

NATIONAL RESEARCH CENTRE  
KURCHATOV INSTITUTE



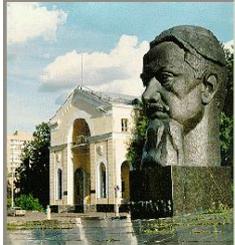
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

# Проблемы материалов первой стенки и дивертора термоядерного реактора типа токамак

**Б.В. Кутеев, Б.А. Гурович, Ю.Е. Титаренко, А.А. Ковалишин**

*НИЦ Курчатовский институт,  
площадь Академика Курчатова 1, 123182 Москва, Россия*

**E-mail : [Kuteev\\_BV@nrcki.ru](mailto:Kuteev_BV@nrcki.ru)**



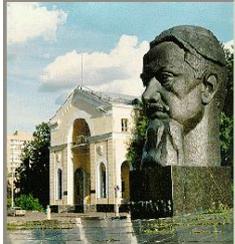
## Введение

- Для реализации программы ГК Росатом РТТН в части сооружения установок на основе токамаков требуются: создание новых материалов, проведение их испытаний в потоках термоядерных нейтронов и сертификация
- Источники нейтронов ДТ-синтеза с энергией 14.1 МэВ с интенсивностью до  $10^{19}$  н/с необходимы для развития инновационных материалов, компонент и базовых технологий демонстрационных установок термоядерного синтеза уровня ДЕМО и гибридных систем синтез-деление (ГССД).
- Важность создания таких источников неоднократно подчеркивалась международным термоядерным сообществом [1,2]
- В докладе обсуждаются современное состояние и перспективы развития материалов и источников термоядерных нейтронов на основе токамаков и гибридных систем в нашей стране и за рубежом

[1] Б.В. Кутеев и др. . Физика плазмы, 2010, том 36, № 4, с. 307–346.

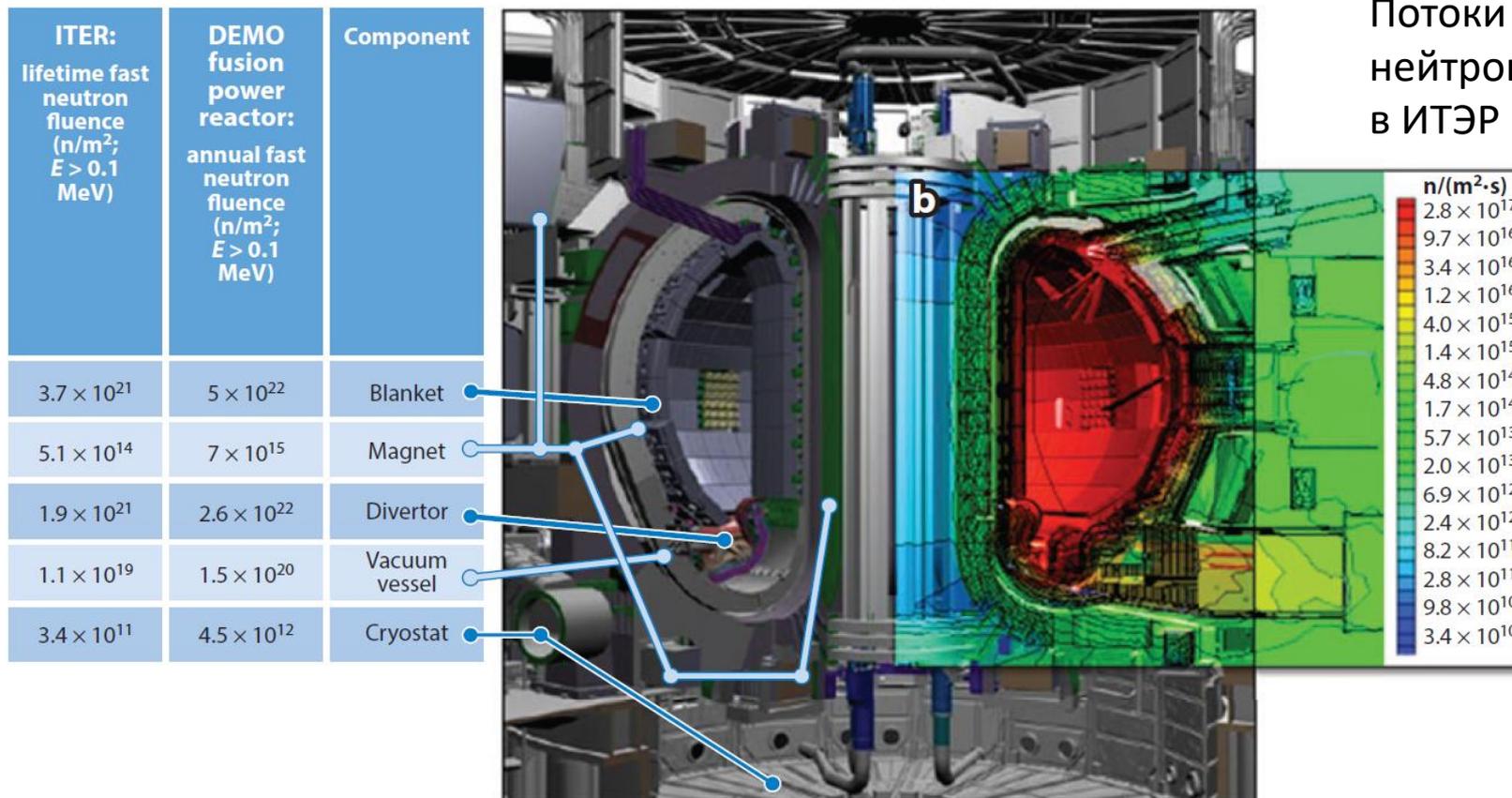
[2] Final Report of the Committee on a Strategic Plan for U.S. Burning Plasma Research.

2018. <https://www.goodreads.com/book/show/43328665-final-report-of-the-committee-on-a-strategic-plan-for-u-s-burning-plasm>

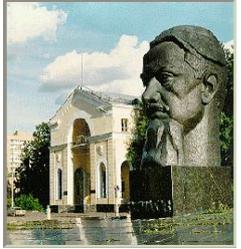


## Zinkle 2014

Потоки  
нейтронов  
в ИТЭР

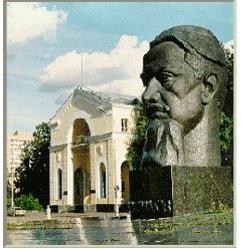


**Figure 1** Нейтронные флуенсы за время эксплуатации для основных компонент ИТЭР и ДЕМО: blanket и первая стенка, магниты, дивертор, камера, криостат

