

**ХХХХІV МЕЖДУНАРОДНАЯ (ЗВЕНИГОРОДСКАЯ) КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ
СИНТЕЗУ**

Звенигород 13-17 февраля 2017г

**55 ЛЕТ ЭВОЛЮЦИИ ТОКАМАКОВ
ВИДИМЫЕ ПРЕДЕЛЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

С.В.Мирнов

*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» ул Пушкиновых 12 АО Троицк,
Москва 108 840 РФ*

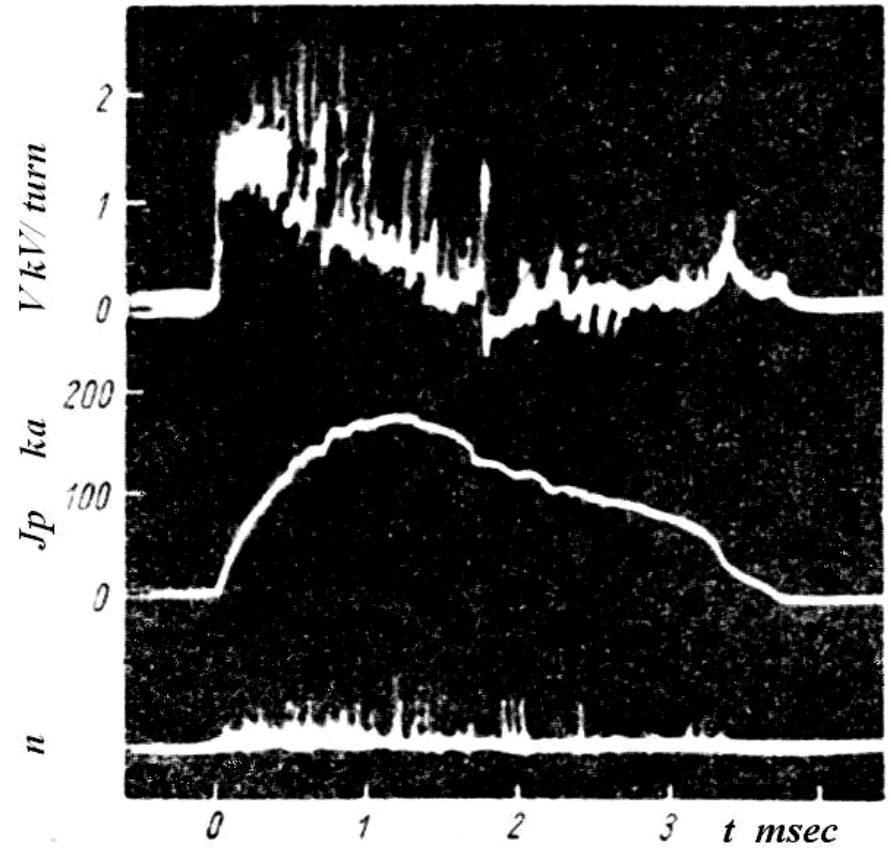
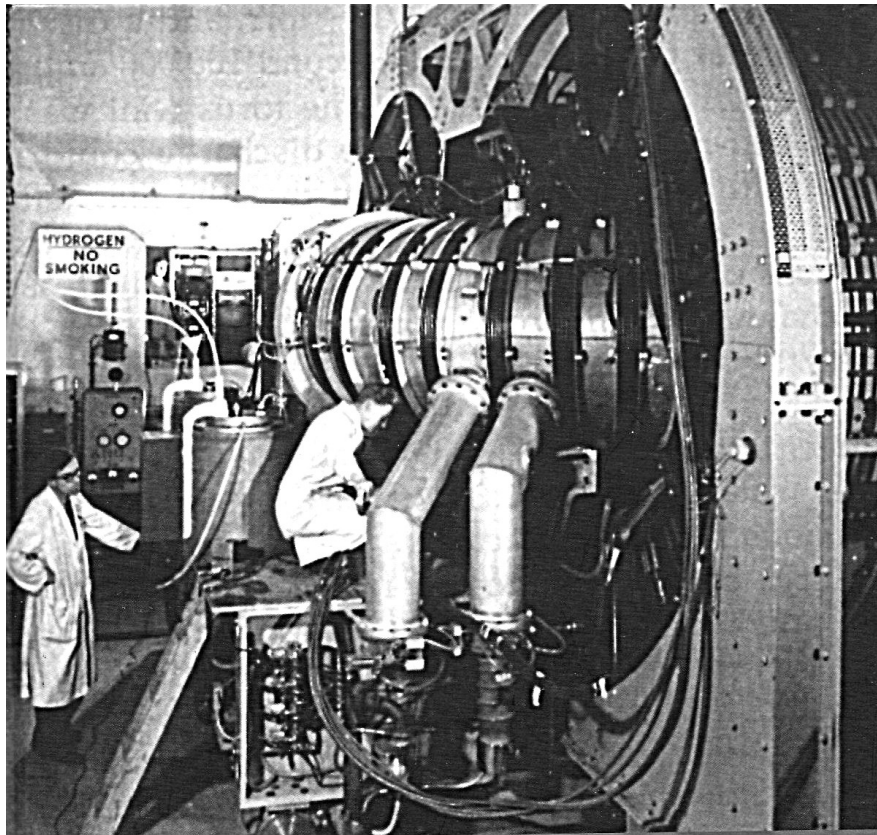
НИЯУ МИФИ Каширское ш. 31 Москва, 115409 РФ

1. 55 лет назад, зимой 1961-62гг в Отделе Плазменных Исследований (ОПИ) Курчатовского института на токамаке ТМ-2 (токамак малый-2) Е.П.Горбуновым и К.А.Разумовой был впервые получен макроскопически устойчивый плазменный разряд с электронной температурой более чем 100эВ.

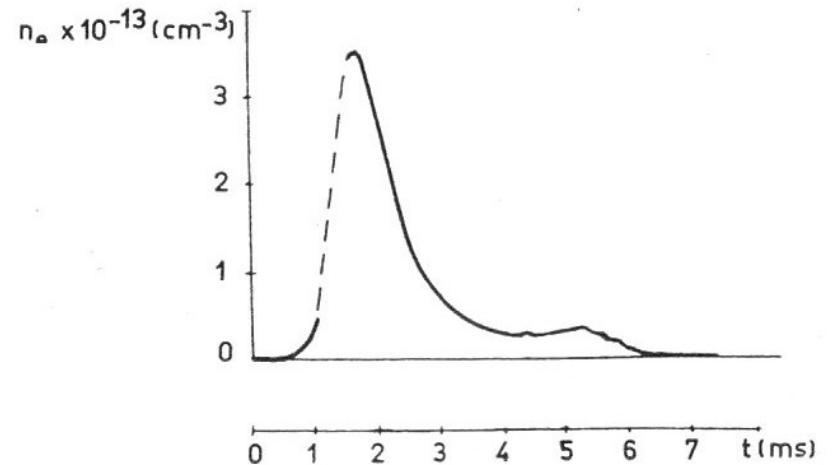
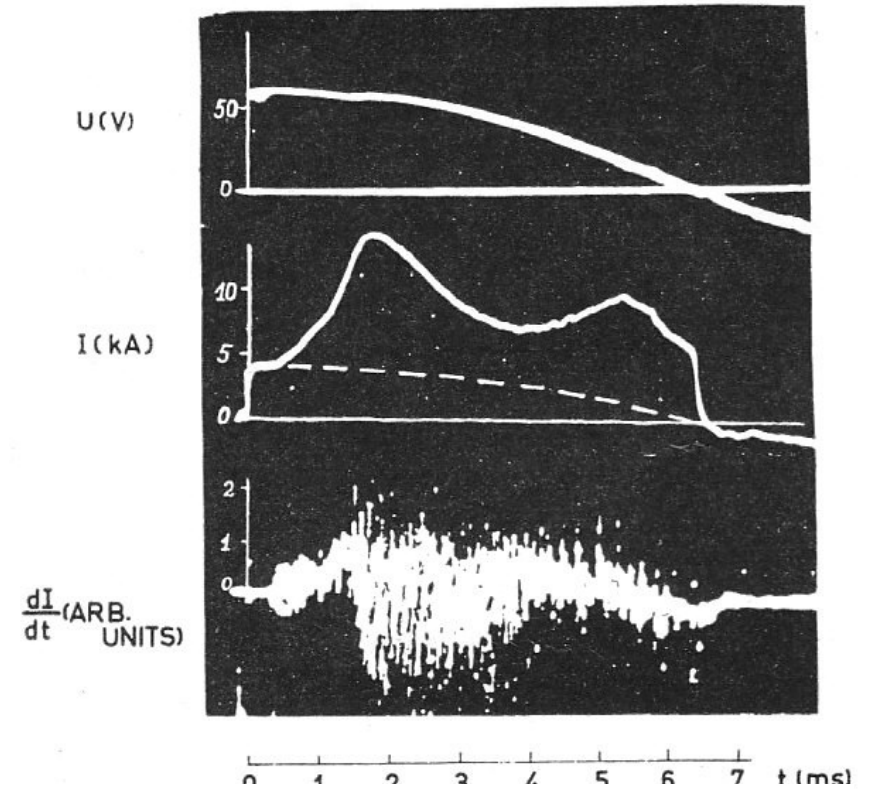
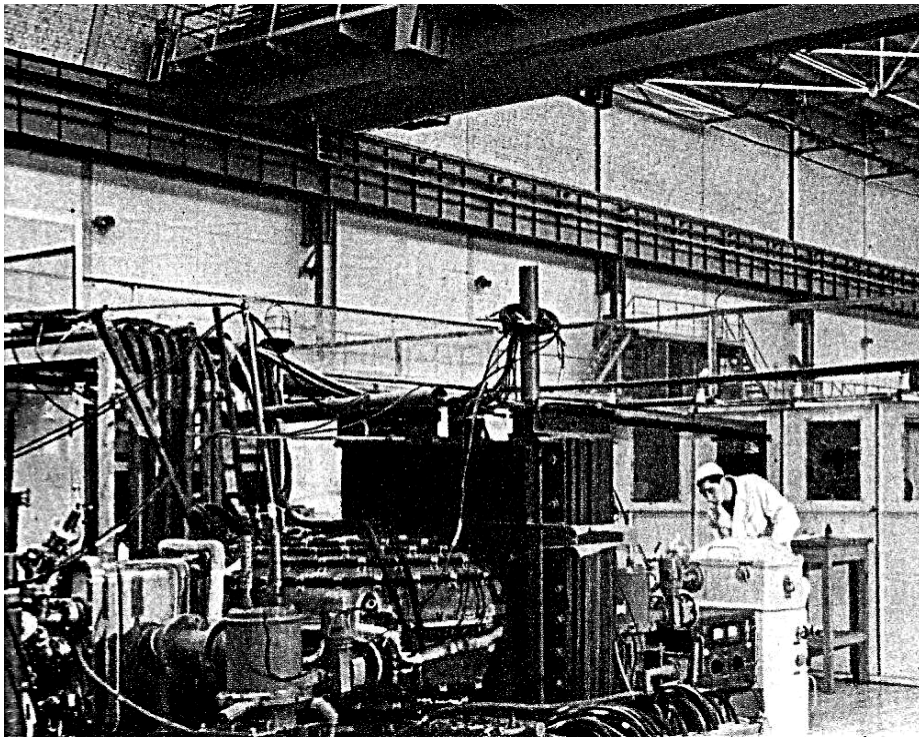
2. С 17 по 22 октября прошлого года в Киото прошла очередная 26я конференция МАГАТЭ по энергии синтеза. Куда направлен вектор развития токамаков сегодня?

55 лет назад до ТМ-2

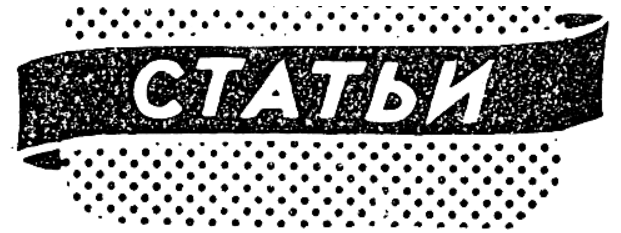
ZETA (1958 UK)



Токамак-2 (1961 СССР)



