



**РОСАТОМ**



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

# Радиационное материаловедение

Докладчик:  
Научный руководитель по электрофизическому  
блоку АО «Наука и инновации»  
В.Д. Рисованый

Москва

Июнь 2015

I. Вступление

II. Актуальность и практическая значимость работ в области радиационного материаловедения

III. Рынок реакторных исследований и перспективы его развития

IV. Экспериментальная база БУИ РОСАТОМа для проведения НИОКР в области радиационного материаловедения

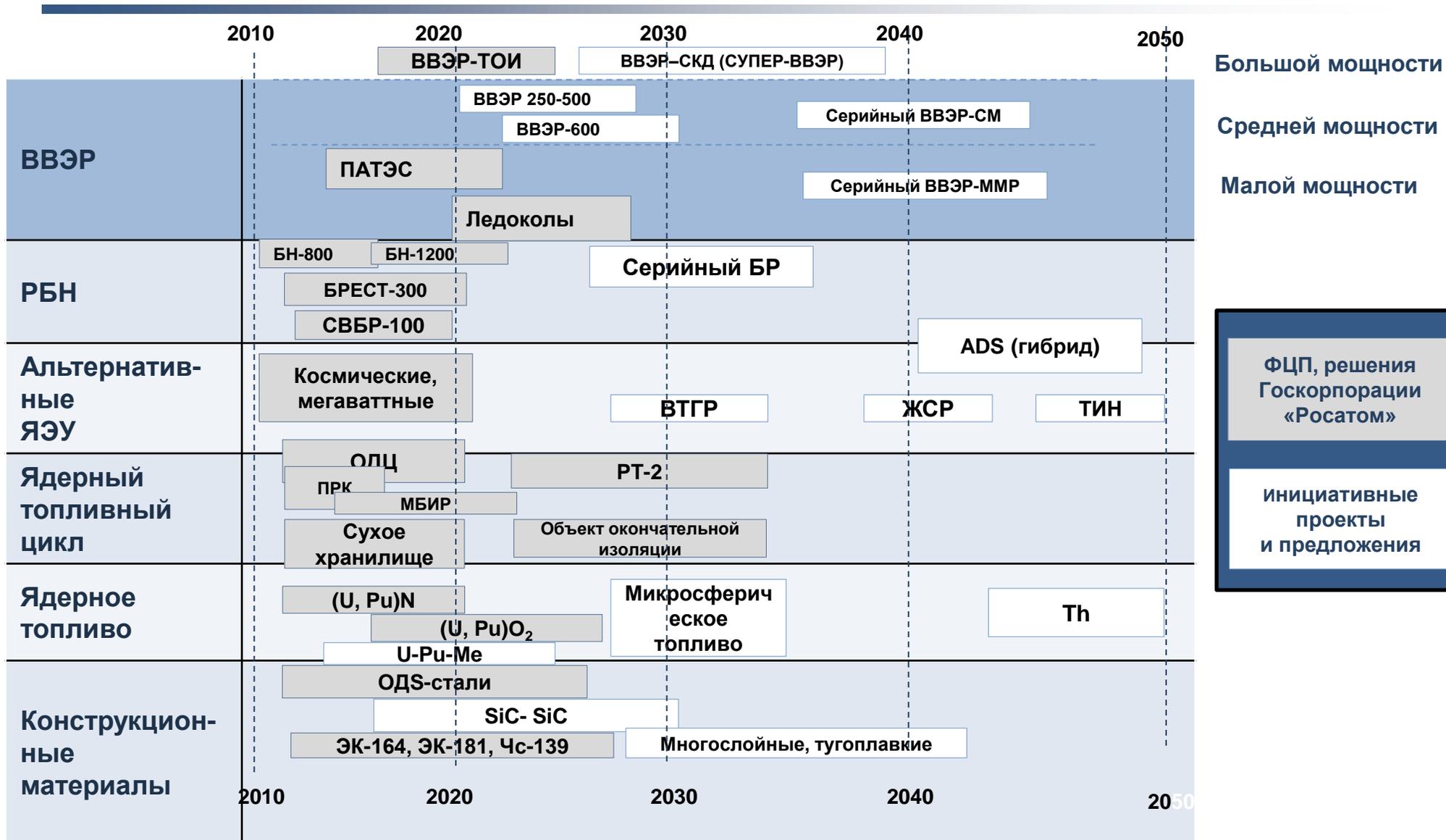
V. Объекты и направления исследований

- ядерное топливо,
- конструкционные и поглощающие материалы

VI. Физическое моделирование радиационной стойкости

VII. Заключение

# Дорожная карта освоения ядерных технологий в России (2015-2050гг)



ФЦП, решения Госкорпорации «Росатом»