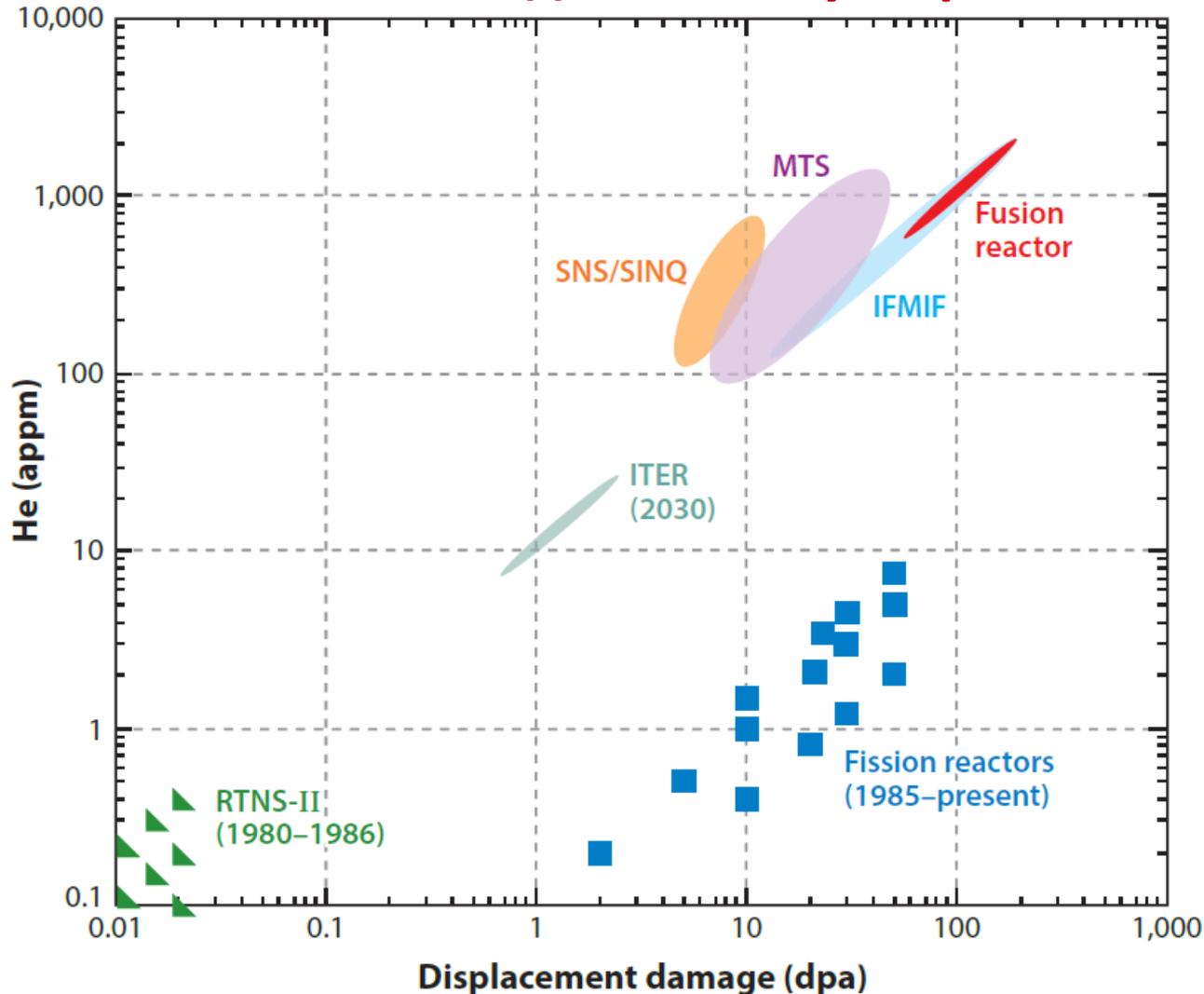


## Проблемы материалов

- В то время как два основных элемента нержавеющей сталей (Fe и Cr) по своей природе обладают пониженной активацией, многие из распространенных легирующих добавок, таких как Ni, Cu, Nb и Mo, производят нежелательные радиологические изотопы после воздействия нейтронов термоядерного реактора D-T.
- Эта ситуация привела исследователей материалов к разработке специально подобранных ферритно-мартенситных сталей с пониженной активацией 9-14%Cr (RAFM) с W (заменяющим Mo), Ta или V (заменяющими Nb).
- Эти стали RAFM удовлетворяют многие требования к производительности для начала эксплуатации демонстрационного термоядерного реактора.
- Однако предел рабочей температуры сталей RAFM в настоящее время составляет  $\approx 550$  °C, что ограничивает общую термодинамическую эффективность электростанции, и эффектов облучения нейтронами D-T синтеза.
- К сожалению, обычные аустенитные стали и высокотемпературные суперсплавы на основе Ni не могут рассматриваться как перспективные из-за высокой активации Ni (наряду с опасениями относительно радиационной стабильности аустенитных сталей и супер-сплавов).
- Zinkle 2014
- Чернов 2022 аустенитная сталь с заменой никеля Ni на марганец Mn  
Уже выплавлена ТПИ и готовится к испытаниям в НИЦ КИ и ВНИИНМ



## Повреждения материалов He(aprt) нейтронами синтеза, деления и ускорительных систем

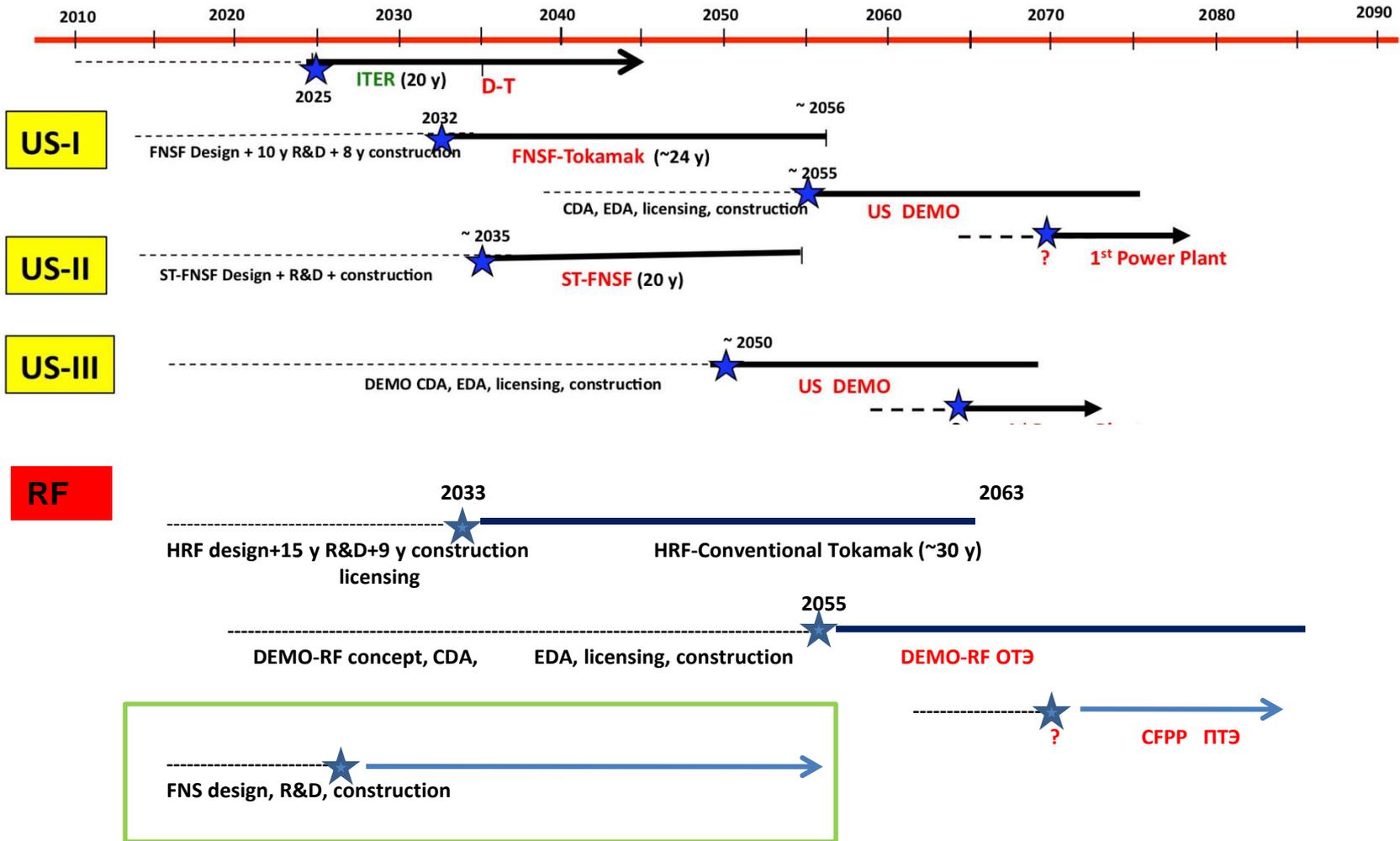


Спектр ядерных реакторов в 100-300 раз мягче, чем в токамаках

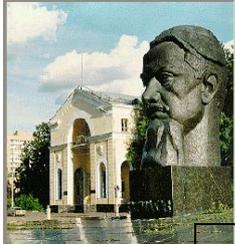
Повреждения в ИТЭР близки к реакторным. Опасных проблем для материалов нет!

Термоядерные источники нейтронов необходимы для Сертификации материалов

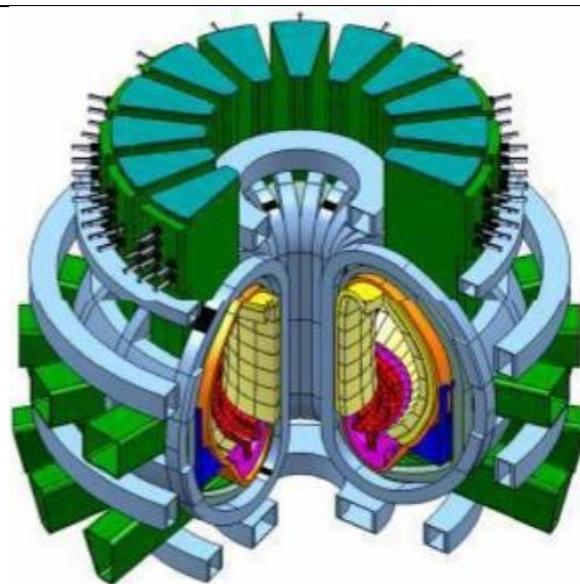
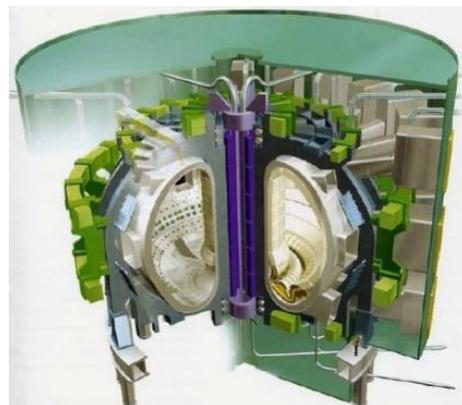
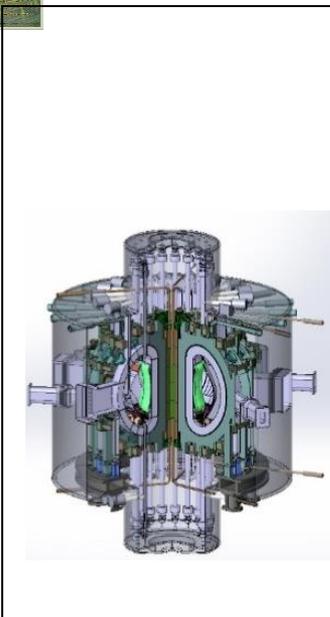
# Fusion Strategies



Обоснование сооружения установок программы УТС и ГССД требует срочного создания источников термоядерных нейтронов для разработки и аттестации материалов и компонент/



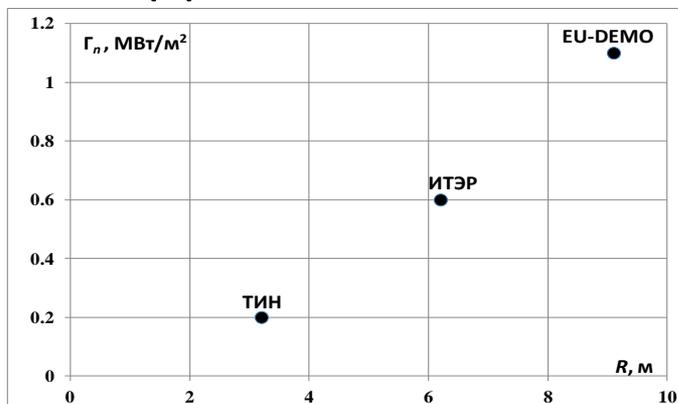
# Программы развития термоядерных и гибридных систем