1962г

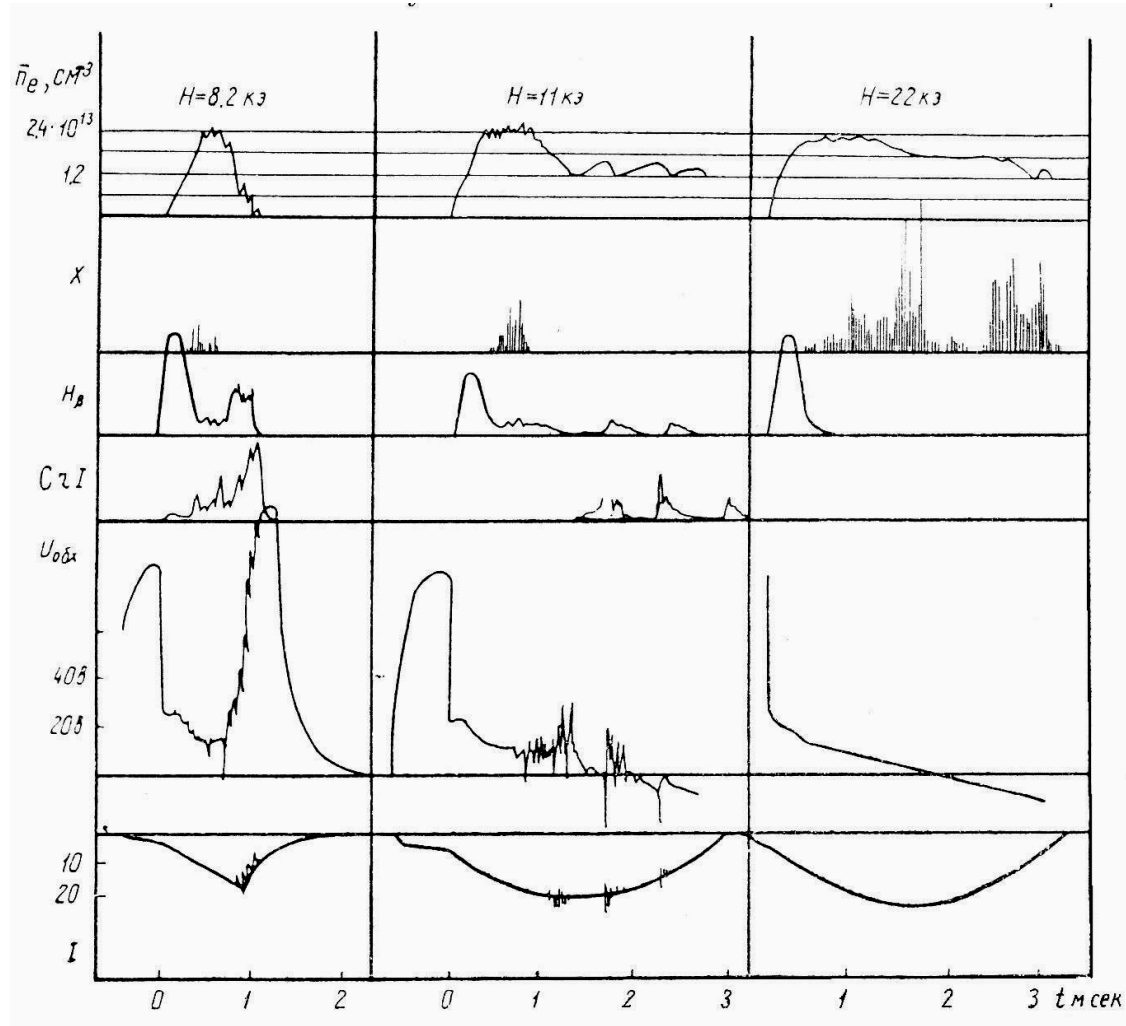
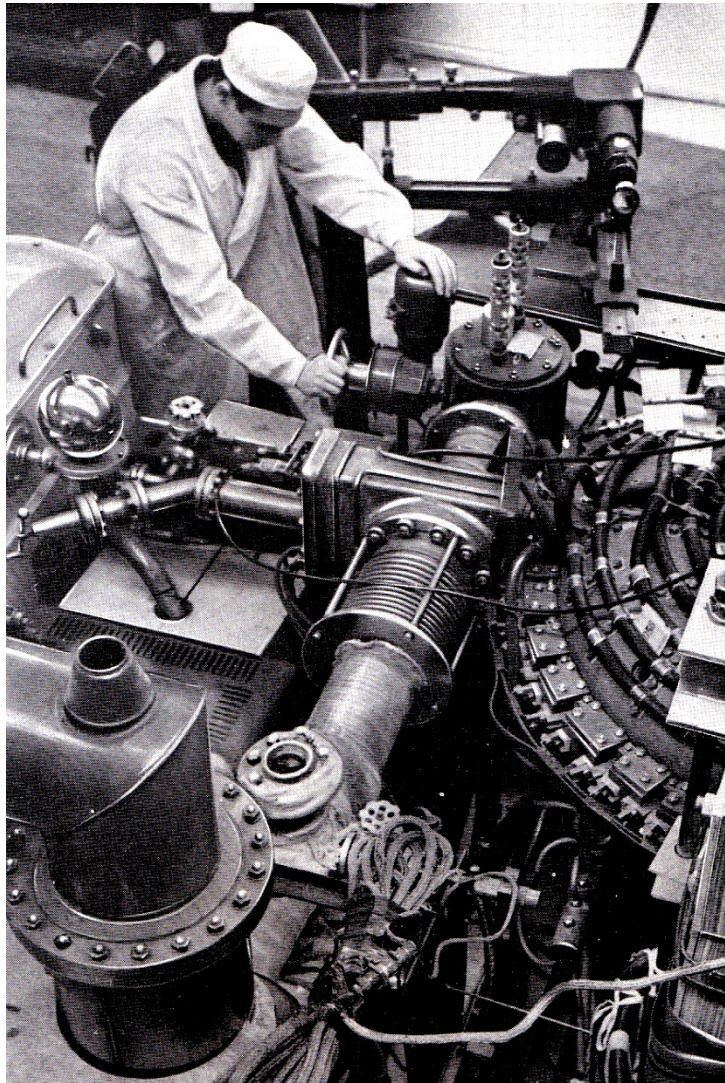


УДК 533.9

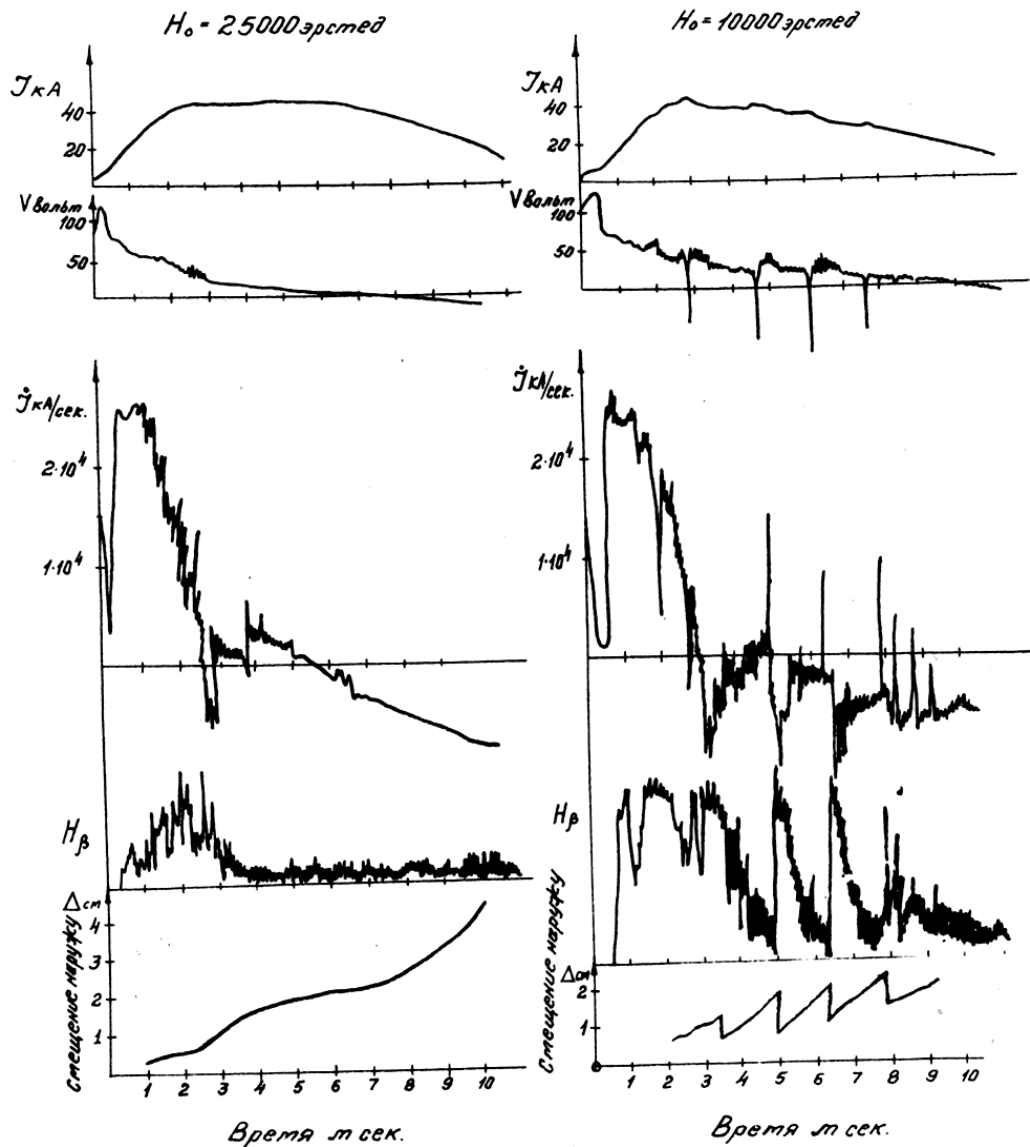
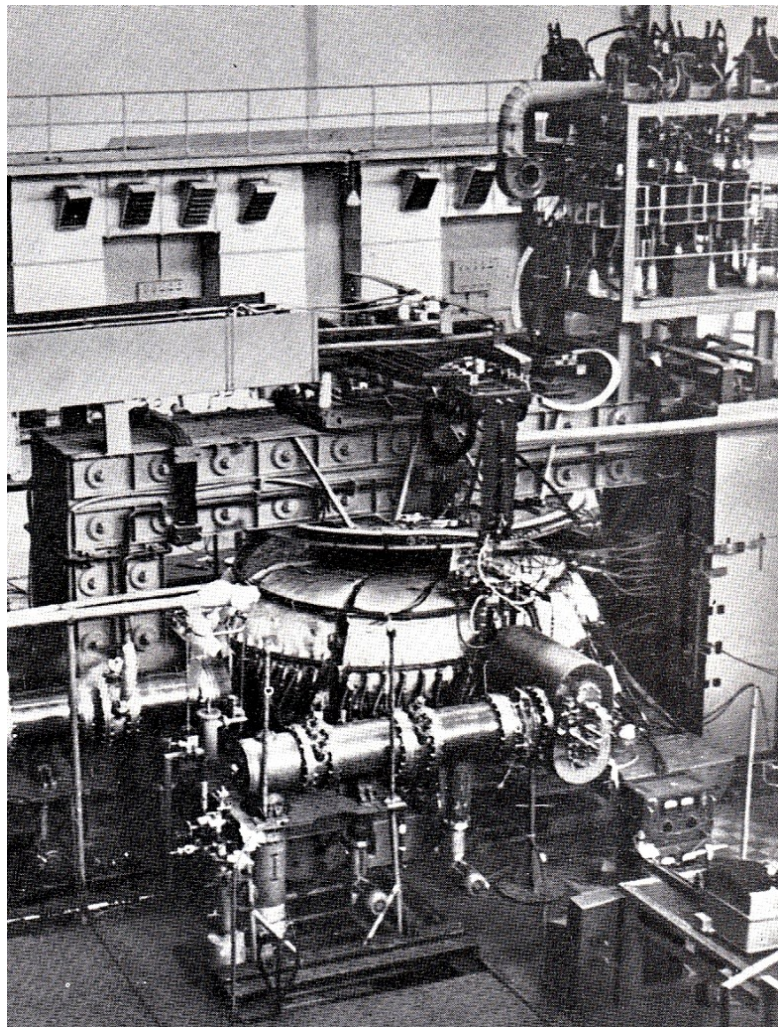
**Влияние сильного магнитного поля на магнитогидродинамическую
устойчивость плазмы и удержание заряженных частиц
в установке «Токамак»**

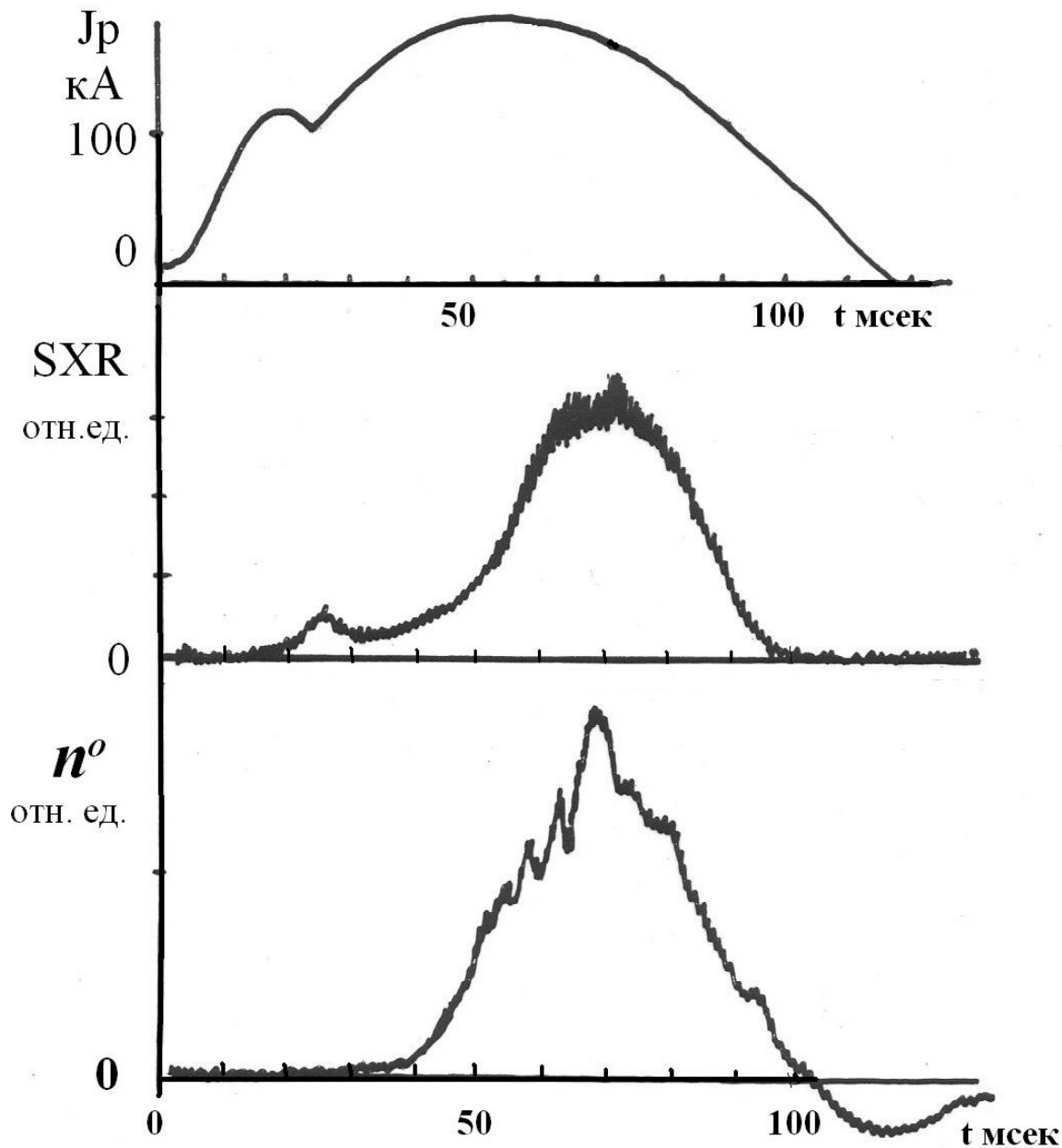
Е. П. Горбунов, К. А. Разумова

TM-2 (1962 CCCP R/a = 0.4/0.08)

