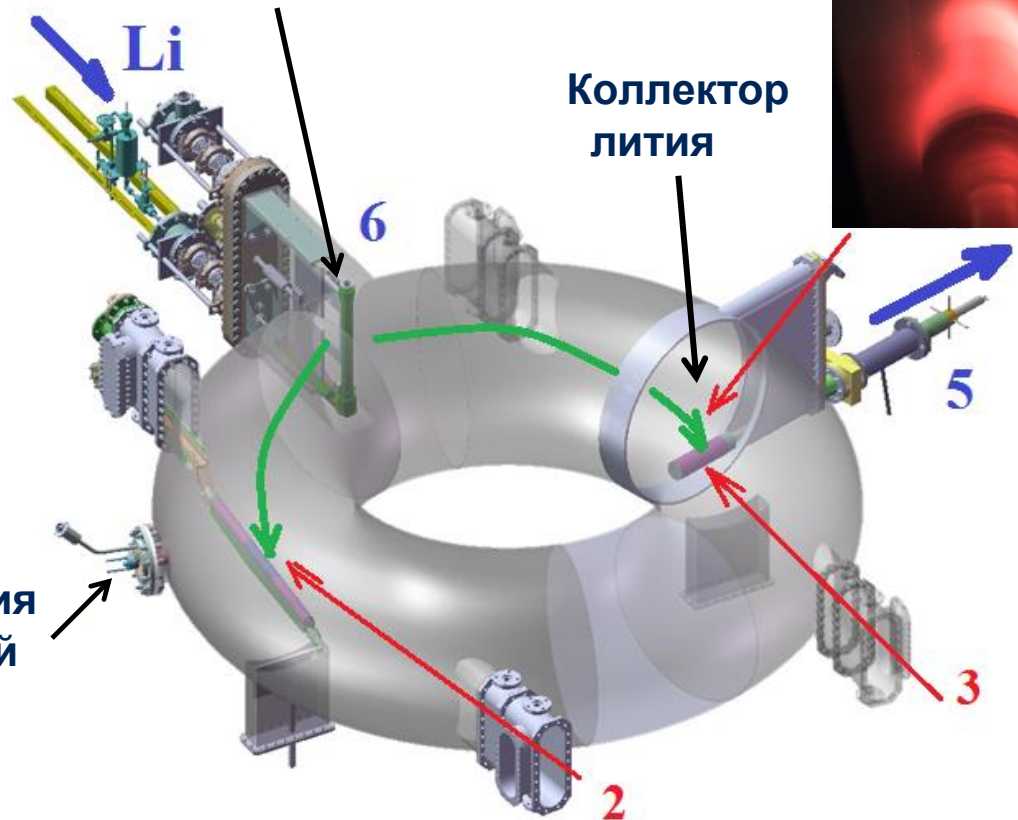


# Исследования на токамаке Т-11М по испытанию новых внутрикамерных устройств на основе лития

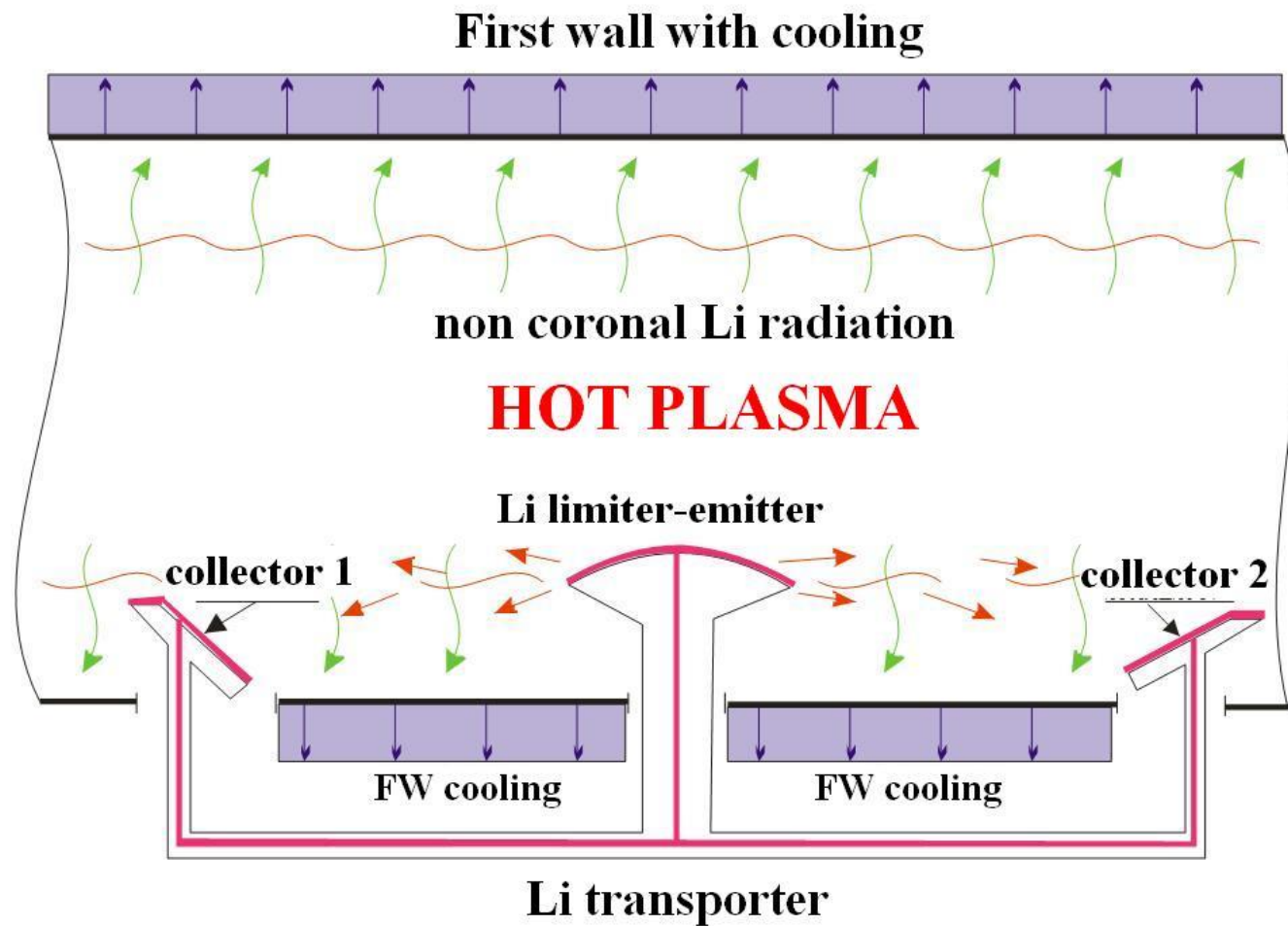


Вертикальный  
литиевый лимитер с  
внешней дозаправкой

Инжектор лития  
ультразвуковой