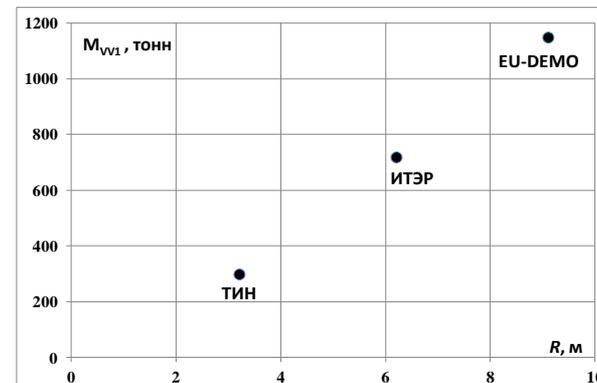
ДЕМО-ТИН 3.2 м

ИТЭР 6.2 м

ДЕМО-РФ 7.8 м

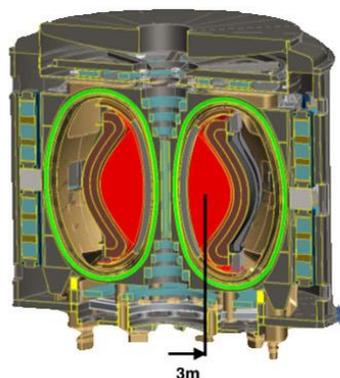


Гибридная ДЕМО-ТИН планирует нейтронную нагрузку в 3 раза меньше чем в ИТЭР и 5.5 раз чем ДЕМО-РФ

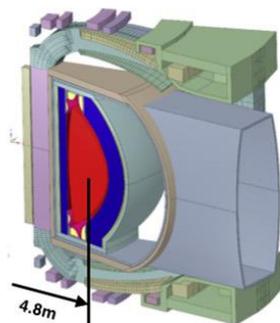


# USA development set of facilities

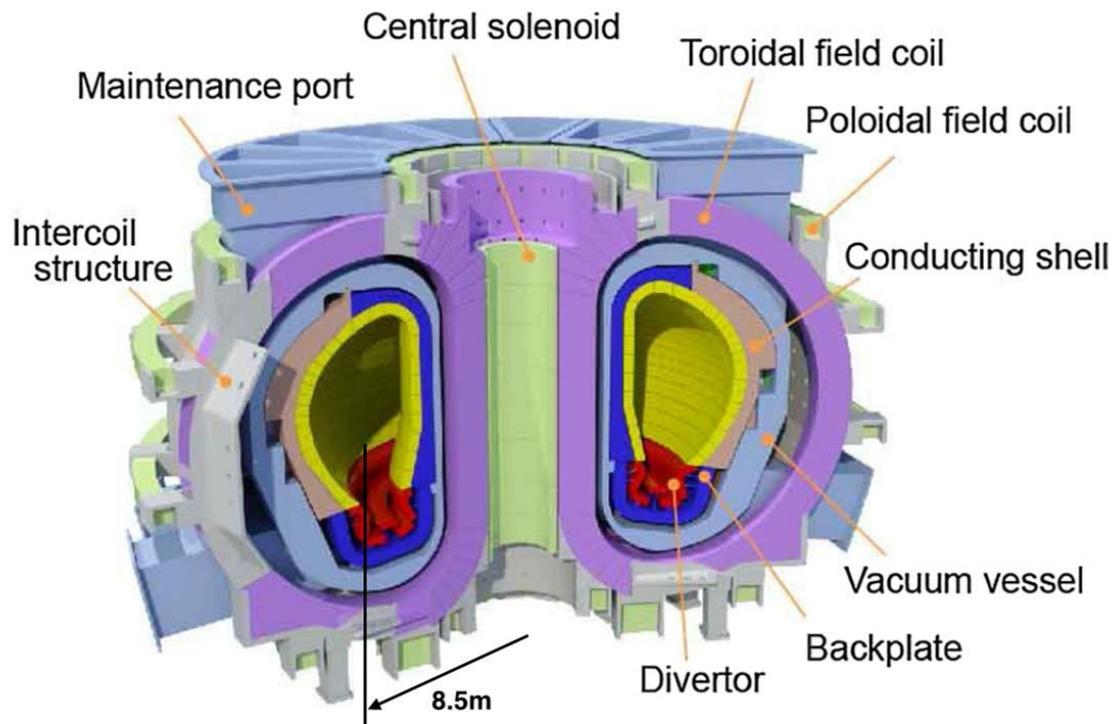
(a) Pilot Plant Design



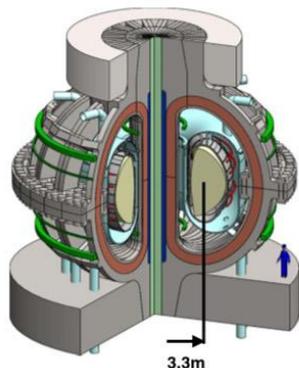
(b) FNSF



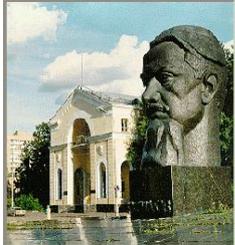
(c) Japanese DEMO Design



(d) MIT ARC Design



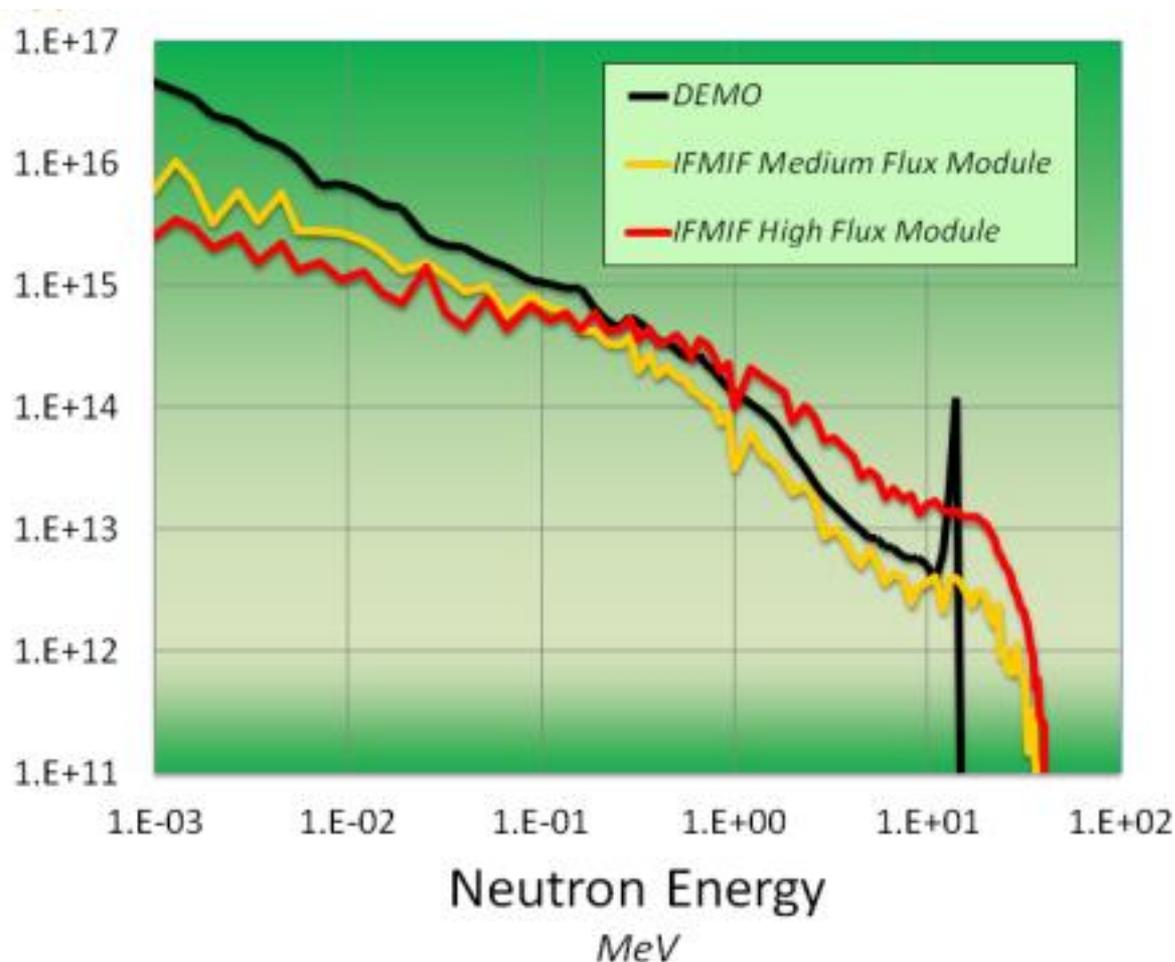
Обращаю внимание на большие зазоры между плазмой и электромагнитной системой, которые должны быть заполнены материалами, снижающими нейтронную и гамма нагрузки на сверхпроводники и изоляторы. Размеры ARC близки к параметрам ДЕМО-ТИН



## Требования к нейтронным источникам для материаловедческих исследований

- **Этапы развития ГССД** соответствуют 3 уровня термоядерной мощности  
3 (ТИН-К), 40 (ДЕМО-ТИН/ГРУ), 500 (ИТЭР) МВт  
и нейтронный выход  
 $1 \times 10^{18}$  n/s,  $10^{19}$  n/s и  $10^{20}$  n/s (последний особо не нужен для материалов)
- **Нейтронный выход**  
 $10^{18}$  n/s – тестирование материалов и компонент  
 $10^{19}$  n/s – управление подкритическими активными зонами энергетически значимого уровня мощности, трансмутация МА и бридинг трития и топливных нуклидов  
 $10^{20}$  n/s – nuclear fuel breeding for thermal and fast reactors
- **Время жизни более 10 лет** необходимо для достижения  
20 dpa and 200 appm по He
- **Повреждения этого уровня открывают новые эффекты деградации свойств конструкционных и функциональных материалов под действием:**
- нейтронов, генерации газов H, D, T, He, изменения химического состава и структуры, дополнительных ядерных реакция на искусственных нуклидах

# Распухание сталей при повреждении нейтронами



Спектры ускорителей втрое жестче.