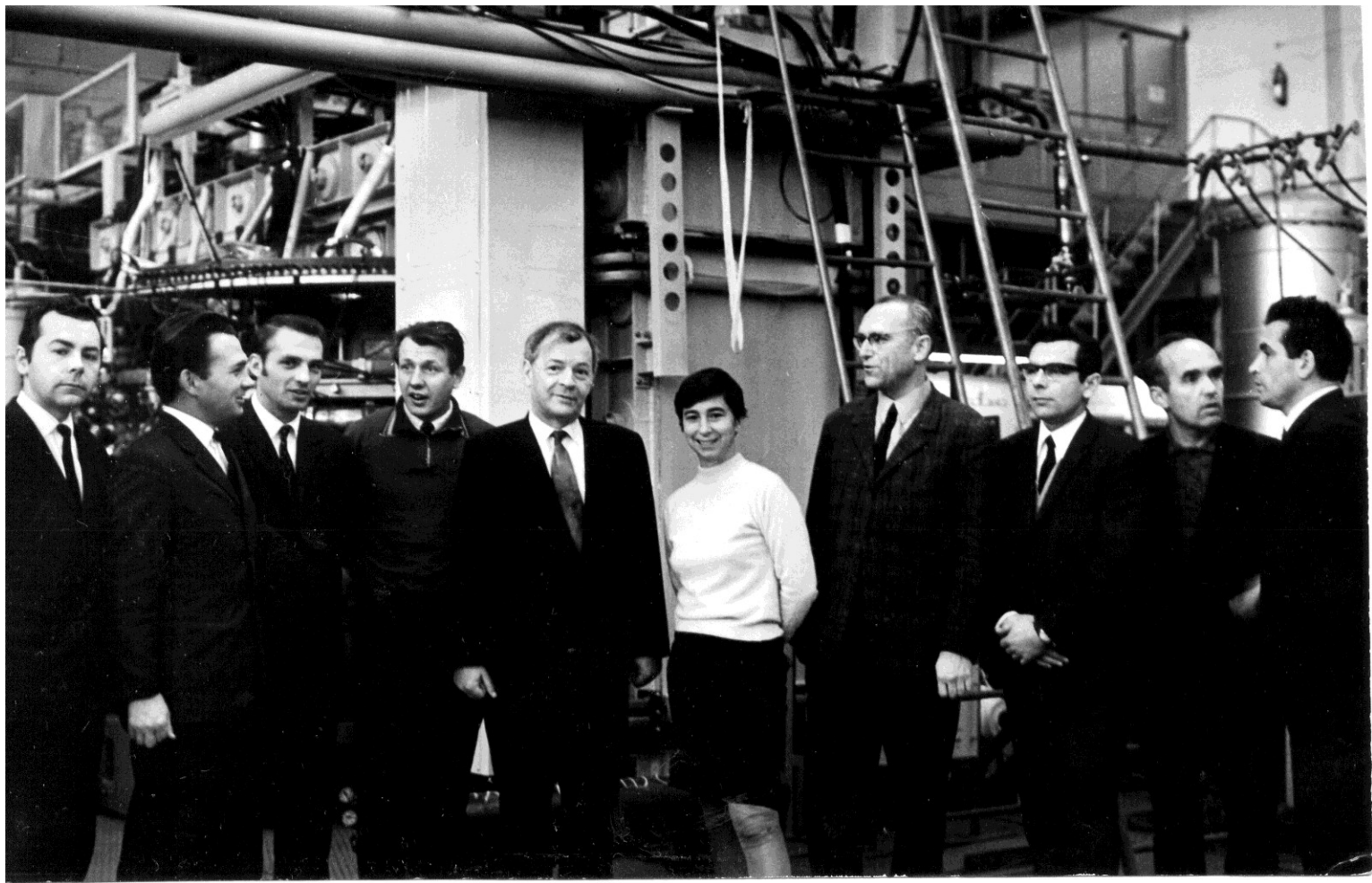


T-3 (1963 СССР R/a=1/0.15)





Токамак Т-4
СССР 1971г



Слева-направо: С.В.Мирнов, Е.П.Горбунов, А.М.Ус, В.С.Стрелков, Л.А.Арцимович, К.А.Разумова, А.К.Спиридонов, В.С.Муховатов, В.Д.Шафранов Д.П.Иванов – Лауреаты Госпремии СССР 1971г.
Получение и исследование высокотемпературной термоядерной плазмы на установках «Токамак»

Эволюция «пределов токамака» (границ существования устойчивых режимов)

в пространстве параметров:
ток разряда J , плотность плазмы n_e

при заданных:
тороидальное поле B ,
геометрия R, a

Поиск законов подобия и инвариантов

Достижения:

Запас устойчивости $q(a)$
удалось снизить с 6 - 7 до 2.5

$$q(a) = V_T a / V_J R$$

"PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED
NUCLEAR FUSION RESEARCH"

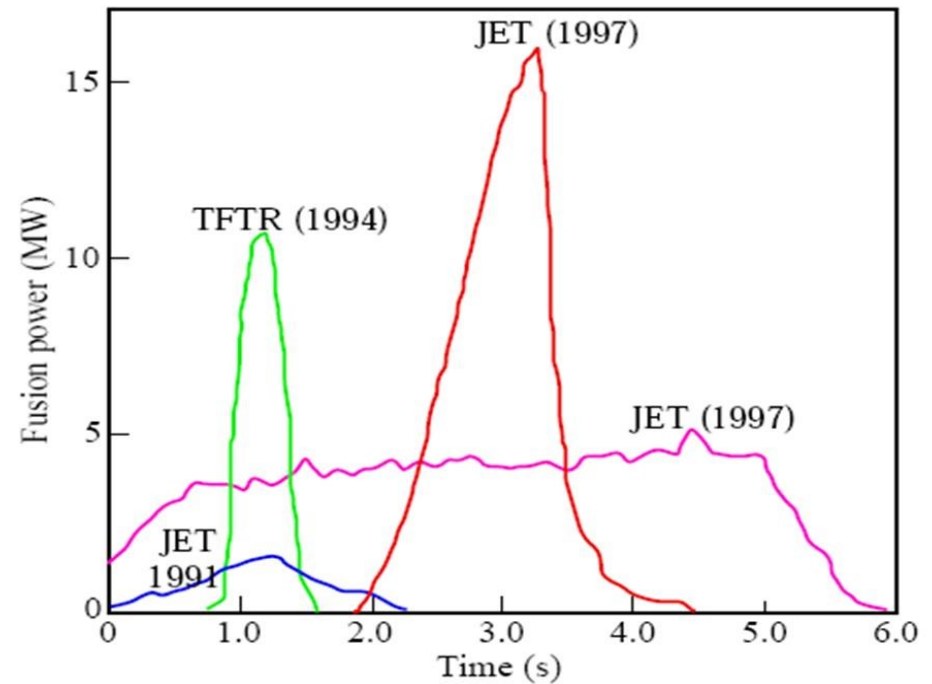
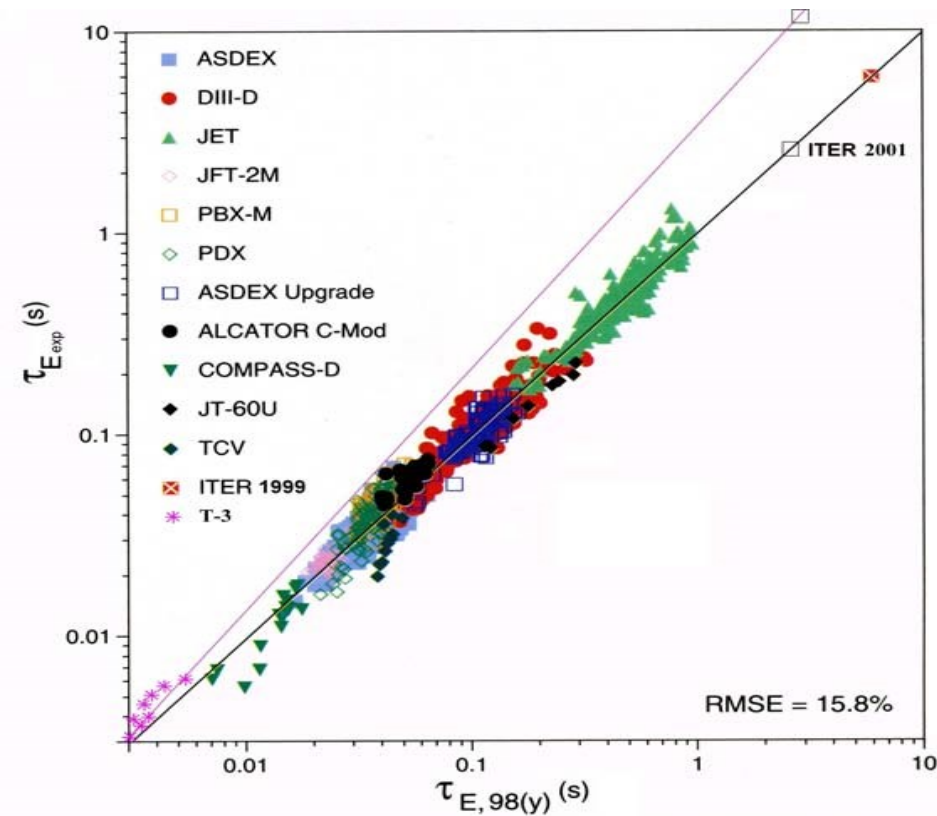
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
VIENNA, 1969

Энергетическое время (1968г.)

$$\tau_E \sim \alpha^2 V_J n_e^\alpha \quad \text{где } \alpha \sim 1/3$$

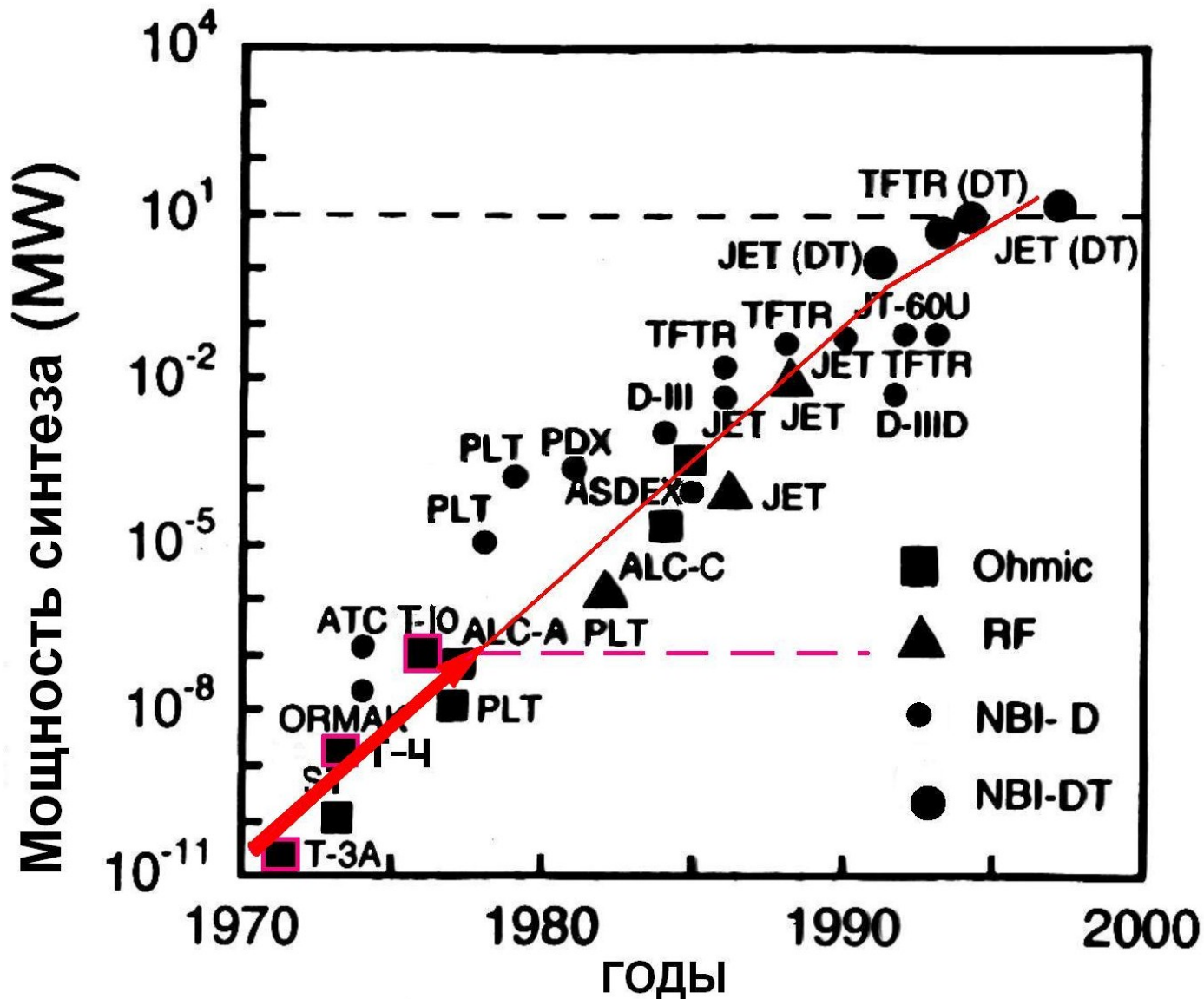
ITER Physics basis. Nuclear Fusion v39 N12 1999

Progress in ITER Physics basis. Nuclear Fusion v47 N6 2007



$$\tau_{E,98} = 0,0365 \cdot I_p^{0,97} \cdot B_T^{0,08} \cdot P_H^{-0,63} \cdot n^{0,41} \cdot M^{0,20} \cdot R^{1,93} \cdot (a/R)^{0,23} \cdot k^{0,67} \text{ sec}$$

Мировая динамика развития управляемого синтеза в токамаках (high performance shots)



«Пределы токамака». Диаграмма Хюгелла (Textor)

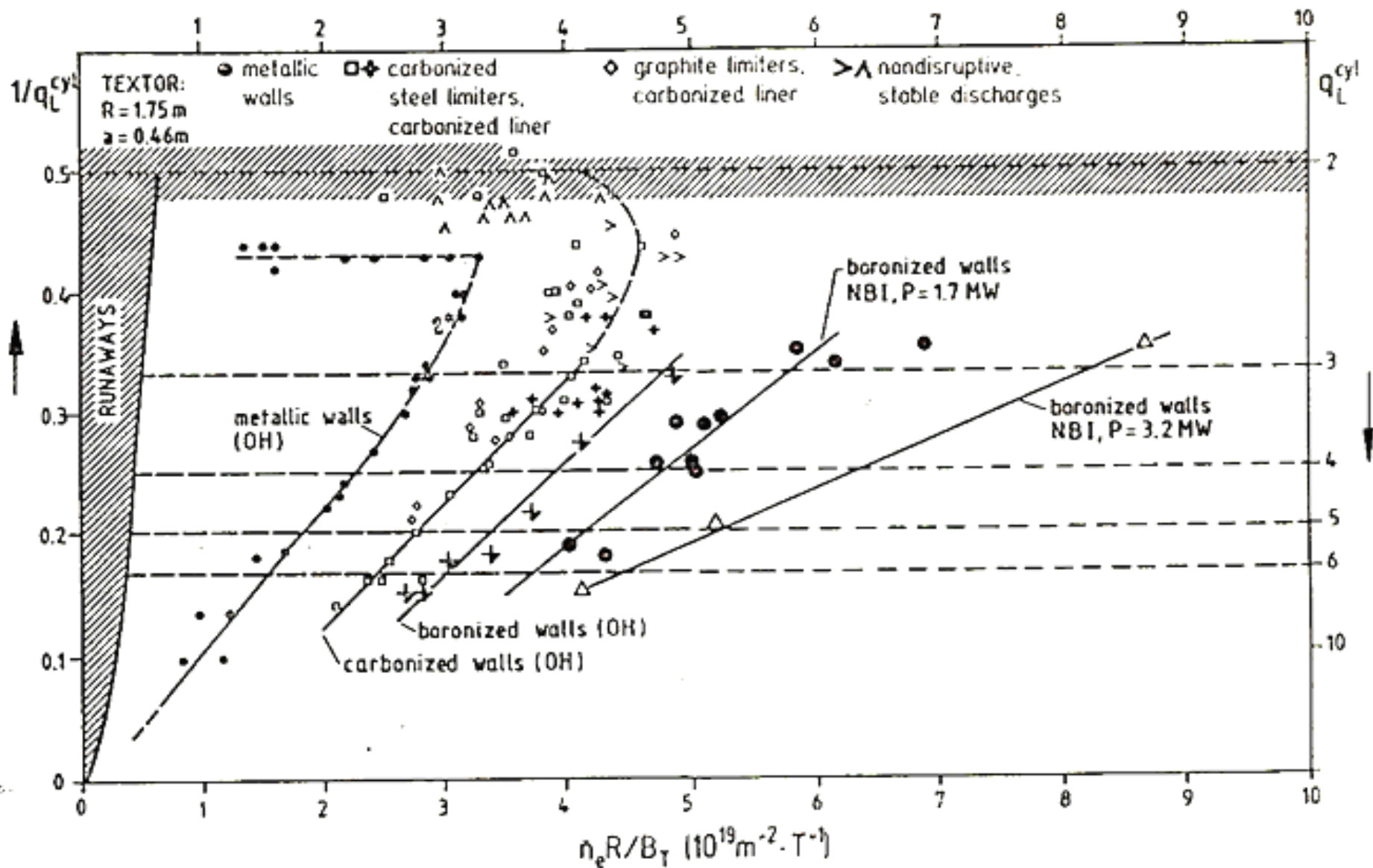
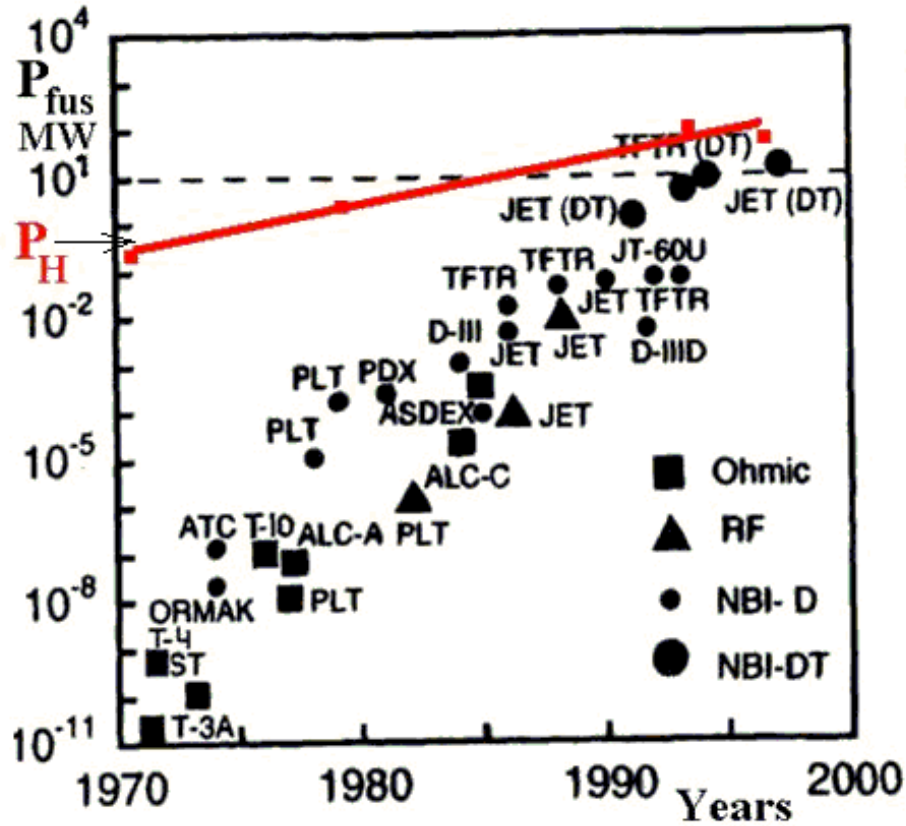