# Схема замкнутого контура циркуляции лития в камере токамака



# Статус проекта РТТН



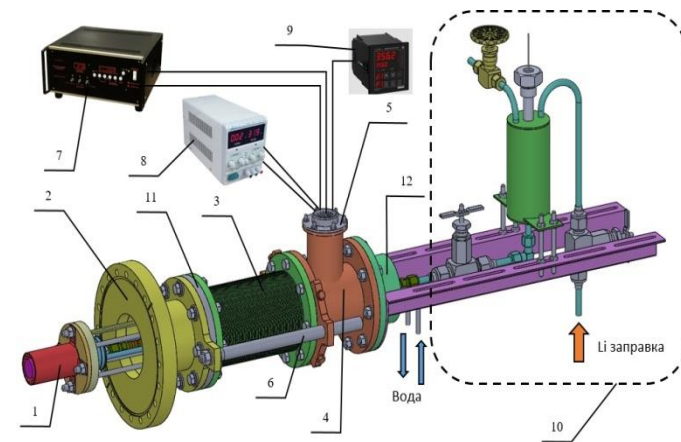
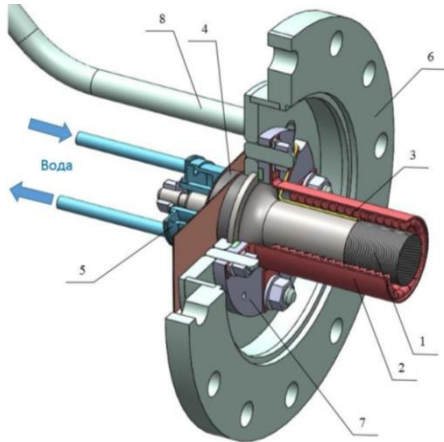
**«Создание и испытание перспективных конструкций и технологий первой стенки и дивертора термоядерного реактора, включая жидкометаллические. Этапы 2020-2023 годов».**