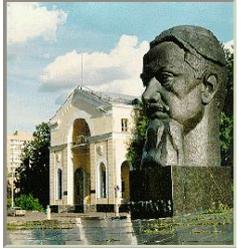
Эффекты, не свойственные УТС

Объем облучения на уровне 1 литра.

Требуются микро-образцы для сертификации на ускорителях

Нейтронный поток в IFMIF до  $10^{18}$  н/сек\*см<sup>2</sup>

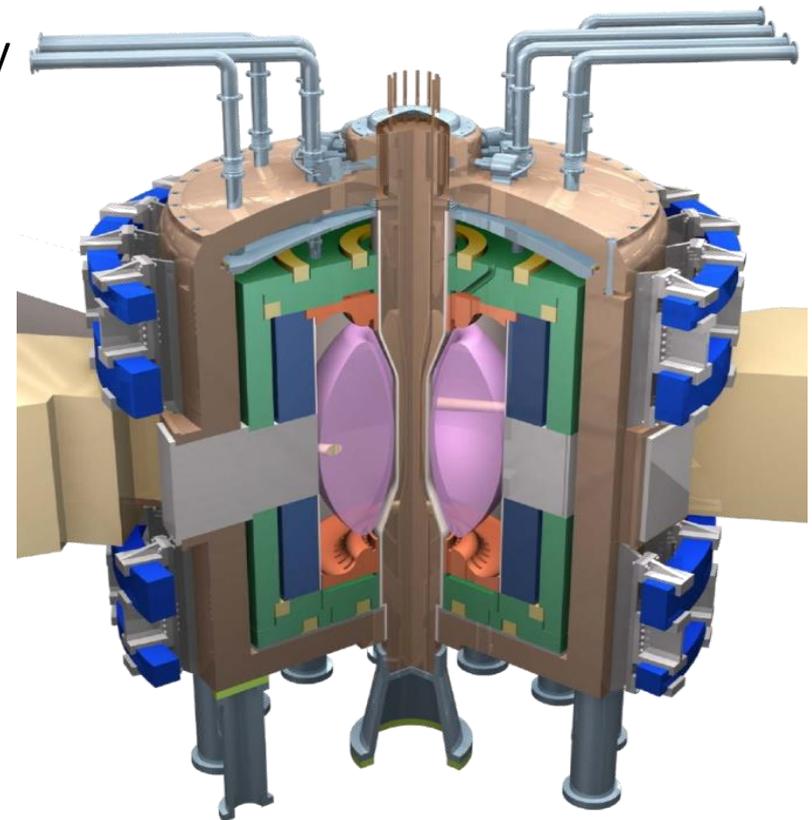
<https://tnenergy.livejournal.com/15900.html>

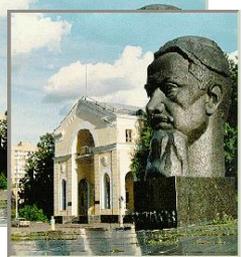


## Разработки источников термоядерных нейтронов в России и мире

# Fusion Nuclear Science Facility

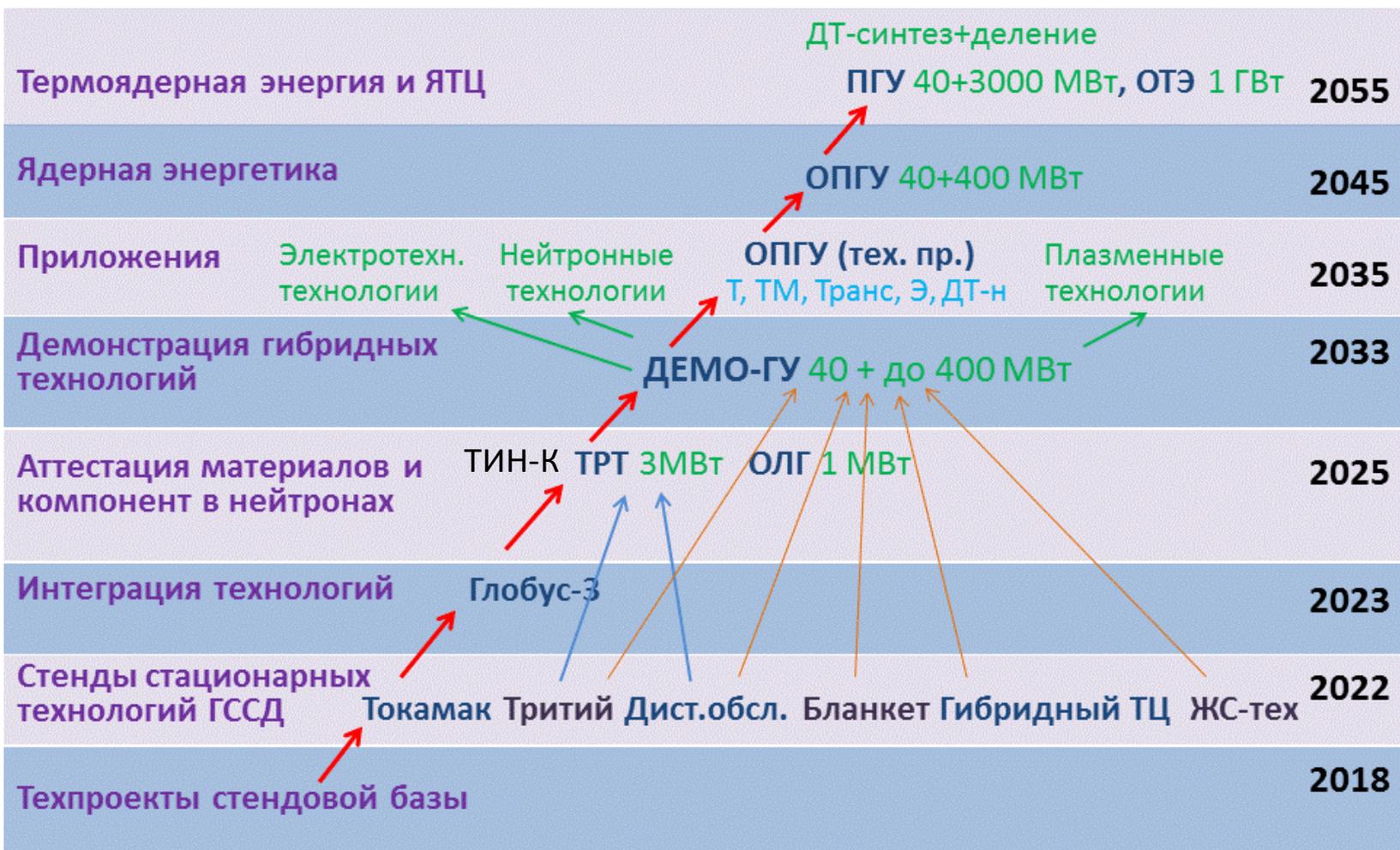
- Mission: Provide an integrated, continuously driven fusion nuclear environment of neutrons that can be used to test multiscale interacting phenomena involving:
  - plasma material interactions
  - tritium fuel cycle
  - power extraction
  - nuclear effects on materials
- 1 MW-yr/m<sup>2</sup> & 10 dpa @ ≤10% duty cycle
- Allows upgrade to CTF (≤6 MW-yr/m<sup>2</sup> & 60 dpa; ≤30%)
- Tests material synergies to 2-6 MW-yr/m<sup>2</sup>, 20-60 dpa





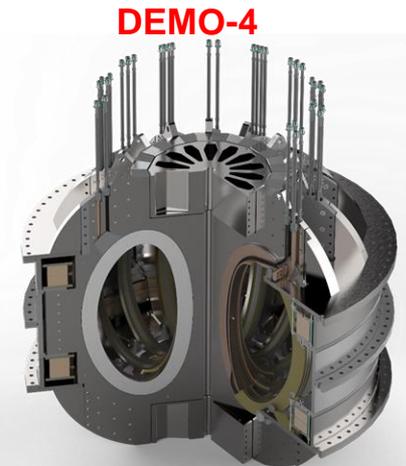
# Дорожная карта УТС и ПТ (Гибрид)