FIG. 2. Operational regime of TEXTOR for different wall conditions. The curves labelled OH represent Ohmic discharges; NBI indicates neutral beam heated plasmas.

«Поститэровский мир»

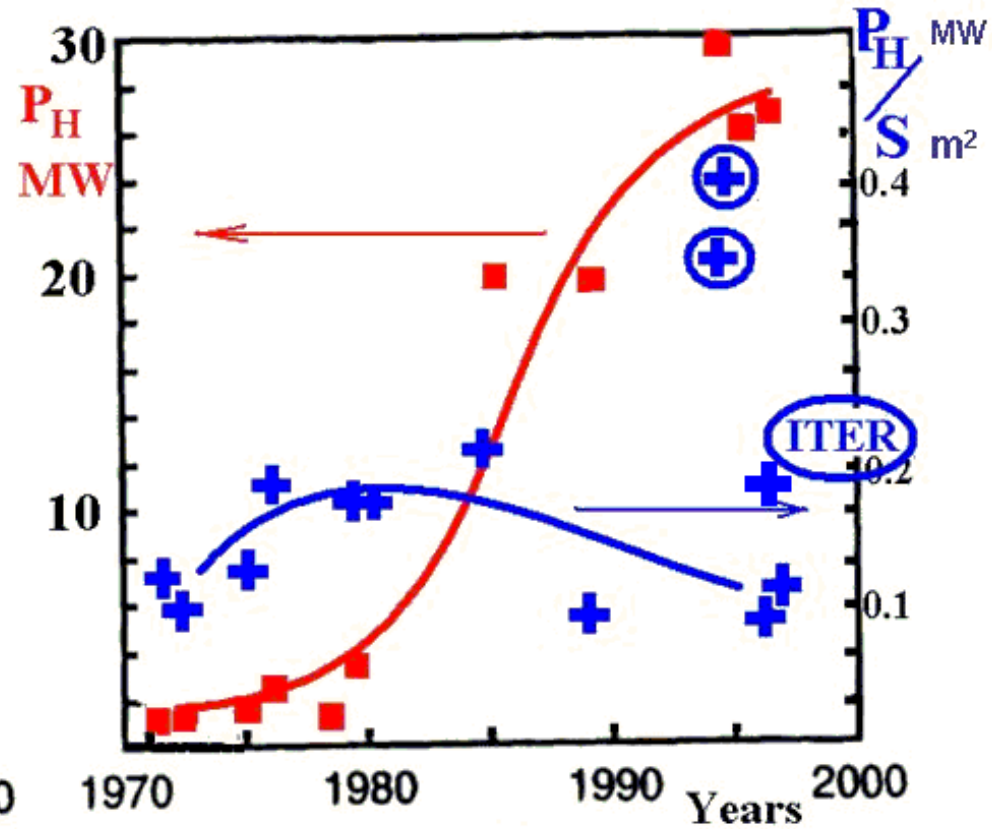
Энергетический «предел» P_n / S

A



A-dynamics of neutron production- P_{fus} and P_H ,

B



B - P_H in linear scale, crosses $q_T = P_H/S$.

Универсальный предел по средней тепловой нагрузке на первую стенку токамака

(P-Мощность нагрева/площадь первой стенки S)

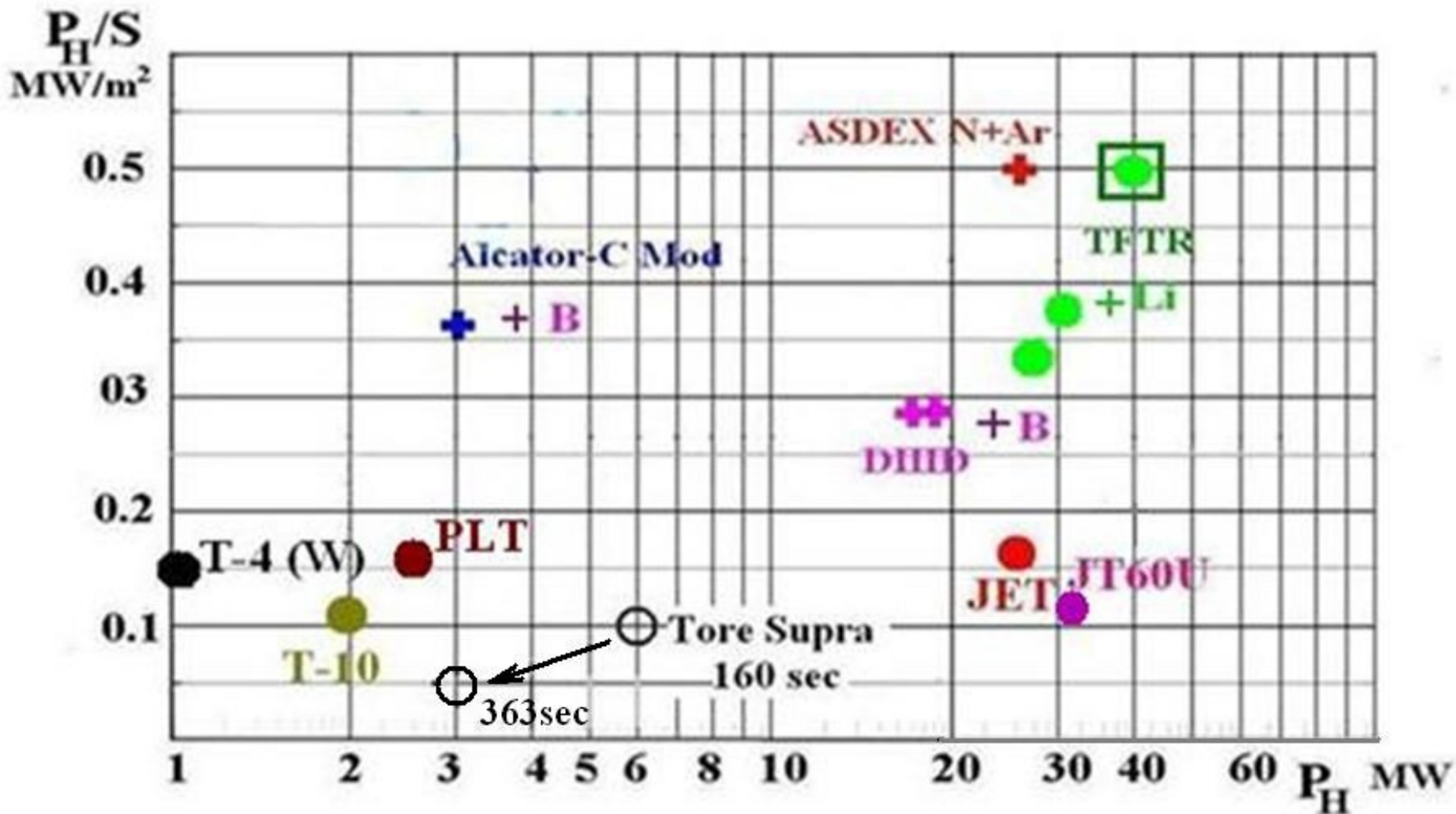
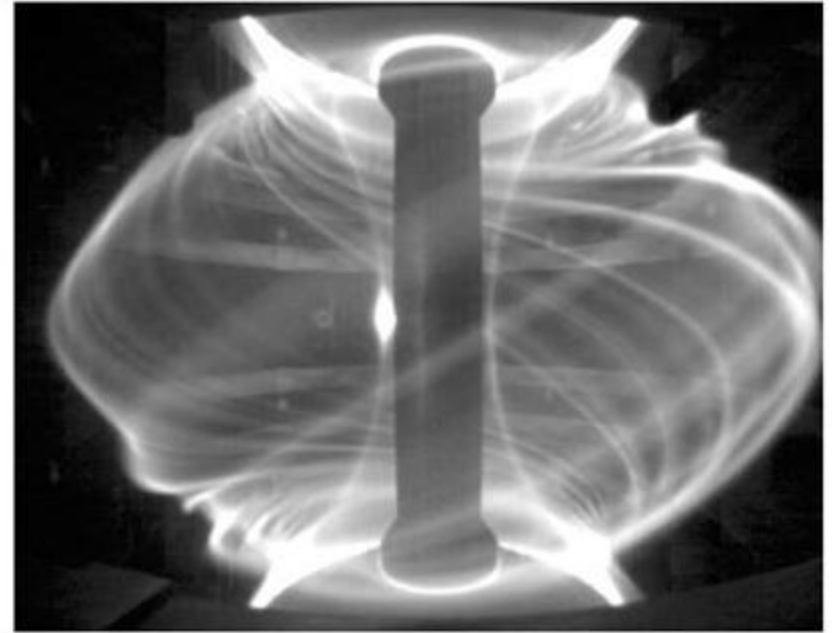
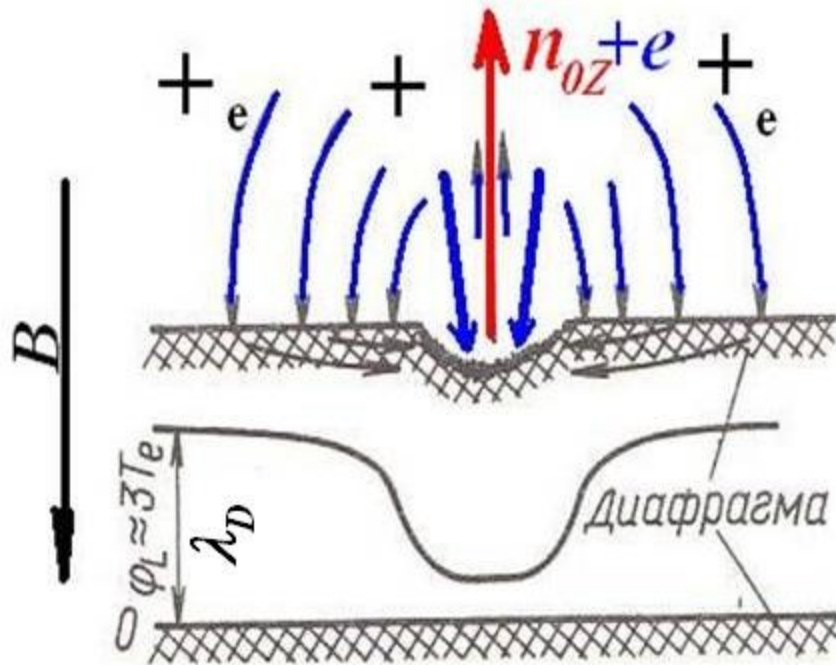
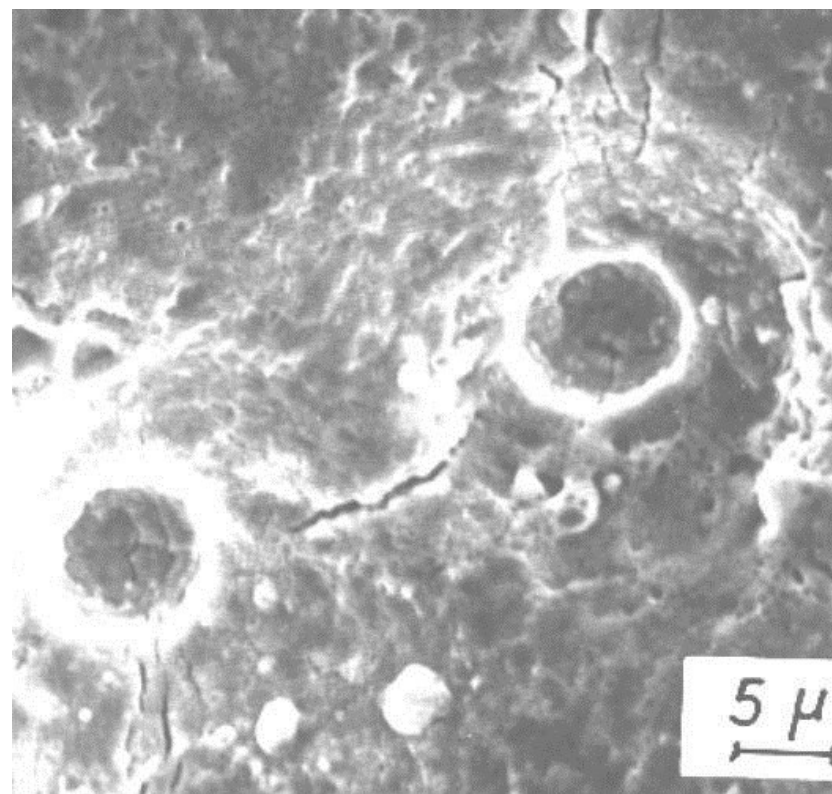
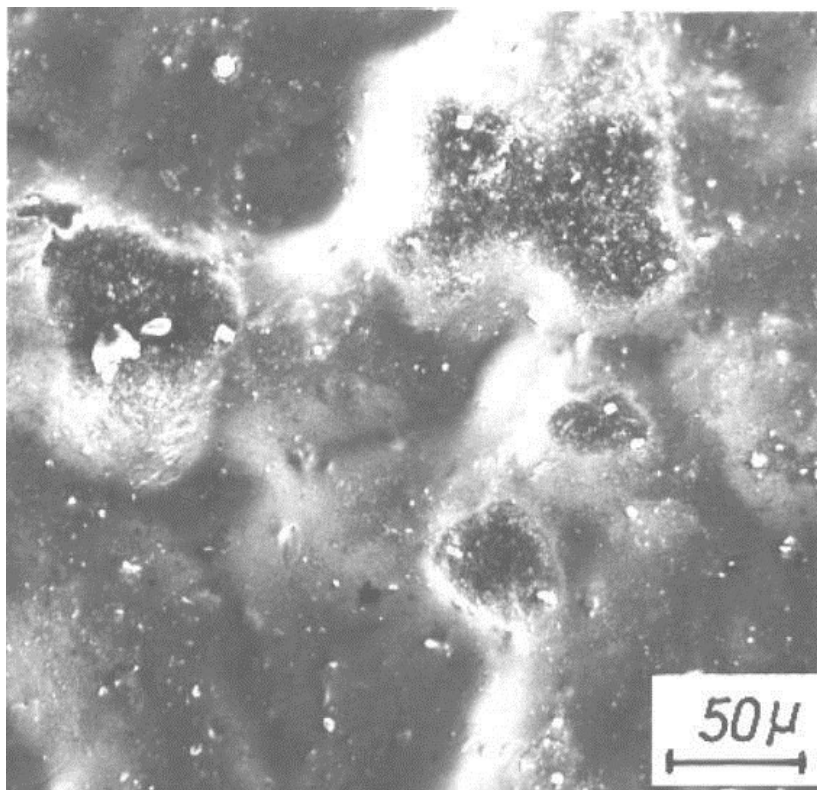