Задача	2020	2021	2022	2023
1. Разработка литиевого инжектора для Т-15МД	Разработка концепции инжектора лития для Т-15МД	Испытание прототипа инжектора лития на токамаке Т-11М	Изучение влияния на плазму инжектора лития	Изготовление инжектора лития для Т-15МД
2. Разработка диверторной пластины для Т-15МД	Изготовление испытательного стенда и макета пластины	Испытание системы охлаждения дивертора на макете мишени	-----	Изготовление литиевого пластины дивертора Т-15МД
3. Разработка РКД и изготовление литиевого лимитера для Т-15МД.	-----	Установлен на Т-11М прототип лимитера Т-15МД с внешней подачей лития	Изготовление литиевого лимитера Т-15МД	Ресурсное испытание на Т-11М лимитера с внешней подачей лития
4. Разработка и испытание устройств удаления лития из камеры токамака.	Испытание на Т-11М эмиттерно-коллекторной системы в режиме сбора лития	Разработка устройства удаления лития со стенок камеры токамака	Изучение эффективности сбора лития коллектором	Изготовление стендового устройства для удаления лития со стенок камеры Т-11М

# Решение задач НИОКР (этап 2020-2023 гг.)

## Разработка ультразвукового инжектора лития

2020	2021	2022	2023
Создание прототипа инжектора лития	Испытание прототипа инжектора лития	Исследование влияние инъекции на плазму токамака	Изготовление инжектора для Т-15МД

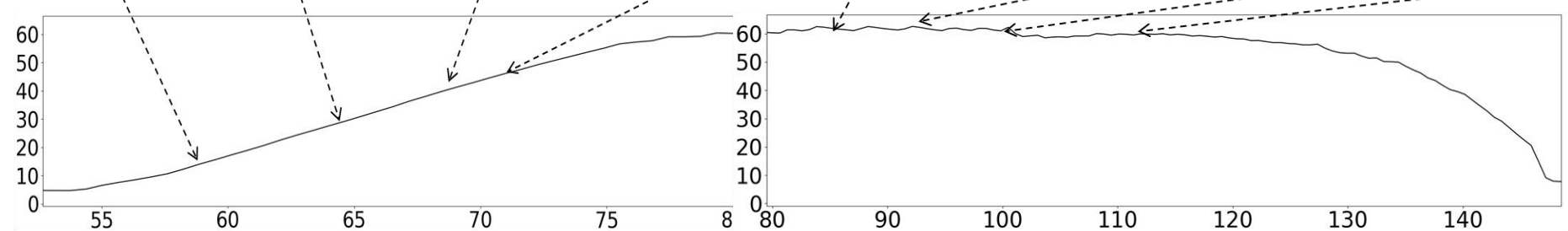
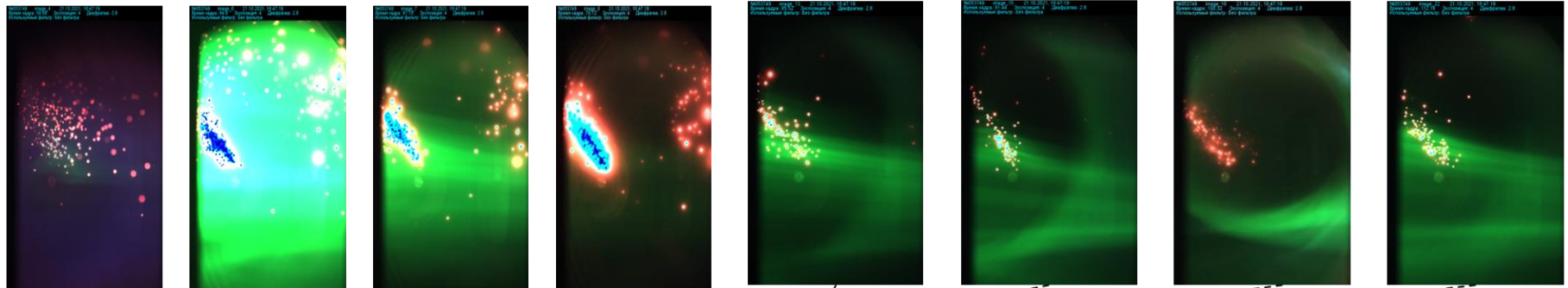