+5 лет

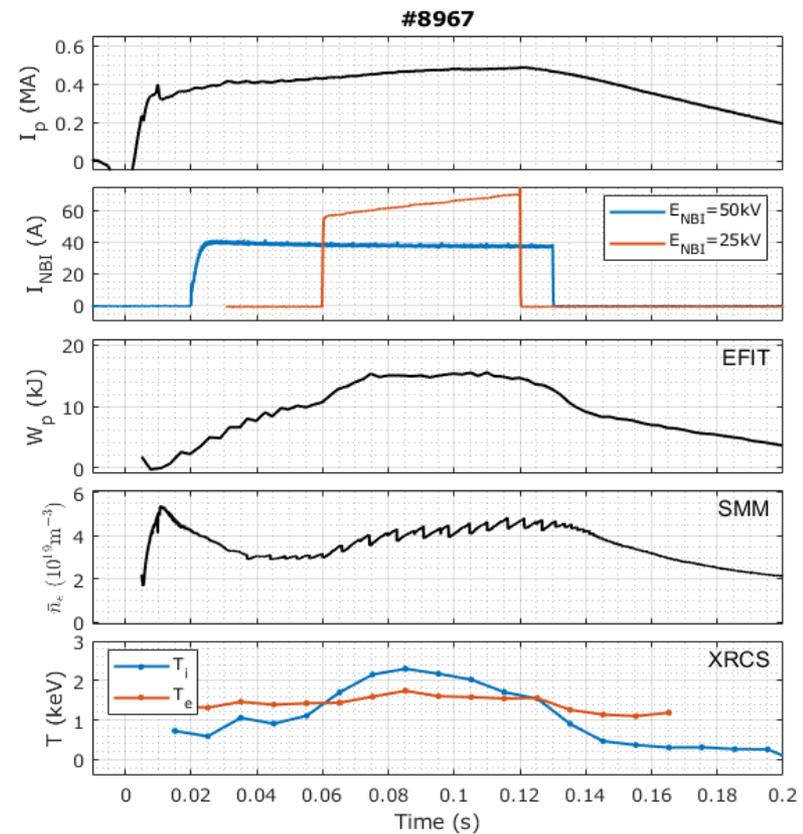
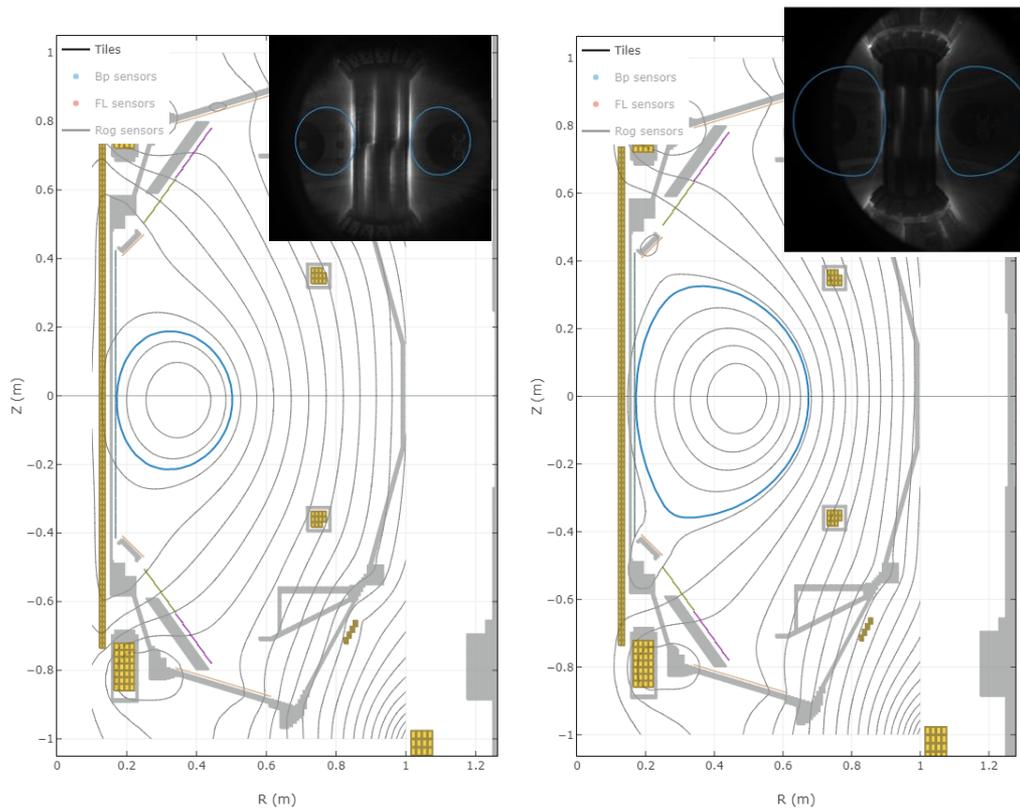


# Токамак Energy Limited (& Inc.) Великобритания активно реализует проект ST-40 (10 000 импульсов длительностью до 0.2 с)

- Established in 2009 with a mission to develop a faster route to fusion energy
- Engineering centre in Milton Park, Oxfordshire, UK
- Over £115M investment with £40M of grants and R&D subsidies
- Team of over 220 and growing fast!
- Operating the ST40 compact high field spherical tokamak
- World leading high temperature superconducting magnet facility



# Typical 09/21 $H^0 \Rightarrow H^+$ pulse



Ведется поиск подходов к длительным разрядам с использованием перемангничивания центрального соленоида

## Recharging of SC during steady-state at ST-40

- If needed, solenoid may be recharged during the pulse using combination of RF CD schemes that were used during ramp-up
  - ST has big advantages on this route – lower inductance, high bootstrap fraction
  - High neoclassical resistivity controversially helps

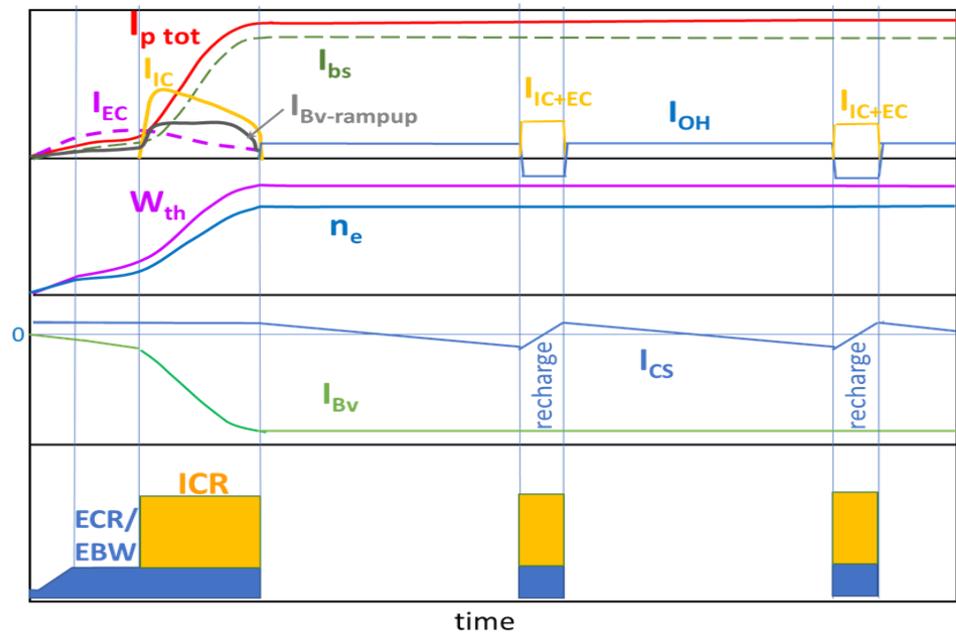
Proposed time sequence:

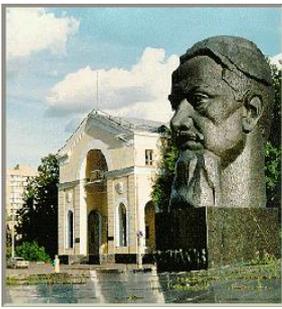
$I_{p\ tot}$  - total plasma current and its components:  $I_{EC}$ ,  $I_{IC}$ ,  $I_{bs}$ , and  $I_{Bv-rampup}$  (not to scale);

$W_{th}$  - plasma thermal energy and  $n_e$  - electron density;

$I_{CS}$  - CS current and  $I_{BV}$  - vertical field coil current;

and auxiliary CD and heating power application periods (schematic).





# Fusion Neutron Applications

## •DT-fusion

commercially available in

-accelerator – solid target version  $10^{11}$ - $10^{13}$  neutron per second and 1 month resource in cw-mode

-plasma focus pulse mode with a similar neutron yield

next future (DOE supported)

-accelerator – gas target version (G. Kulcinski)  $10^{14}$  n/s

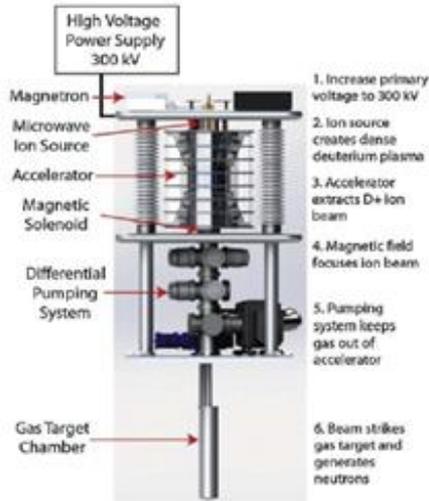


Fig. 4. Schematic of SHINE neutron generator prototype.

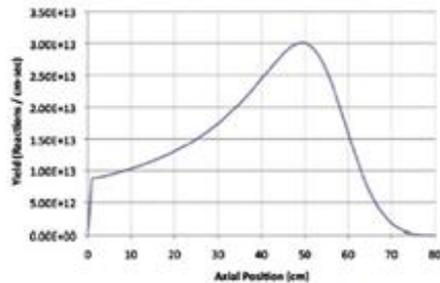
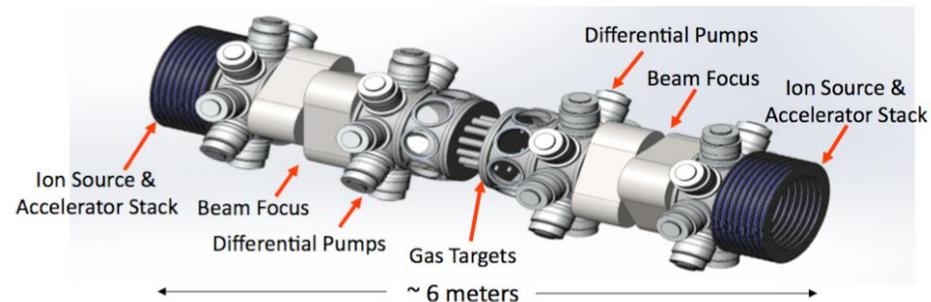


Fig. 5. Calculated neutron production rate for D<sup>+</sup> stopping in 4 kPa (30 Torr) tritium target gas [4-7].