Схема униполярной дуги



$$\varphi_L \approx 3T_e \text{ при } T_e \approx 30 \text{ эВ}, n_e = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3} \quad E_d = \varphi_L / \lambda_D \approx 10^5 \text{ В/см} \sim \sqrt{T_e n_e}$$

**Поверхность лимитера Т-10 (SS) после экспозиции в плазме: слева ионная сторона, справа – электронная.
(SEM D.Hildebrant et al. 1980 ZIE Preprint 80-4)**



NUCLEAR FUSION: 1962 SUPPLEMENT, PART 1

**ПОЛУЧЕНИЕ ЧИСТОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ В
КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМАХ. ПРОЦЕССЫ, ПРИВОДЯЩИЕ
К ПОСТУПЛЕНИЮ ПРИМЕСЕЙ В ПЛАЗМУ***

В. А. СИМОНОВ, Б. Н. ШВИЛКИН, Г. П. КУТУКОВ

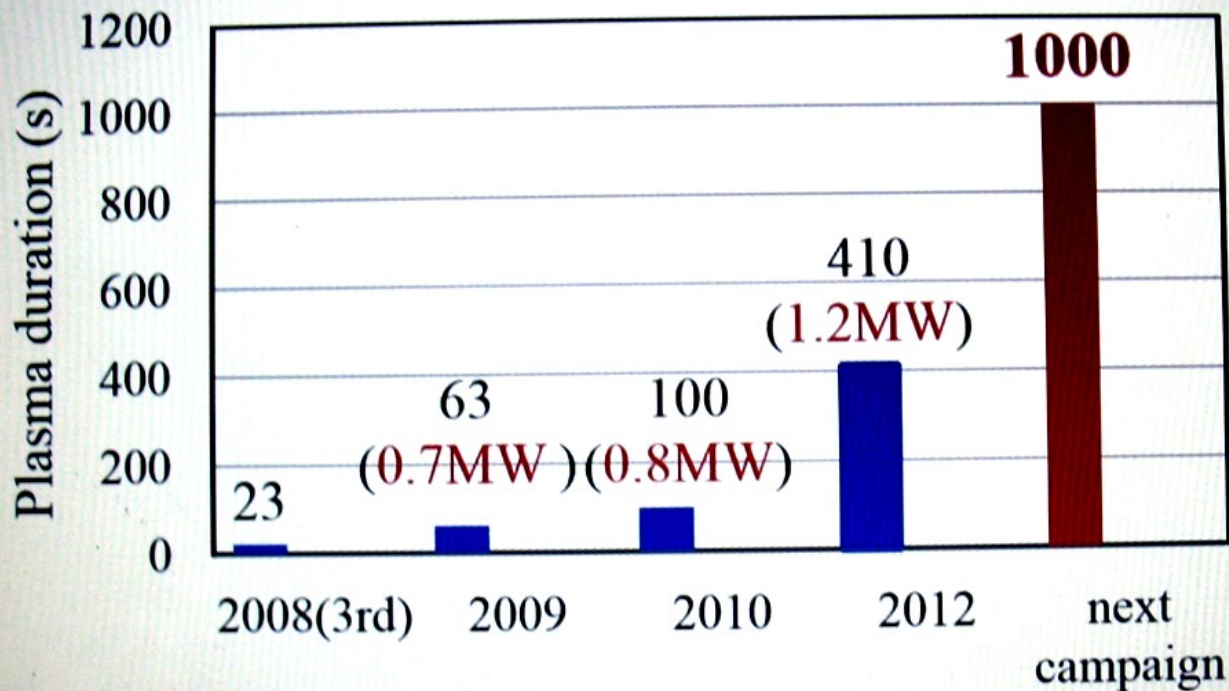
АКАДЕМИЯ НАУК СССР, МОСКВА,

СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

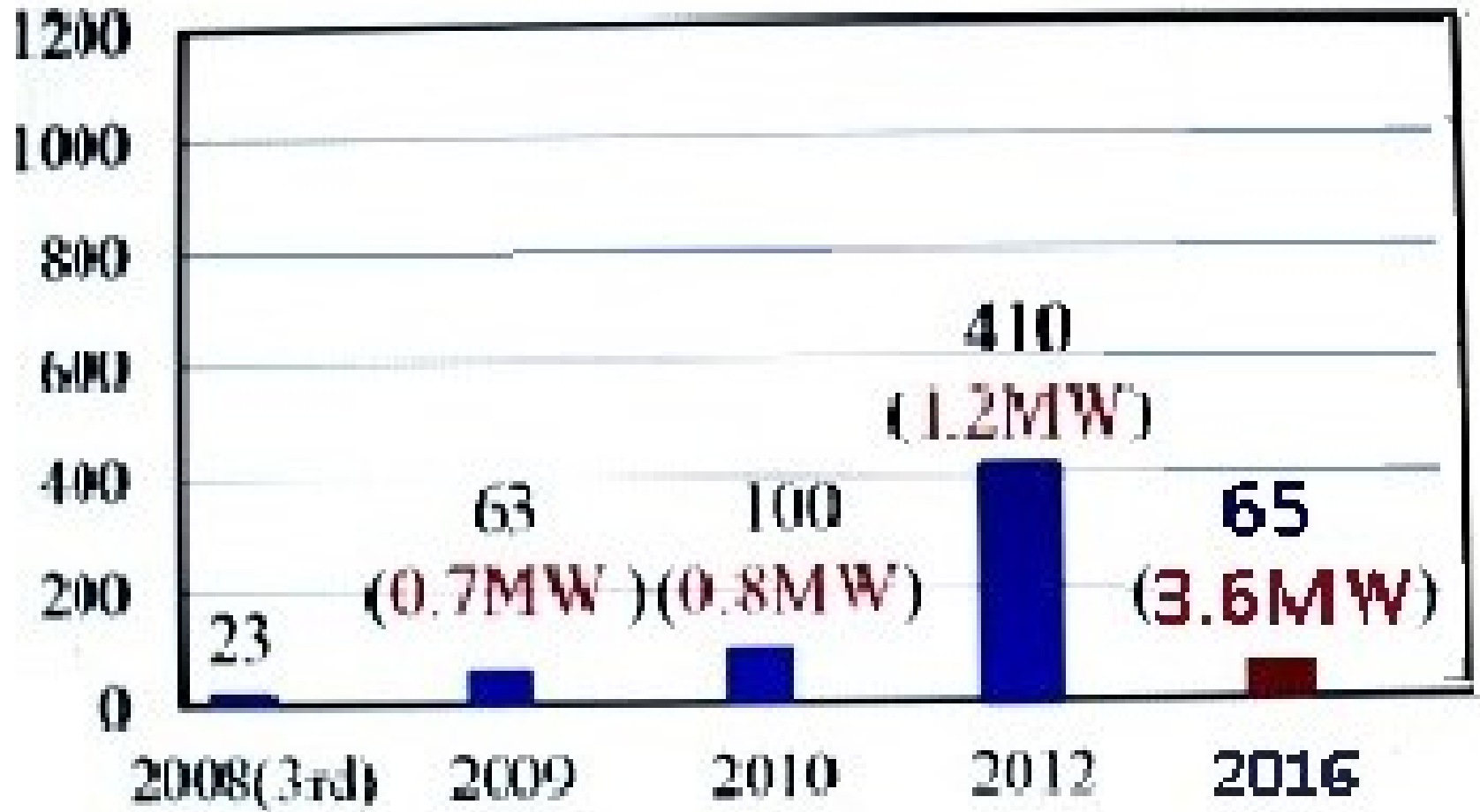
Сверхпроводящие токамаки

Литиевые токамаки

EAST Long Pulse Discharge History



Current Driven by LHW alone

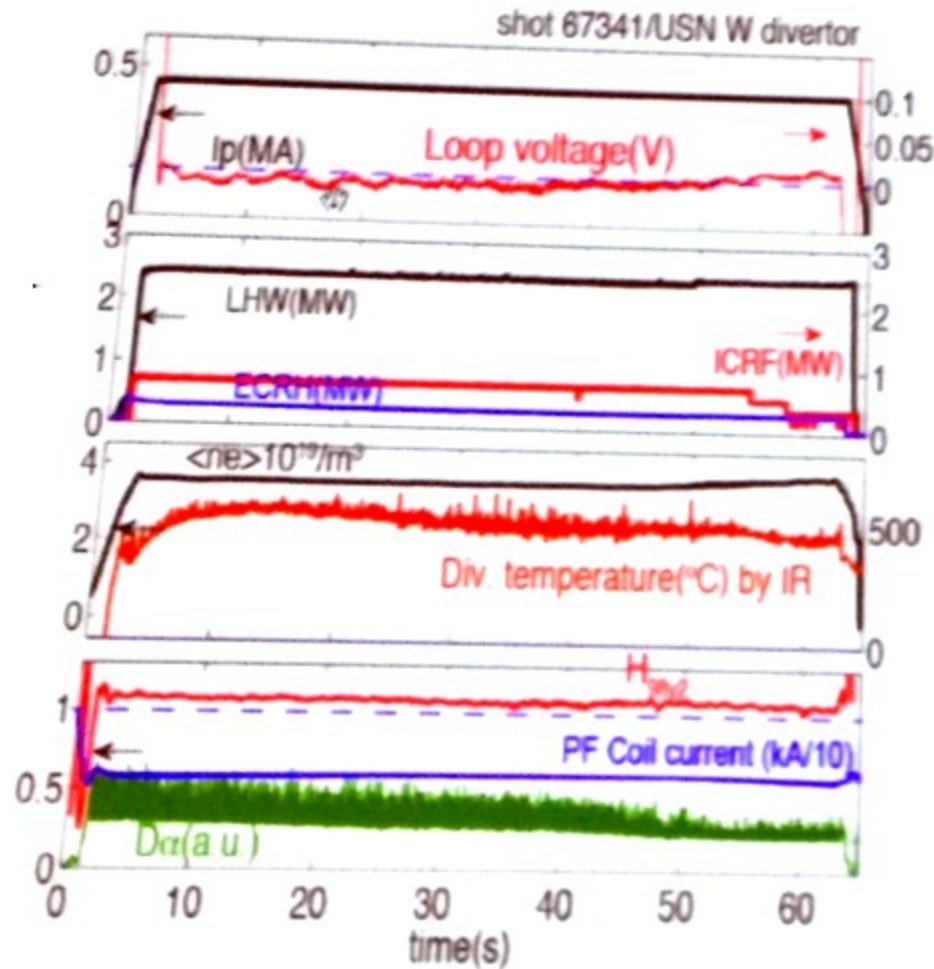


EAST – 450 kA, 65 сек

Minute-scale H-mode operation (>60s)!