Расход лития инжектором определенный на токамаке - 13мг/сек.  
 Производительность инжектора при квазистационарном режиме - 22 мг/сек.

# Работа ультразвукового инжектора лития на токамаке T-11M

## Видеокадры инъекции мелкодисперсного лития в разряд T-11M

59мс кадр 4    65мс кадр 6    68мс кадр 7    71мс кадр 8    85.5мс кадр 13    91мс кадр 15    100мс кадр 18    112мс кадр 22



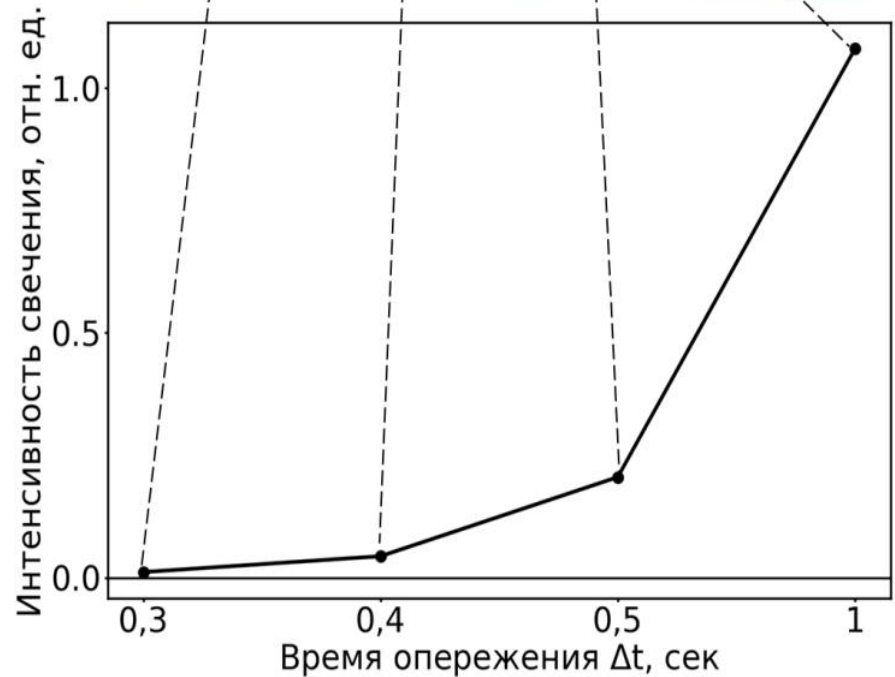
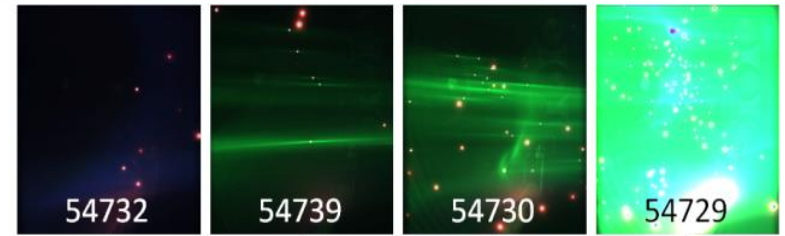
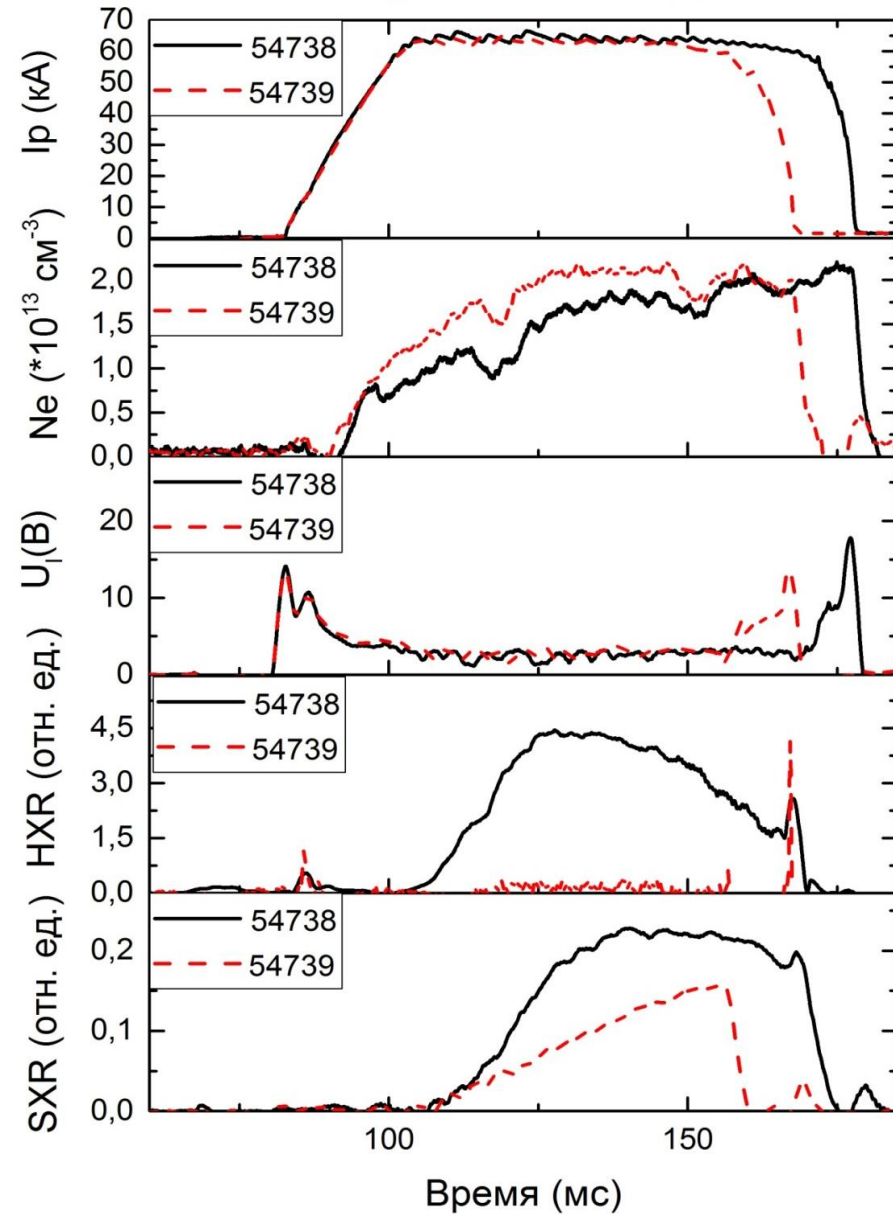
Время, мс

Время, мс

# Основные результаты экспериментов с инжектором



РОСАТОМ



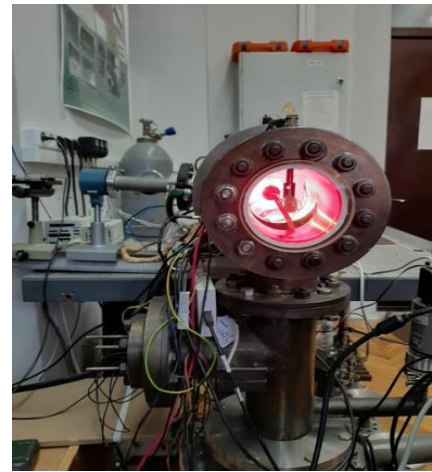
Зависимость потока (свечения) инжектированного лития из камеры токамака от времени опережения запуска инжектора лития