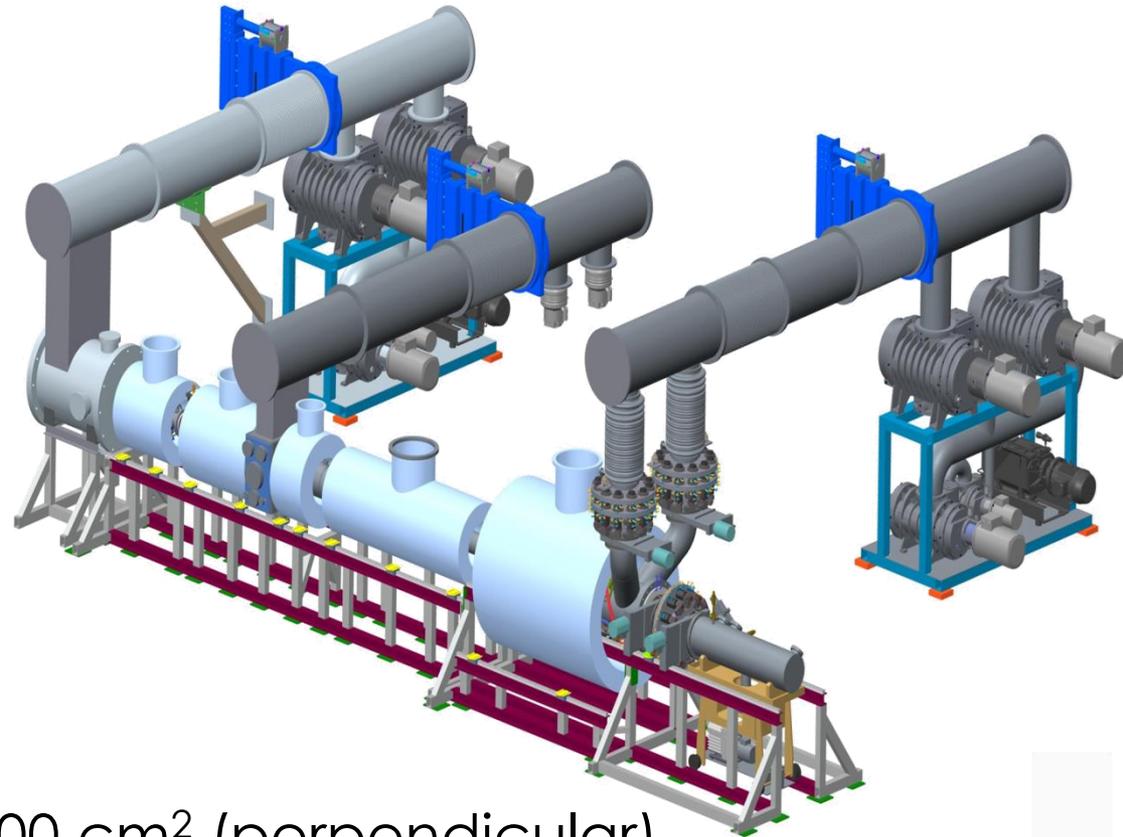
The DT-fusion neutrons may control subcritical system. 110 W of DT-fusion power drives 75 kW fission for  $^{99m}\text{Tc}$  production, which is used in 50,000 medical procedures per day in USA



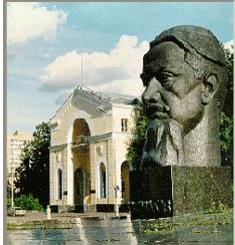
# MPEX Overview

FUNFI3, 2018  
Arnold  
Lumsdaine,

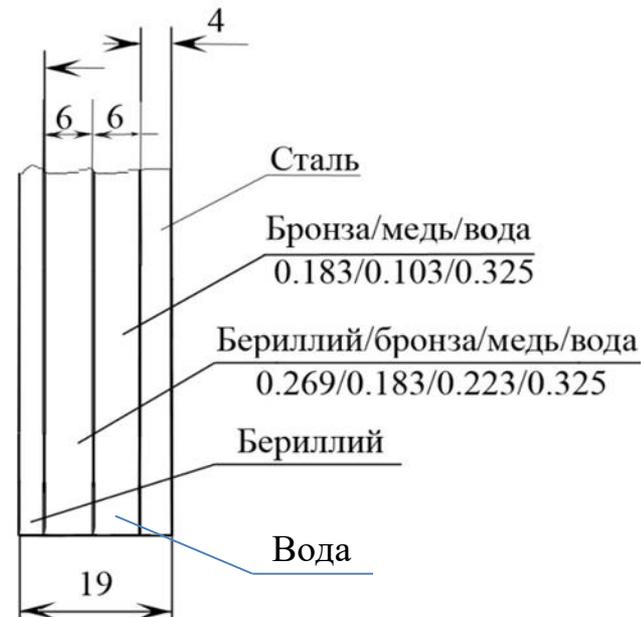
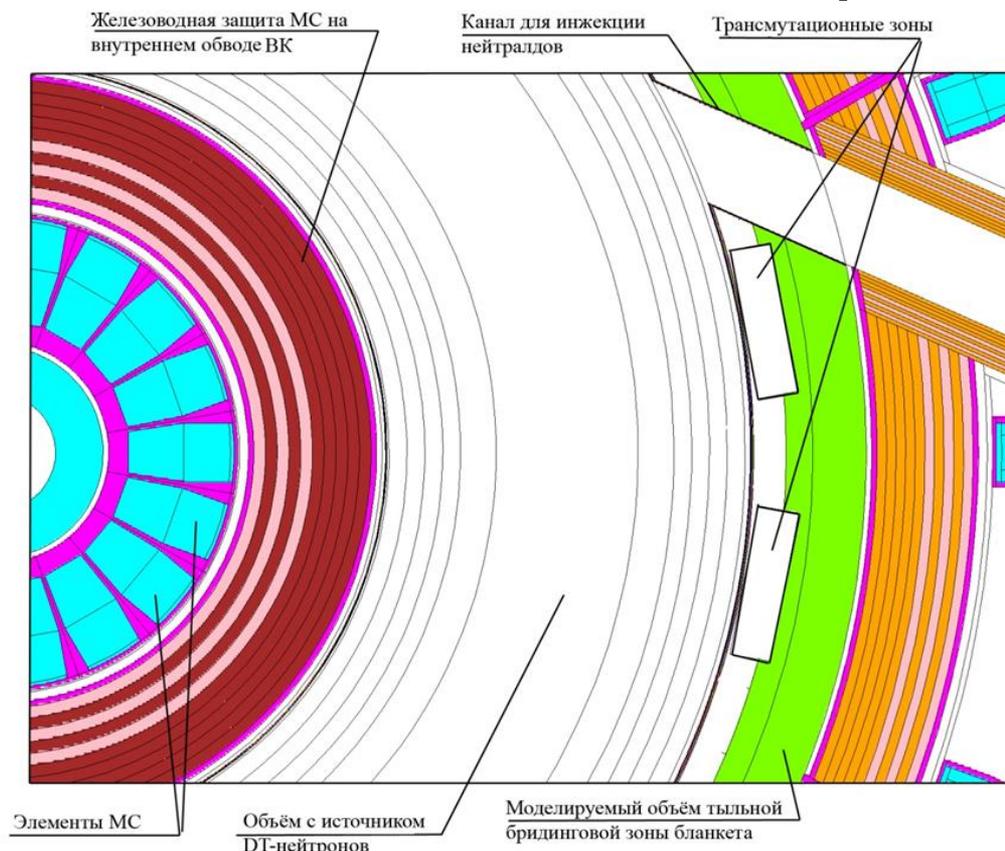
- RF plasma source
- Ion fluxes  $\Gamma > 10^{23} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$
- Power flux on target  $10 \text{ MW} / \text{m}^2$
- Normal or inclined target
- $B_{\text{target}} > 1 \text{ T}$
- Steady state  $> 10^6 \text{ s}$
- Large plasma area  $\sim 100 \text{ cm}^2$  (perpendicular)
- Capable of handling neutron irradiated samples (low activation)



Для исследований PSI создаются системы для тестирования облученных материалов !



# Проблемы материалов для ДЕМО-ТИН и варианты решения



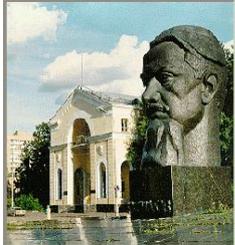
Структура первой стенки

Состав топлива

Радионуклид	Массовое содержание, %
$^{237}\text{Np}$	30.0
$^{241}\text{Am}$	65.0
$^{242\text{m}}\text{Am}$	0.06
$^{243}\text{Am}$	4.5
$^{243}\text{Cm}$	0.02
$^{244}\text{Cm}$	0.42

Основные нейтронные нагрузки падают на первую стенку 2 см, активную зону 16 см, ПС 60-70 см и blankets 40 см.