ASIPP



➤ Pure RF heating:

$$P_{LHW, 2.45GHz} = 0.4 MW$$

$$P_{LHW, 4.6GHz} = 2.1 MW$$

$$P_{ICRF} = 0.8 MW,$$

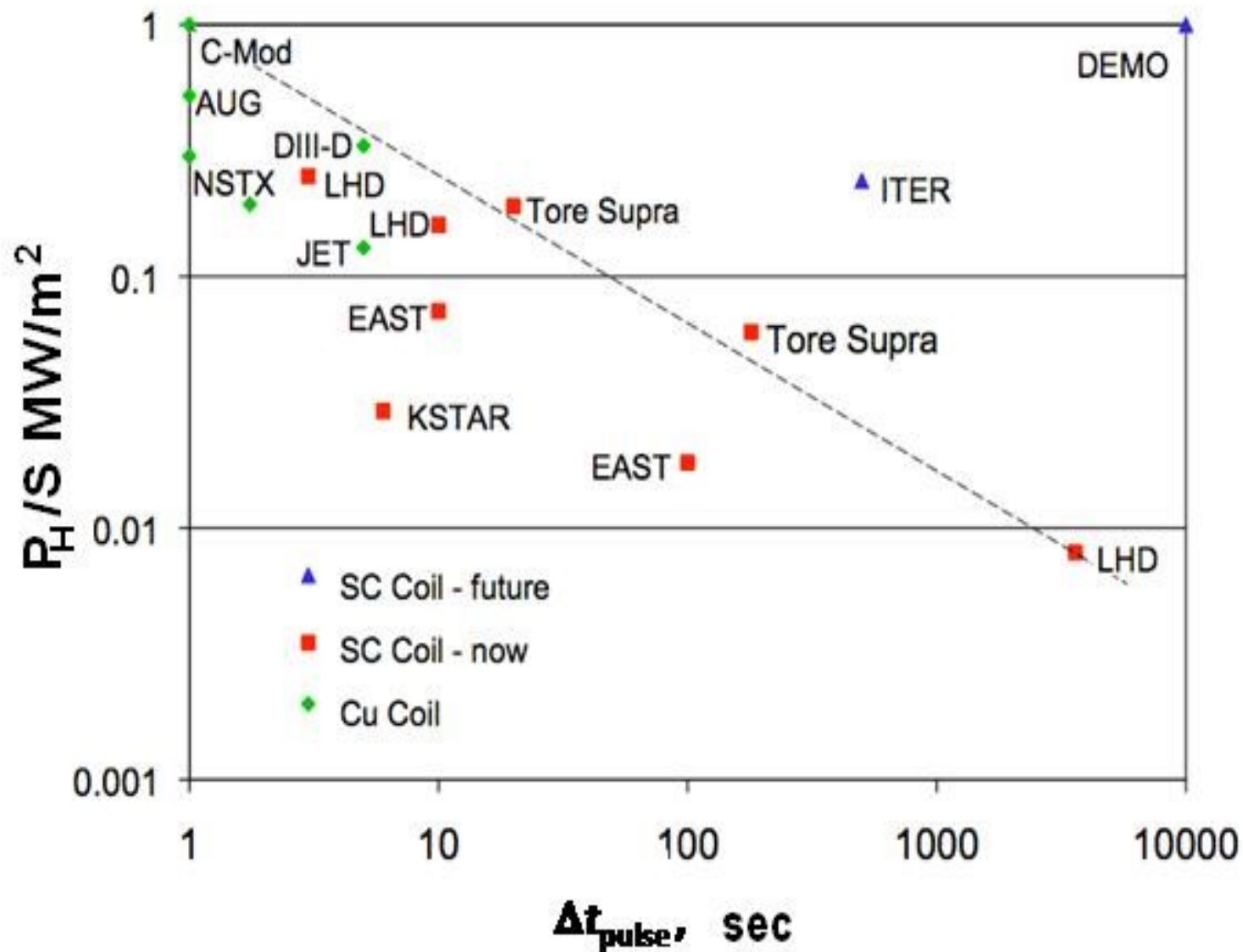
$$P_{ECRH} = 0.3 MW;$$

➤ Good confinement with

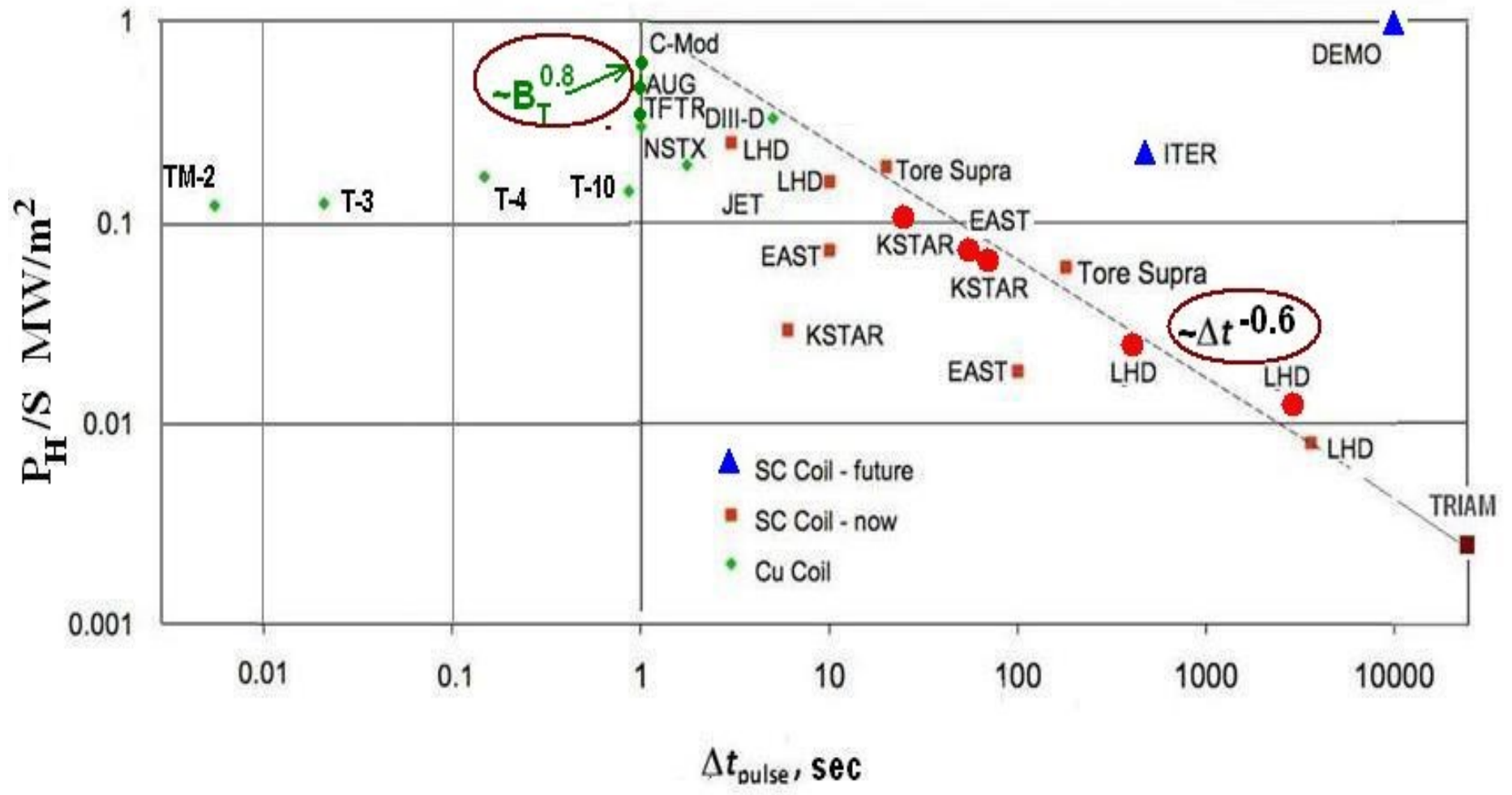
$$H_{98(y2)} \sim 1.1;$$

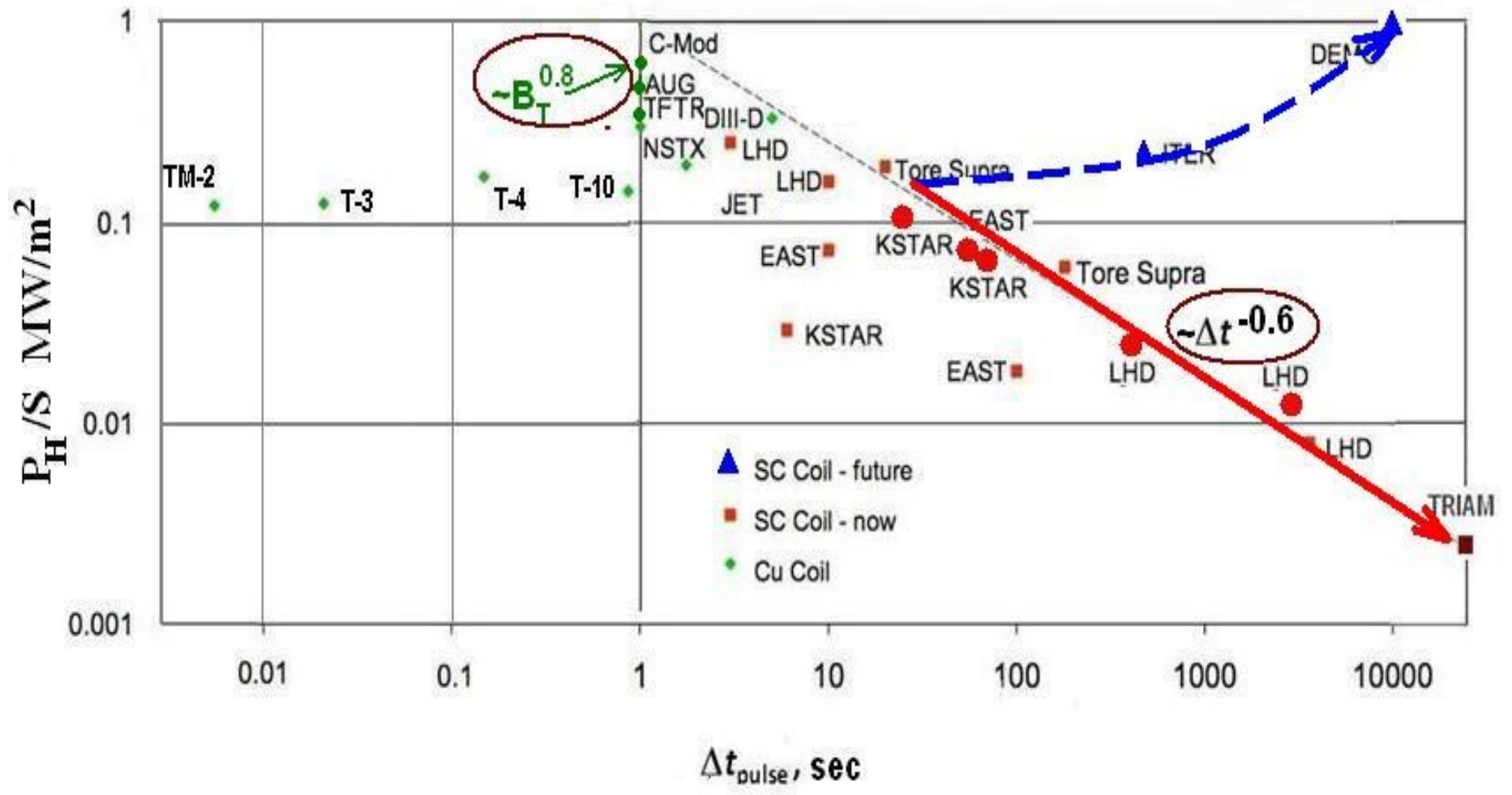
➤ Good control of impurity level- assisted by ELMs and ECRH, and an edge coherent mode;

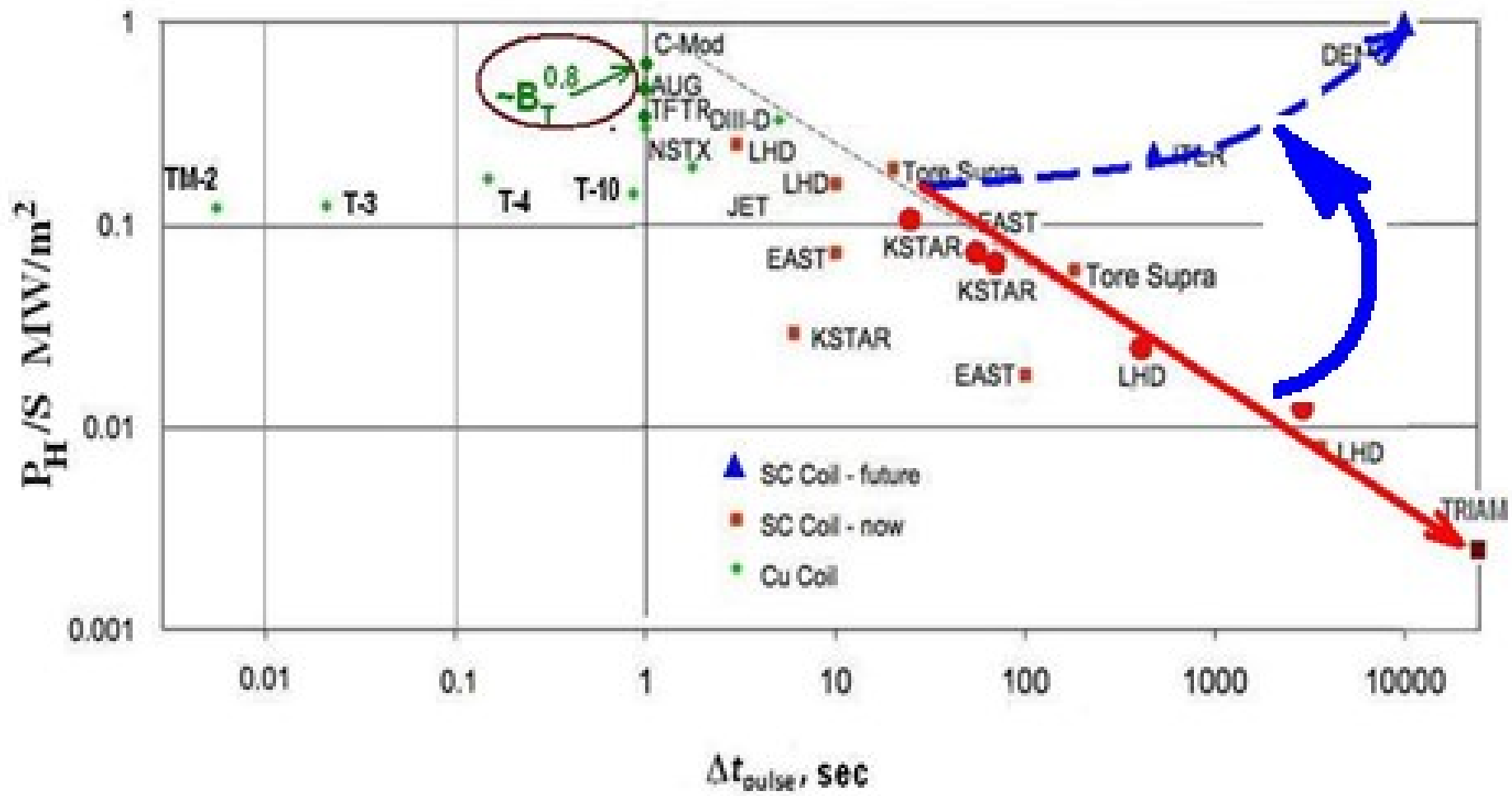
➤ Inter-ELM divertor heat flux $\sim 3 \text{ MW/m}^2$



DOE. Fusion Energy Sci. Adv. Com., Rep. Feb. 2012, DOE/SC-0150 Fig. 4.02.