# Разработка диверторной пластины для Т-15МД



РОСАТОМ

2020	2021	2022	2023
Разработка, изготовление и испытания на стенде литиевого элемента дивертора для токамака Т-15МД	Тестирование модулей и вододисперсной системы охлаждения литиевой диверторной мишени при тепловой нагрузке до $10\text{МВт/м}^2$		Изготовление литиевой пластины дивертора токамака Т-15МД

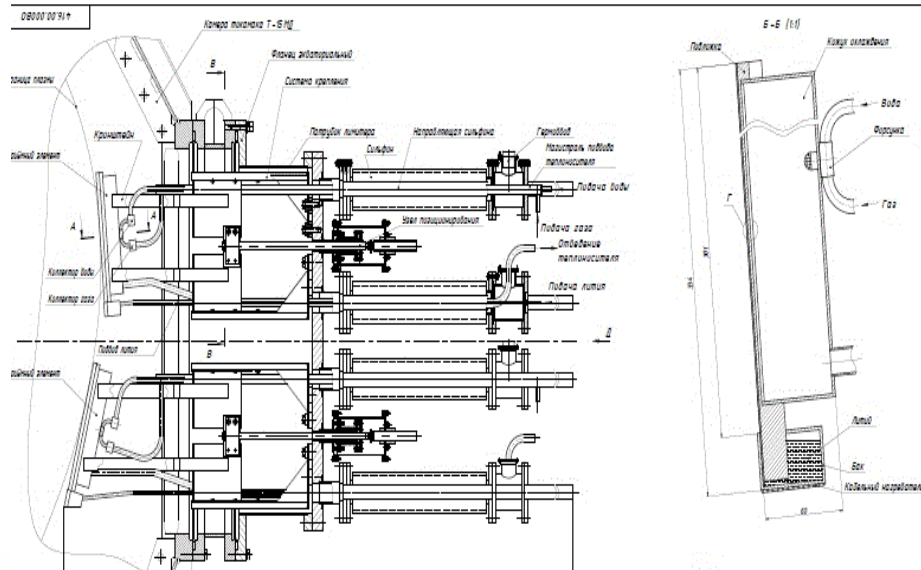




# Разработка **охлаждаемого** литиевого лимитера с **внешней дозаправкой** для Т-15МД



2020	2021	2022	2023
Разработан прототип для токамака Т-11М	Разработка эскизного проекта стационарного литиевого лимитера для токамака Т-15МД	Разработка технического проекта стационарного литиевого лимитера для токамака Т-15МД Изготовление литиевого лимитера Т-5МД	