Органическая изоляция ЭМС – полиимид ( $\gamma$ -устойчивая)

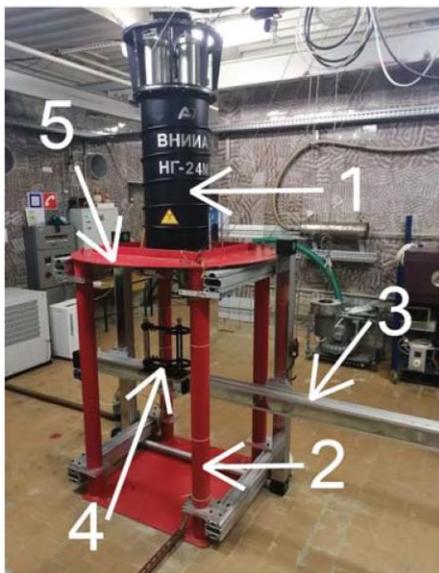


## Проблемы материалов для ДЕМО-ТИН и варианты решения

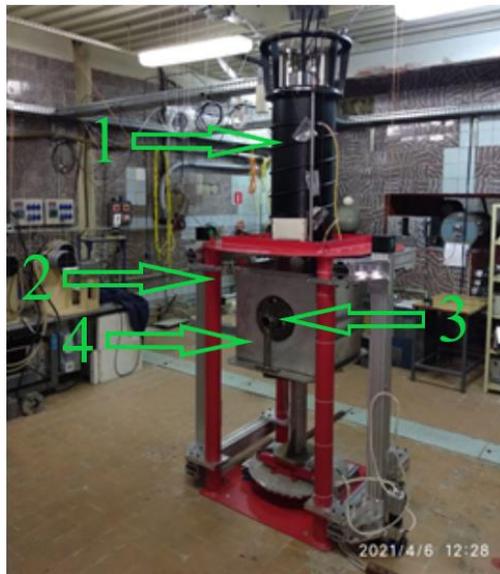
Материал	Состав	Масса	Нагрузки-н	-мех-е	Т,К средн./пик
Первая стенка	Be/CuCrZr/FMS+	35 т	0.2 МВт/м <sup>2</sup>	300 МПа	350-450/720
Вакуумная камера	SS, SS+B	300 т	0.2 МВт/м <sup>2</sup>	300 МПа	350/475
Активная зона	FMS, V alloys	10 т	0.2 МВт/м <sup>2</sup>	200 МПа	563/595
Бланкет	V	50 т	0.2 МВт/м <sup>2</sup>	200 МПа	563/595
Теплоноситель	H <sub>2</sub> O/S-CO <sub>2</sub> +?	50/25 т	0.2+ МВт/м <sup>2</sup>	20МПа	563/595
Изоляторы в ВК	MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiC/SiC	1 т	0.1 МВт/м <sup>2</sup>	300 МПа	350/475
Тритий воспроизводящий	Li-соль, сплав	50 т	0.1 МВт/м <sup>2</sup>	-	563/595
Топливо подкритической АЗ	МА	20 т	0.1 МВт/м <sup>2</sup>	-	600/650
Защитные покрытия	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ...	100 кг	0.2 МВт/м <sup>2</sup>	300 МПа	563/595
Жидкие пленки и КПС	Li/LiW	5 кг/10 т	0.2 МВт/м <sup>2</sup>	-	500/700
Жидкосолевые смеси	FLiBe+Th,U	100 т	0.1 МВт/м <sup>2</sup>	-	800/850
Радиационная защита	SS+H <sub>2</sub> O, WC, H&B, +	10 т	0.2 МВт/м <sup>2</sup>	-	350/475
Высокопрочные при 4К	SS,FMS,	100 т	20 Вт/м <sup>2</sup>	>1000 МПа	4/5
Сверхпроводники	НТСП, ВТСП	50 т	20 Вт/м <sup>2</sup>	1000 МПа	4/5
Изоляторы сверхпроводников	Полиимид	1 т	50 мкВт/м <sup>3</sup>	-	4/5

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ БЛАНКЕТОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

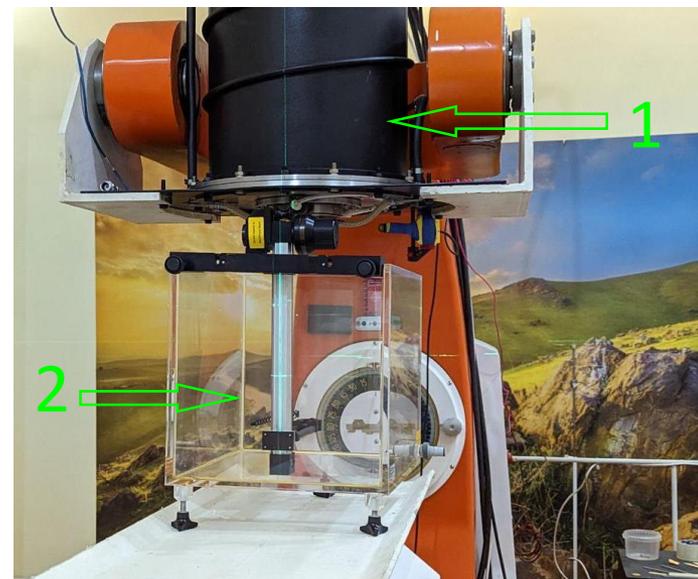
Эксперименты двух типов: оценка библиотек и наработка интегральных данных



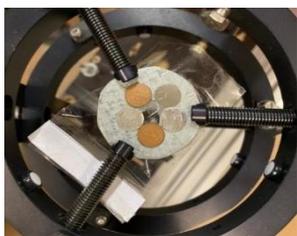
Измерения скоростей реакций:  
 1 – НГ-24М; 2 – стойка;  
 3 – подставка;  
 4 – горизонтальная направляющая;  
 5 – ИК КНТ 54-2-1



Микромодель солевого blankets:  
 1 – НГ-24М, 2 – стойка,  
 3 – микромодель солевого blankets,  
 4 – бак с замедлителем



Положение экспериментальных образцов при облучении



Пенал с блоками для облучения экспериментальных образцов



# БЕНЧМАРК ЭКСПЕРИМЕНТЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ БИБЛИОТЕК ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ БЛАНКЕТОВ

Измерены 56 скоростей  $(n,2n)$ ,  $(n,p)$ ,  $(n,pn)$ ,  $(n,\alpha)$ ,  $(n,n'\gamma)$  и  $(n,\gamma)$  реакций в 15 тестовых образцах, как природного, так и высокообогащенного состава:  $^{nat}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{nat}\text{Ti}$ ,  $^{nat}\text{Fe}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{nat}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Cu}(99.5\%)$ ,  $^{65}\text{Cu}(99.7\%)$ ,  $^{64}\text{Zn}(99.4\%)$ ,  $^{nat}\text{Zr}$ ,  $^{93}\text{Nb}$ ,  $^{nat}\text{Cd}$ ,  $^{nat}\text{In}$ ,  $^{169}\text{Tm}$ ,  $^{197}\text{Au}$ . Выполнено моделирование полученных результатов с использованием программ MCNP5 и KIR2 с различными библиотеками ядерных данных (JEFF-3.2, -3.3; JENDL-4.0; ENDF/B-VII.0, -VII.1, -VIII.0; РОСФОНД-2010; FENDL-3.0; TENDL-2019, IRDFF-II).

Parameter	MCNP5				KIR2			
	$N_t/N_c$	$\bar{F}$	$\Delta(\bar{F})$	$\langle F \rangle$	$N_t/N_c$	$\bar{F}$	$\Delta(\bar{F})$	$\langle F \rangle$
JEFF-3.2	56/37	0.92	2.03	2.04	56/37	0.91	2.03	2.04
JEFF-3.3	56/35	0.96	2.18	2.19	56/37	0.95	2.14	2.14
JENDL-4.0	56/37	1.05	1.72	1.73	56/37	1.04	1.74	1.74
ENDF/B-VII.0	56/37	1.01	1.48	1.48	56/35	0.99	1.51	1.51
ENDF/B-VII.1	56/37	1.01	1.46	1.46	56/37	1.00	1.47	1.47
ENDF/B-VIII.0	56/37	0.99	1.46	1.46	56/37	0.99	1.47	1.47
ROSFOND-2010	56/35	1.01	1.49	1.49	56/35	1.00	1.51	1.51
FENDL-3.0	56/35	0.98	1.44	1.44	56/35	0.95	1.47	1.47
TENDL-2019	56/37	1.01	1.63	1.63	56/37	1.01	1.65	1.65
IRDFF-II	56/26	0.99	1.18	1.18	56/26	0.95	1.26	1.27

$$\bar{F} = 10^{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \log \left( \frac{RR_{calc_i}^*}{RR_{exp_i}} \right) \right)}$$

$$\Delta(\bar{F}) = 10^\alpha$$

$$\alpha = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \log \left( \frac{RR_{calc_i}^*}{RR_{exp_i}} \right) - \log(\bar{F}) \right]^2 \right)^{1/2}$$

$$\langle F \rangle = 10^{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \log \left( \frac{RR_{calc_i}^*}{RR_{exp_i}} \right) \right]^2 \right)^{1/2}}$$

$$\langle F \rangle = 10^{\left( [\log(\Delta(\bar{F}))]^2 + [\log(\bar{F})]^2 \right)^{1/2}}$$



Yu. E. Titarenko et. al., Benchmark Experiments for Verification of Nuclear Data Libraries for Designing Fusion Blankets

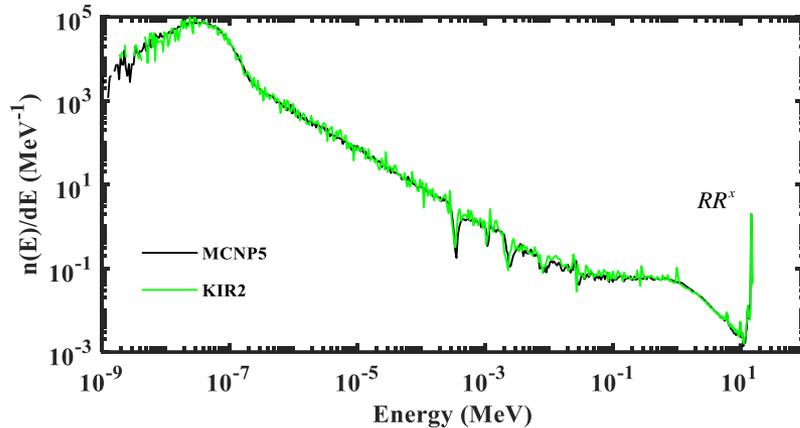
FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY · VOLUME 78 · 549–572, OCTOBER 2022, © 2022 American Nuclear Society  
DOI: <https://doi.org/10.1080/15361055.2022.2076999>

Наилучшая предсказательная способность у библиотек, отмеченных красным цветом

# БЕНЧМАРК ЭКСПЕРИМЕНТЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ БИБЛИОТЕК ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ, ИСПОЛЗУЕМЫХ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ БЛАНКЕТОВ