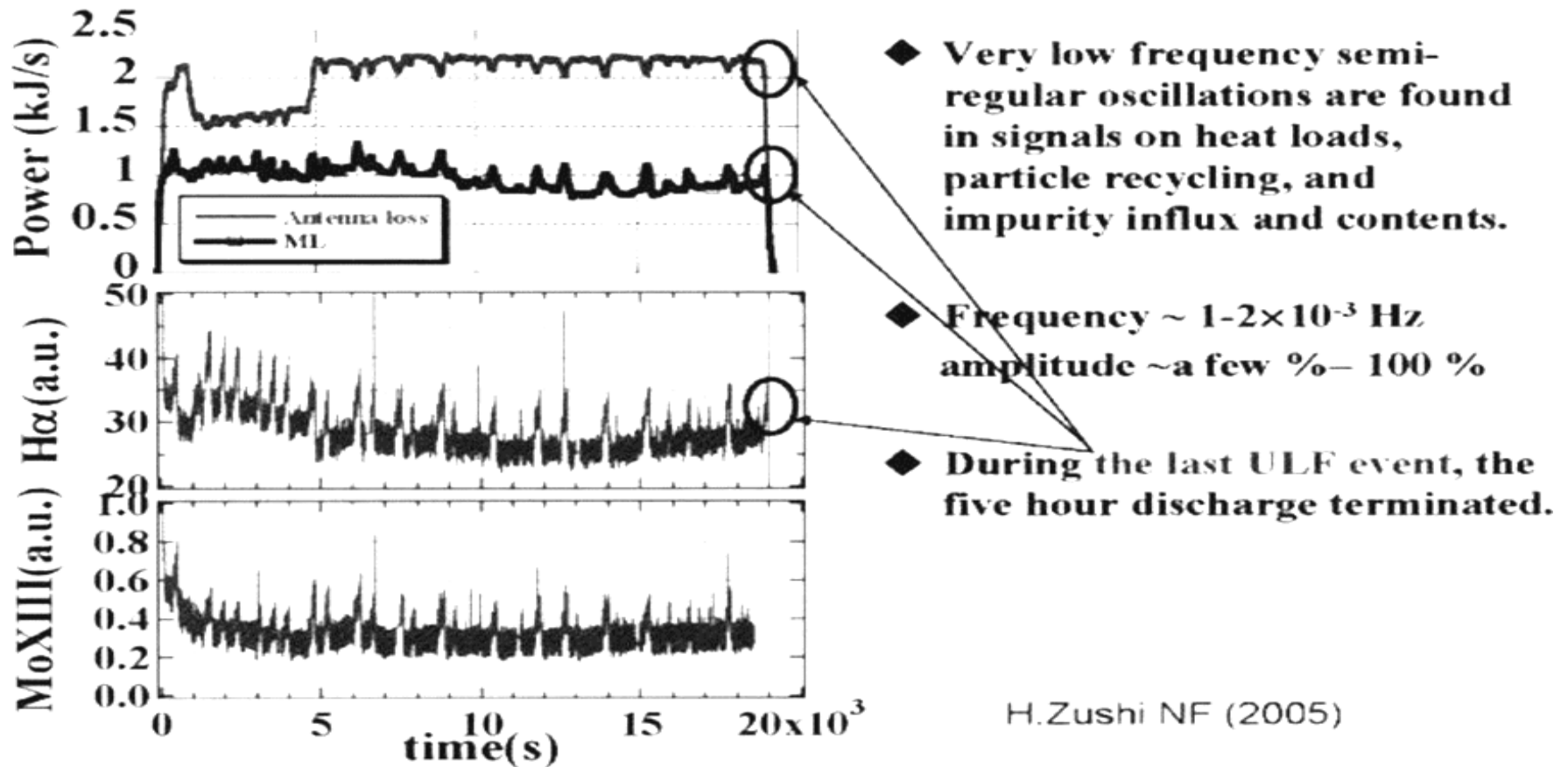




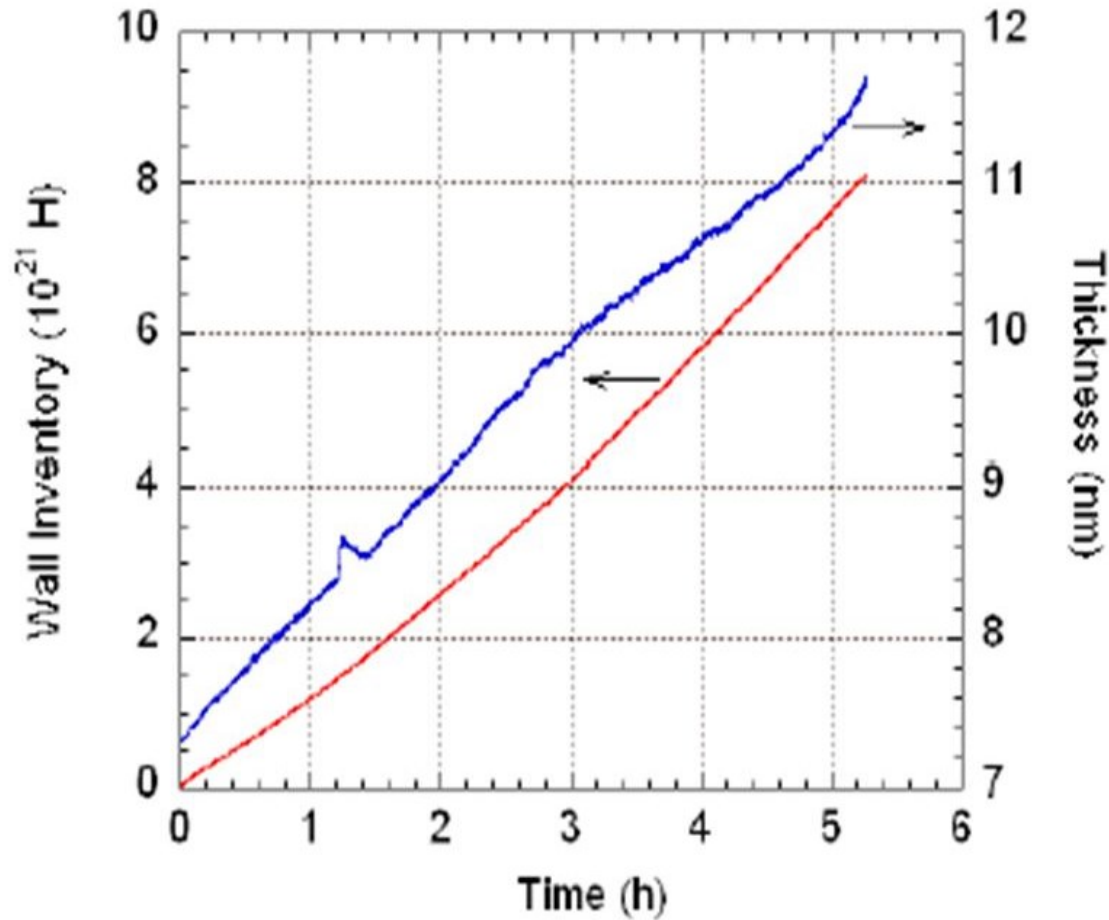
**Что вызывает коллапс
плазменного шнура?**

Токамак TRIAM-1M, зависимости от времени: Р-мощность энерговклада (ток 16кА поддерживается нижнегибридной волной), H α - интенсивность водородного потока из плазмы, Mo- индикатор поступления молибдена с Mo-лимитера в разряд.

Ultra Low Frequency Events



Соответствующая временная зависимость: толщины молибденовой пленки на диверторной пластине и водородного потока, захваченного стенкой камеры.



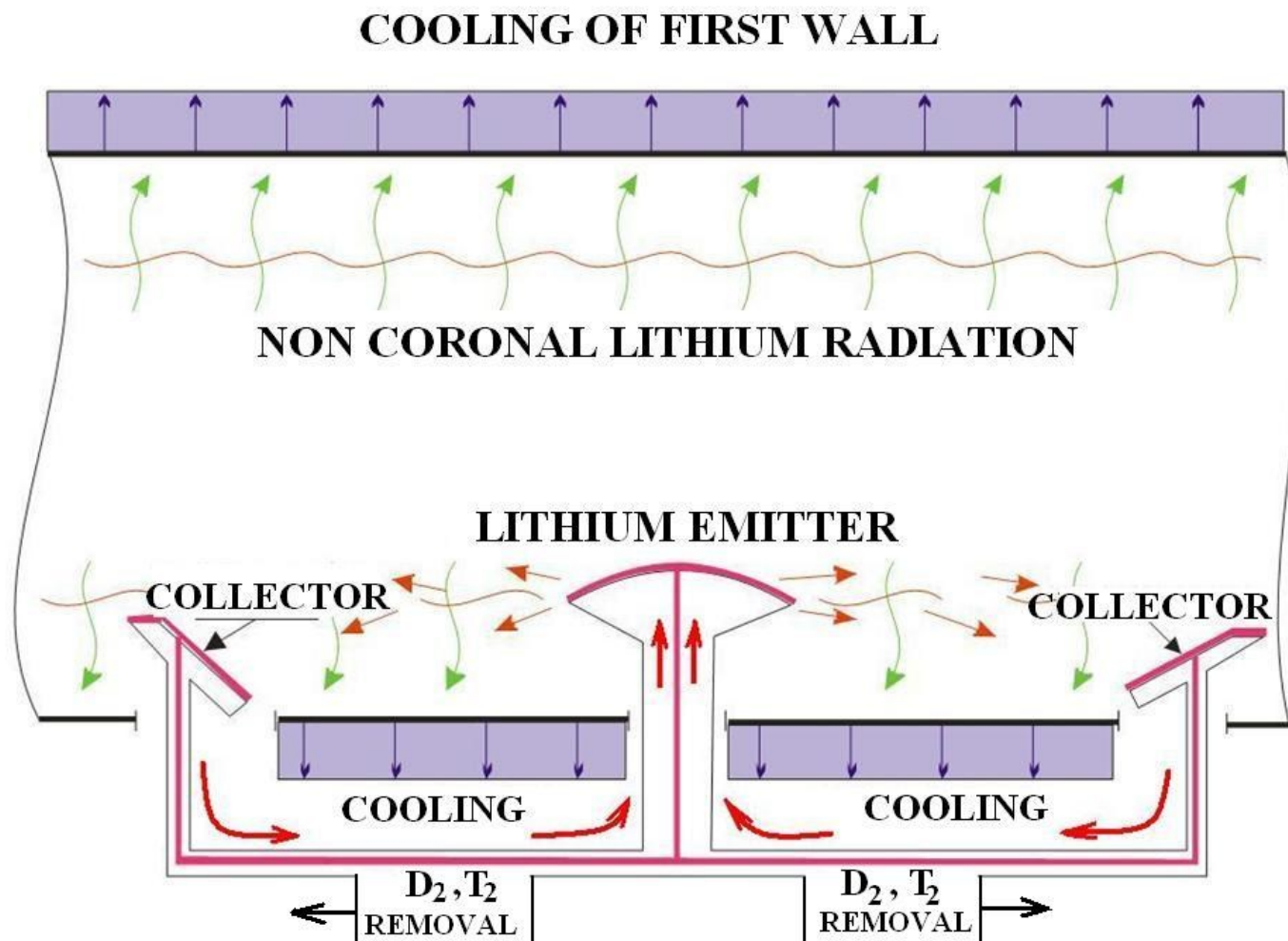
Приходится предполагать, что рост толщины пленки снижает электрическую «прочность» слоя плазма-стенка !

Что делать?

Необходимо научиться выводить «горючее» и продукты эрозии из камеры токамака без нарушения технологического цикла (как минимум вакуума)

**Литий как возможное решение
проблемы вывода продуктов
эрозии в процессе
стационарной работы
токамака - реактора**

Схема замкнутого контура циркуляции продуктов эрозии (лития) и «горючего (ДТ)