# Задачи проекта 2024-2030 гг.

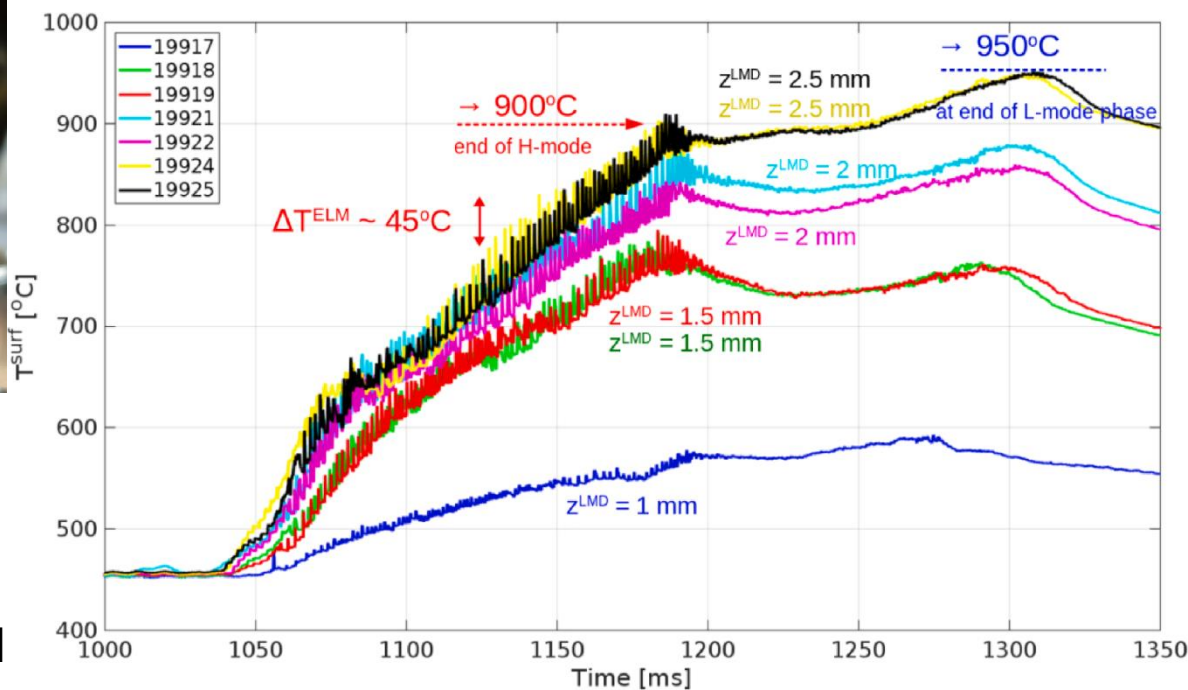


Задачи	2024	2025-2026	2027-2028	2029-2030
1. Разработка литиевого инжектора для Т-15МД с <b>внешней дозправкой</b>	Испытание инжектора лития на Т-11М и Т-15МД	Эксперименты с инжектором лития на Т-15МД	Разработка инжектора лития для ТРТ	Испытание инжектора лития для ТРТ
2. Испытание <b>охлаждаемого</b> литиевого лимитера с <b>внешней дозправкой</b> на Т-15МД	Разработка аппаратуры контроля и управления режимом лимитера для Т-15МД	Проведение экспериментов с охлаждаемым литиевым лимитера на Т-15МД	Разработка охлаждаемым литиевым лимитера для ТРТ -----	Испытание на Т-15 МД охлаждаемым литиевым лимитера для ТРТ
3. Испытание литиевой диверторной пластины с <b>термостабилизацией</b> для Т-15МД	Разработка аппаратуры контроля и управления режимом диверторной пластины Т-15МД	Проведение экспериментов с литиевой диверторной пластиной на Т-15МД		
4. Разработка удаления лития из камеры токамака	Стендовые испытания устройства удаления	Эксперименты по изучению миграции лития в Т-15МД	Разработка устройств удаления лития	
5. Испытание защиты внутрикамерных элементов с КПС содержащей LiSn	Изготовление лимитеров с КПС содержащей LiSn для Т-11М	Эксперименты с КПС содержащей LiSn на Т-11М	Разработка LiSn лимитера для испытания на Т-15МД	

# Эксперимент на токамаке COMPASS с элементом из КПС с Li и LiSn



A special module (25x45 mm) equipped with a CPS Mo mesh with wires diameter 100  $\mu\text{m}$  and a pore radius of 75  $\mu\text{m}$  and filled with two metals, Li and a LiSn alloy (with 73% of Sn)