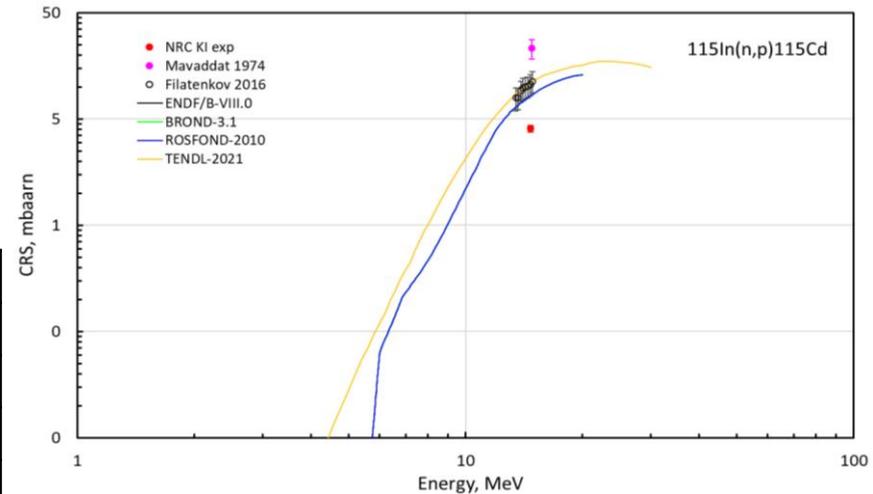
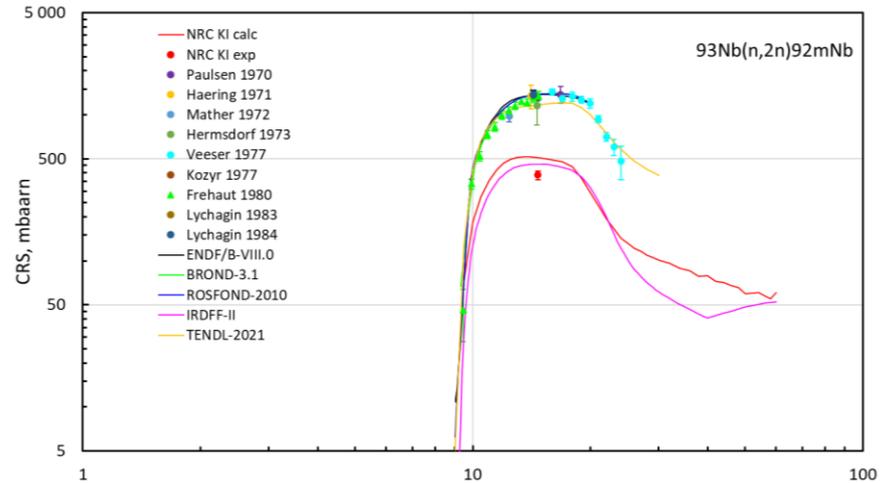
$$\sigma^x(E) = \frac{RR^x}{\Phi} \times 10^{-27}$$

- $\sigma^x(E)$  – сечение ядерной реакции при энергии E  
 $\Phi$  – плотность потока нейтронов ( $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ );  
 $RR^x$  – измеренная скорость реакции,  $\text{с}^{-1}$



Расчетные (в диапазоне  $1 \cdot 10^{-9}$  – 15,2 МэВ) спектры нейтронов в месте облучения экспериментальных образцов (10,3 см от нижней поверхности нейтронной трубки)

Область энергии, МэВ	Содержание нейтронов в области, %
$1 \cdot 10^{-8}$ - $3 \cdot 10^{-7}$ (Тепловая)	0.6
$3 \cdot 10^{-7}$ - 0.01 (Ферми)	1.4
0.01 - 12 (Быстрая)	15
12-16 (ДТ)	83



При анализе современных библиотек выясняется, что предсказательная способность программ отличается до 2 раз.

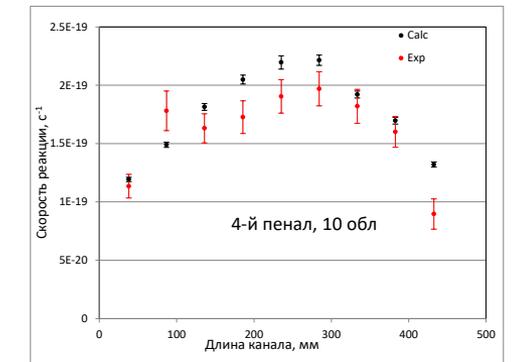
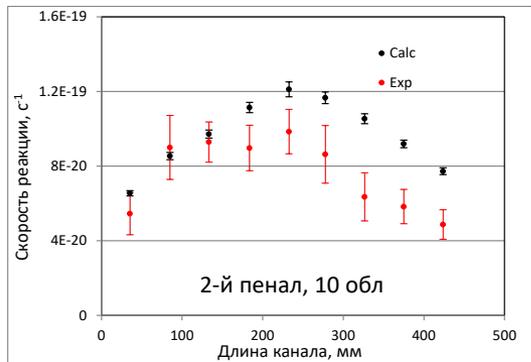
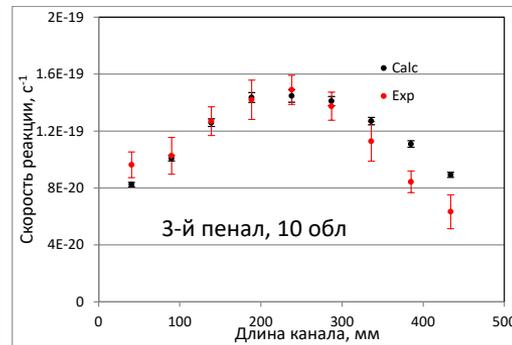
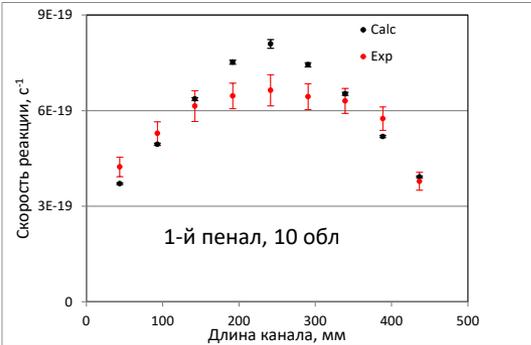
# БЕНЧМАРК ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МИКРОМОДЕЛЬЮ БЛАНКЕТА ТИИ НА ОСНОВЕ СОЛЕЙ $0.52\text{NaF}+0.48\text{ZrF}_4$

## Характеристики плава в солевой ванне

	Масса (г)	Объем (мл)	Плотность ( $\text{г}/\text{см}^3$ )	Содержание элементов, (масс. %)			
				Zr	F	Na	
Солевая ванна	$63650 \pm 100$	$17296 \pm 5$	3.68	42.67	44.71	11.99	$0.522\text{NaF}+0.478\text{ZrF}_4$
Центральная вставка	$1680 \pm 5$	$493 \pm 5$	3.41	42.51	44.52	11.46	$0.517\text{NaF}+0.478\text{ZrF}_4$

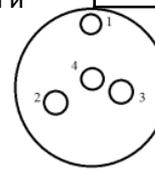
## Сравнение экспериментов с расчетами

Параметр	MCNP5			
	$N_t/N_c$	$F$	$\Delta(\bar{F})$	$\langle F \rangle$
1-ый пенал	9/9	0.89	1.13	1.18
2-ой пенал	9/9	0.70	1.22	1.50
3-ий пенал	9/9	0.86	1.20	1.26
4-ый пенал	9/9	0.87	1.18	1.24
2-ой пенал	9/9	0.78	1.13	1.32
3-ий пенал	9/9	0.78	1.27	1.41
1-ый пенал	9/9	0.82	1.14	1.26
4-ый пенал	9/9	0.79	1.12	1.31
3-ий пенал	9/9	2.03	2.78	3.48
1-ый пенал	9/9	0.80	1.09	1.27
2-ой пенал	9/9	0.74	1.65	1.80
4-ый пенал	9/9	0.85	1.05	1.18



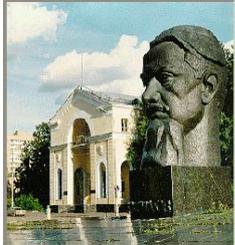
Экспериментальные и расчетные распределения скоростей реакций в экспериментальных каналах солевого покрова при расположении канала радиусом 9,65 см на расстоянии 23,55 см от нижней целевой плоскости генератора НГ-24М и заполнении внешнего бака с водой.

Справа схематически указаны номера каналов и их положение в бланкете.



Yu.E. Titarenko, *et. al.*, Benchmark experiments with FNS blanket based on  $0.52\text{NaF}+0.48\text{ZrF}_4$  salt melt  
Report submitted to 15<sup>th</sup> International Symposium of Fusion Nuclear Technology, China, Hefei, 23-28.04.2023

Наблюдается расхождение между экспериментальными и расчетными данными, которое достигает 3,5. Причины будут выясняться в процессе дальнейших исследований.



## Заключение

- Исследования материалов формируют важное направление НИОКР по развитию мировым научным сообществом термоядерных и гибридных систем, а также их базовых технологий.
- Взаимодействие плазмы с облученными материалами и компактные нейтронные источники -современный тренд исследований и разработок.
- Спектральные характеристики НИ и потоки более  $0.2 \text{ МВт/м}^2$  достижимы в течение 7-10 лет при немедленном начале работ. Уровень  $1 \text{ МВт/м}^2 > 2035$ .
- При реализации длительных без-индукционных ДТ-разрядов компактные токамаки способны обеспечить развитие ГССД уровня ГРУ к 2030 году и ДЕМО к 2040 году.
- НИ на основе плазменно-пучкового разряда - перспективная система, если будут решены проблемы работы с тритием. Система реальна к 2030 году.
- Успешная реализация программы УТС и ПТ в РФ в области материалов потребует не только создания НИ, но и эффективной координации всех работ.
- Важность задачи развития и аттестации материалов требует соответствующей коррекции действующей РТТН.
- Существенный вклад в программу РТТН должны дать также исследования, формирующие базы данных о сечениях ядерных реакций и свойствах материалов.