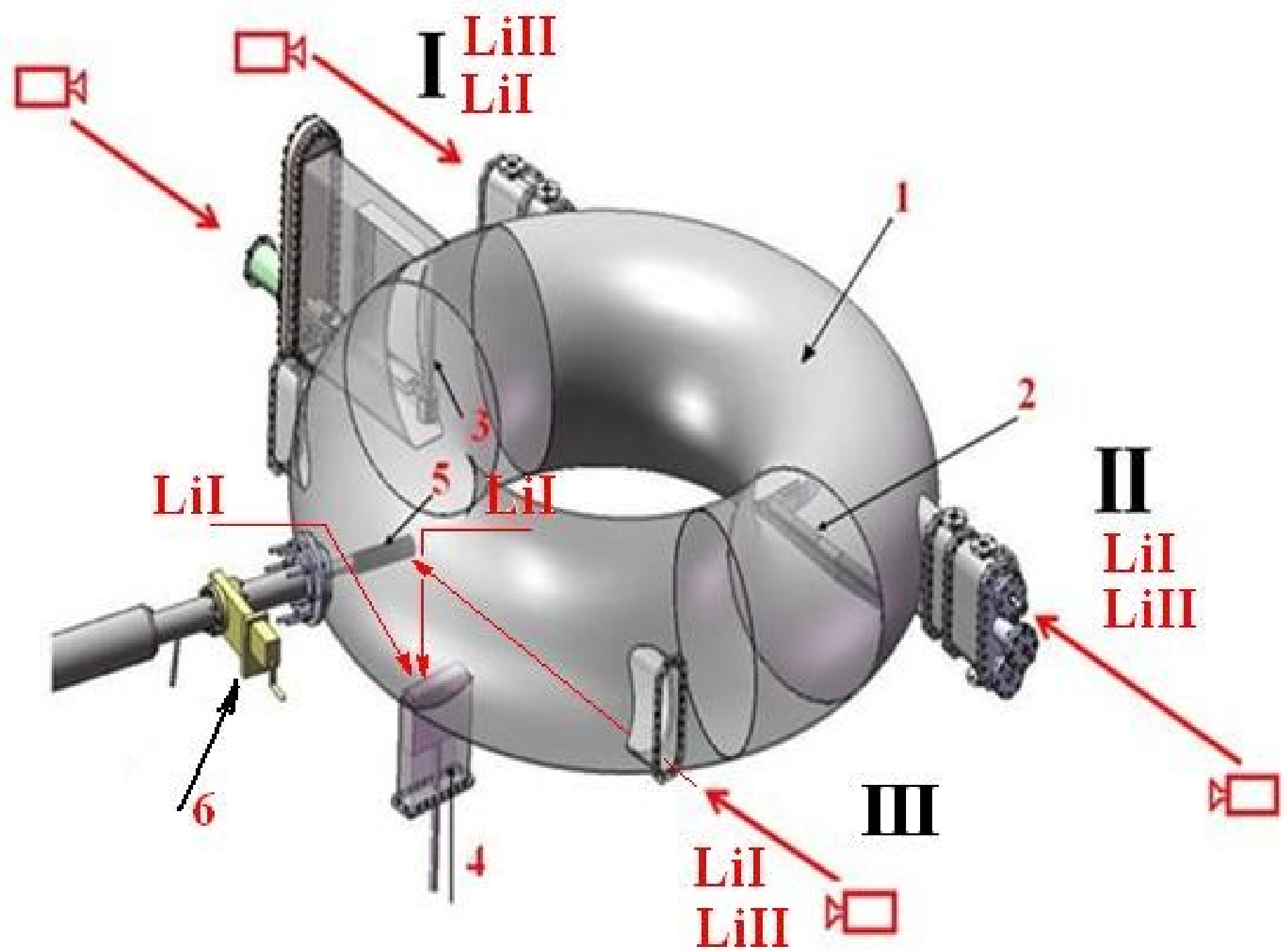


Новое в проблеме удаления водорода и лития из камеры литиевого токамака

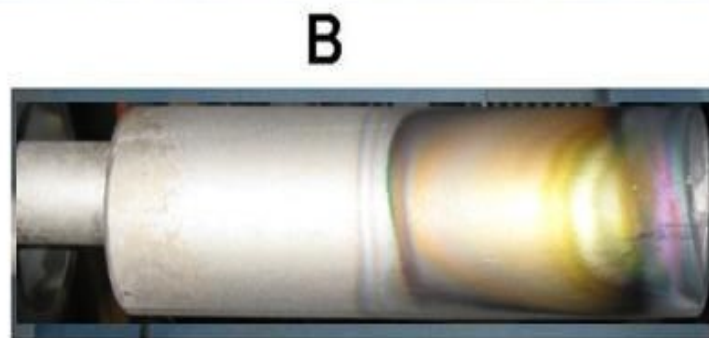
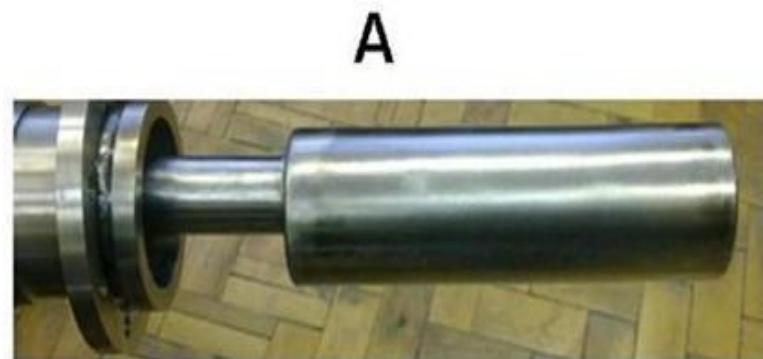
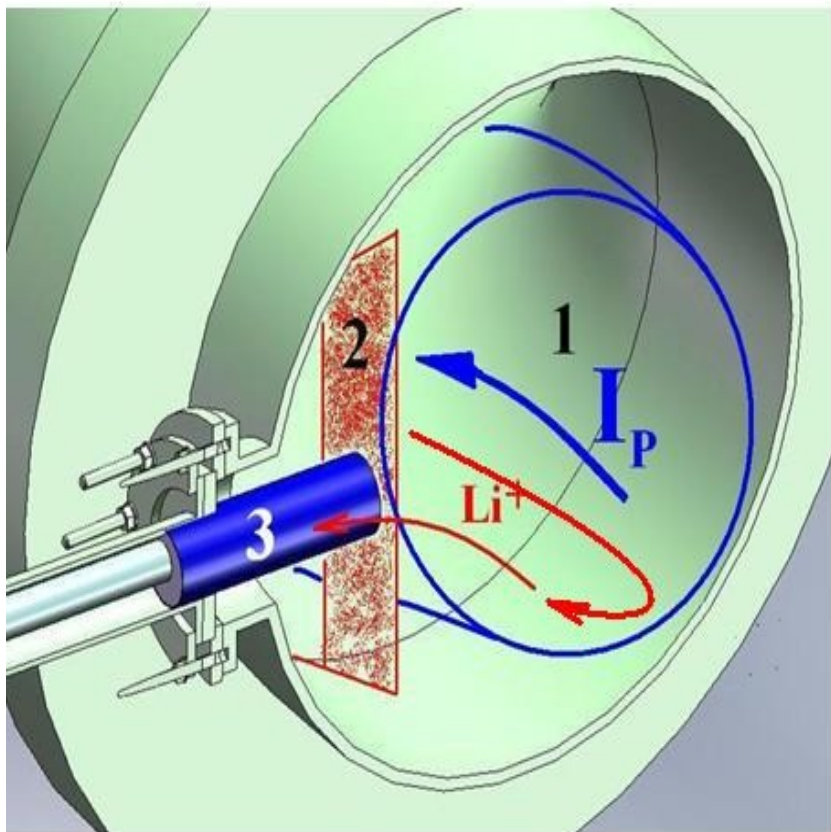
Джурик А.С., ¹Вертков А.В., ¹Жарков М.Ю., Лазарев В.Б., ¹Люблинский И.Е.,
Мирнов С.В., Отрощенко В.Г., Щербак А.Н. (*Троицкий Институт
Инновационных и Термоядерных Исследований, Административный округ
Троицк, Москва, Россия, ¹АО "Красная Звезда", Москва, Россия*)

17.02.16 МУ-3

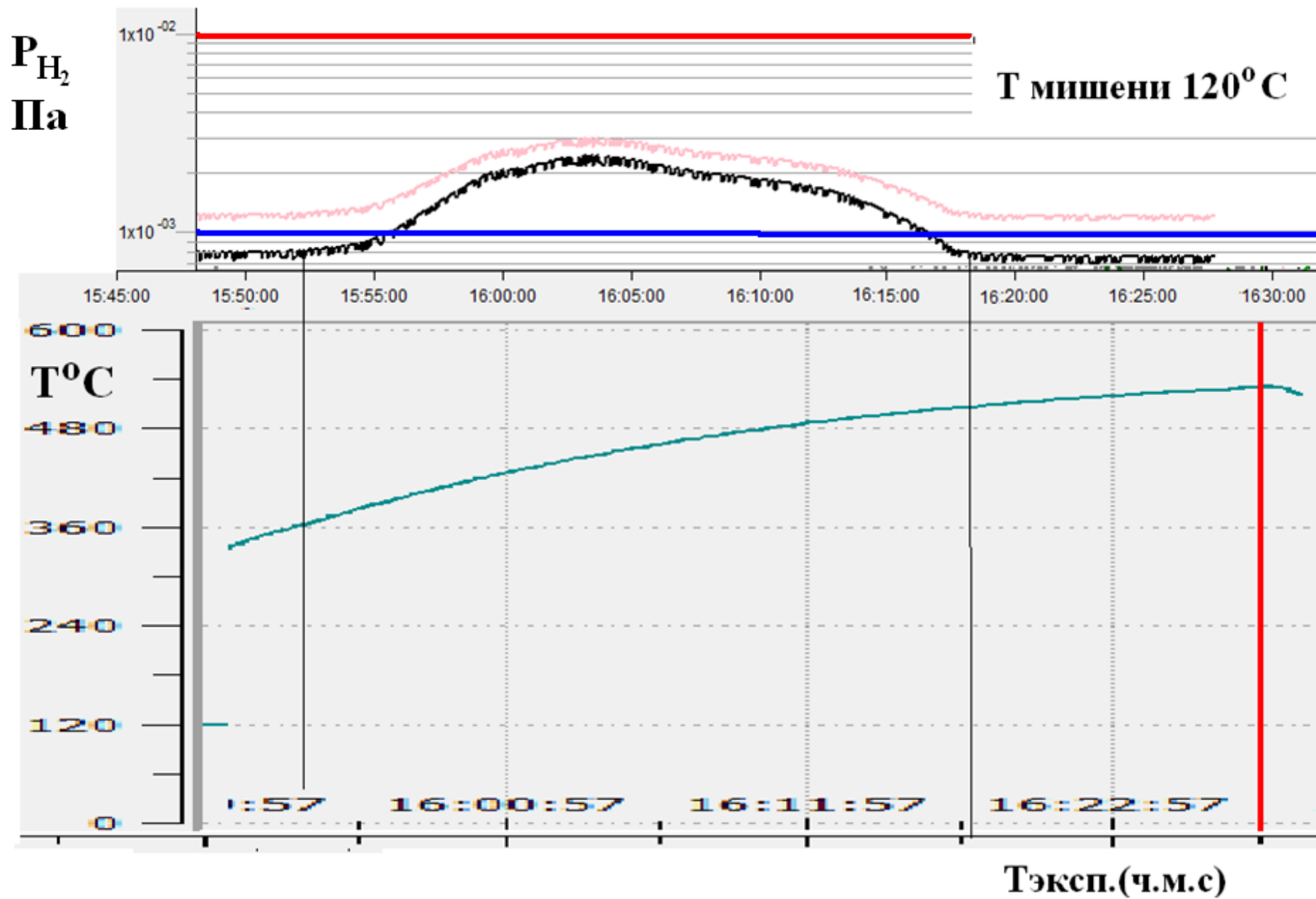
Исследование зависимости сбора лития коллекторной мишенью от
температуры поверхности мишени в системе эмиттер-коллектор на
токамаке Т-11М.



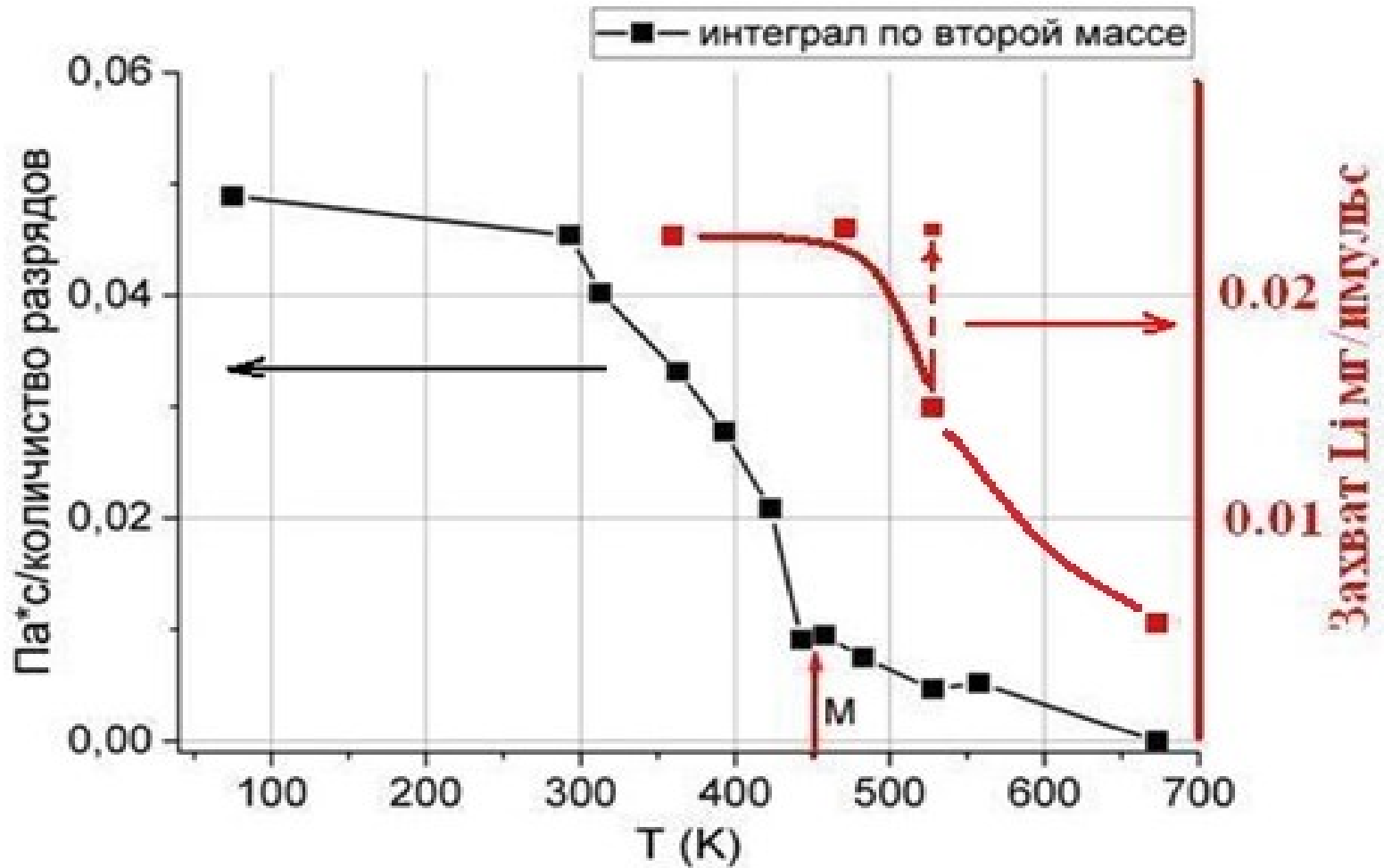
Сбор лития в Т-11М



ТДС спектр выхода водорода из литиизованной мишени



Захват **лития** и **водорода** из плазменного потока в Т-11М (ТРИНИТИ)



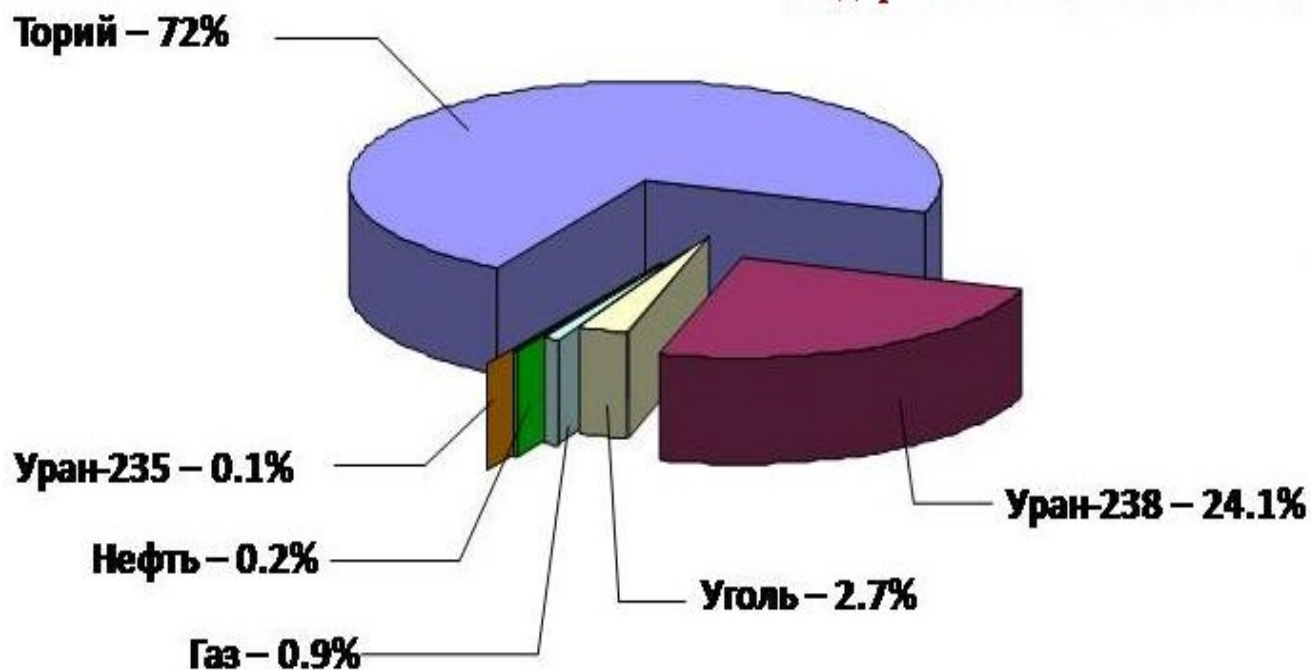
Что мы узнали о токамаках в ходе 55-летнего общения

Таким образом, практика зарубежных сверхпроводящих токамаков отчетливо демонстрирует, что, оставаясь в рамках существующих технологических решений, длительность плазменного процесса в токамаках и, повидимому, в стеллараторах можно будет увеличивать лишь уменьшая энергетическую нагрузку на единицу площади стенки примерно как $(P_H/S)^{-1.7}$, где под P_H правильней понимать часть энергетического потока, которая связана с прямым взаимодействием плазма-стенка. Можно пытаться переизлучать значительную часть энергетического потока за счет некоронального излучения примесей (это делается), но и это не решит проблему стационара. Необходимо научиться выводить из камеры продукты ее эрозии в ходе технологического цикла работы реактора (80% рабочего времени). Это было бы достойной задачей для коллектива Т-15МД.

Стоит ли «ломать копья»?

Относительный энергетический потенциал природных ресурсов России

(Источник: по доказанным ресурсам органического топлива - Бритиш Петролиум "Статистический обзор мировой энергетики 2005", по доказанным ресурсам природного урана 615 тыс. тонн - данные Федерального Агенства РФ по недропользованию)



Спасибо за внимание

Может быть P_H/R ?