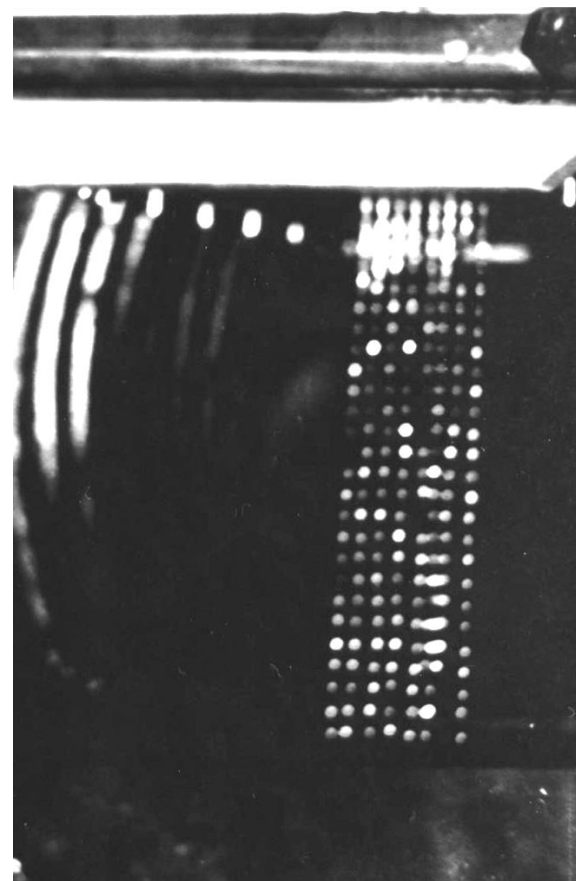
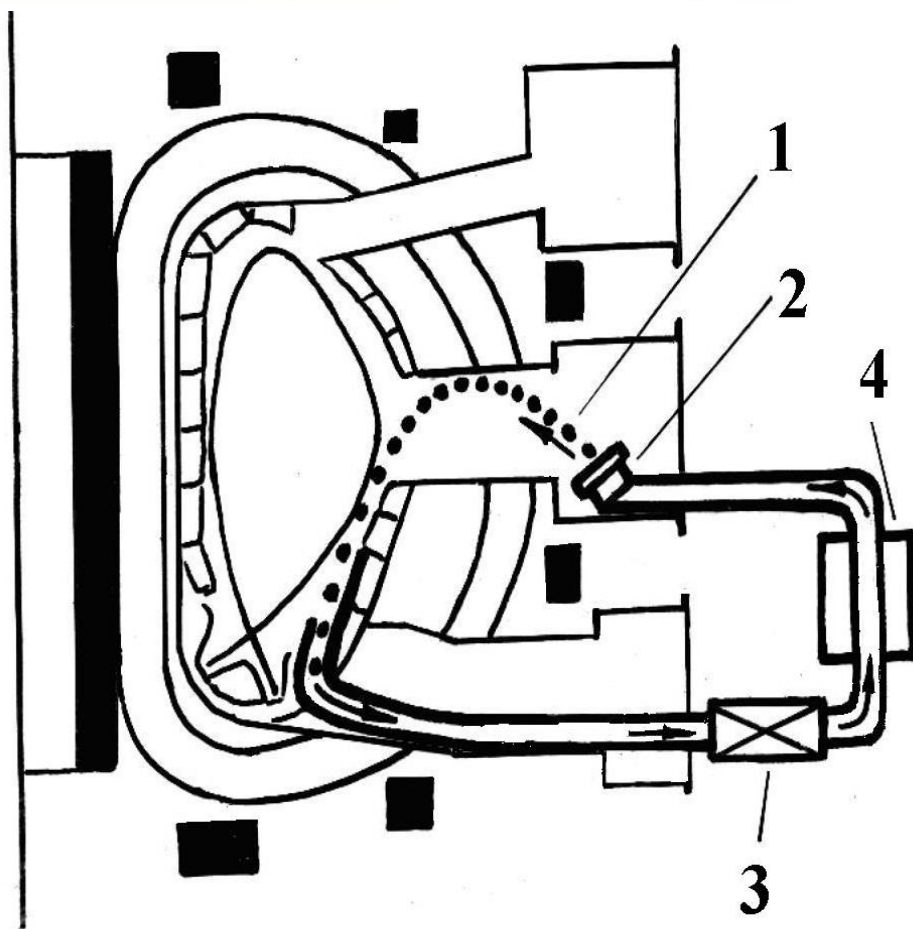


No Sn detected in the core plasma and around the LMD module (*SXR, AXUV & VIS spectroscopy*)

# Капельный лимитер



РОСАТОМ



Идея использования литиевой капельной завесы (Е.Муравьев 1982г) в токамаке. Капельная диафрагма в Т-3М (НПО «Энергия» Шатура 1985)



РОСАТОМ



ТРИНИТИ  
РОСАТОМ

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**