инициативные проекты и предложения

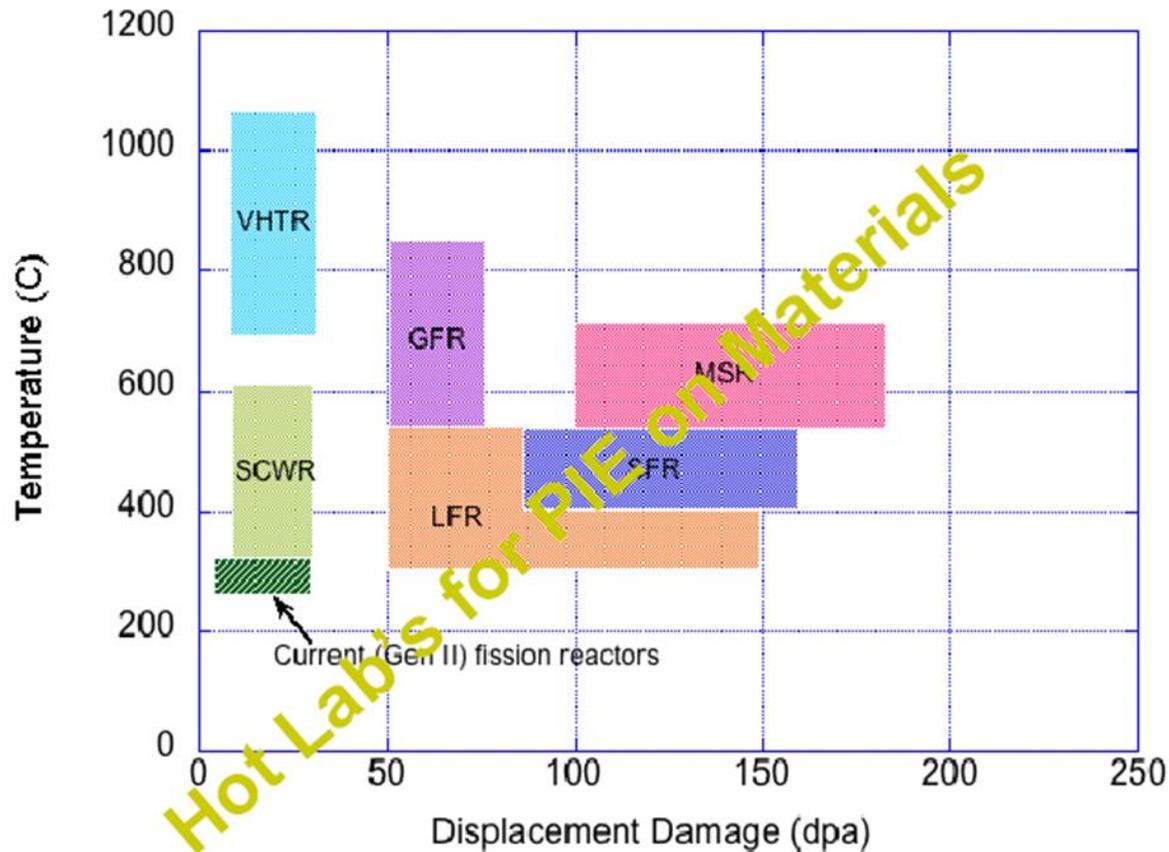
# Предполагаемые материалы реакторов IV-го поколения [1]

Реактор	Теплоноситель	Максимальная температура, °С	Материалы элементов активных зон		
			Топливо	Оболочка	Поглотитель
GFR быстрый	гелий	850	(U,Pu)C/SiC композитное керамическое, топливные частицы с керамическим покрытием	керамика (?)	высокотемпературная керамика (карбиды или бориды металлов)
LFR быстрый	свинец или свинец-висмут	800	U-Pu (U,Pu)N	ферритно-мартенситная сталь (9...12% Cr) керамика	на основе бора с содержанием изотопа $^{10}\text{B}$ до 95% - $^{10}\text{B}_x\text{C}$ ,
SFR быстрый	натрий	520 (550)	U-Pu-Zr U-Pu-Zr + актиниды (U,Pu)O <sub>2</sub> (U,Pu)O <sub>2</sub> +актиниды	ферритно-мартенситная сталь (9...12% Cr) ODS сплавы ванадия с покрытиями*	W <sup>10</sup> B <sub>2</sub> , Hf <sup>10</sup> B <sub>2</sub> * HfH <sub>x</sub>
SCWR быстрый (тепловой)	вода при сверхкритических параметрах	550 (P=25 МПа)	(U,Pu)O <sub>2</sub> Дисперсионное (UO <sub>2</sub> )	ферритно-мартенситная сталь (9...12% Cr) Fe Ni Cr Ti ODS Inconel 690,625,718	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·HfO <sub>2</sub> , Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·HfO <sub>2</sub> +B <sub>4</sub> C*
MCR надтепловой	соляной расплав	700	Соль	-	-
VHTR тепловой	гелий	1000	TRISO УОС в графитовой матрице с покрытием ZrC	графит с ZrC – покрытием $^{11}\text{B}^{15}\text{N}$ * $^{11}\text{B}^{15}\text{N}+^{11}\text{B}_4\text{C}$ *	карбид бора с пироуглеродной пропиткой *

[1] A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System/Issed by the US DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, GIF-002-00, December 2002

\* - предложения автора

# Требуемые температуры эксплуатации и повреждающие дозы в ЯЭУ различного типа



S. Zinkle, SMINS 2007, Karlsruhe

**All Gen IV and fusion concepts pose severe material challenges**

## 2015 год:

В мире не решены материаловедческие проблемы для ядерной энергетики будущего Ни для одного из рассматриваемых инновационных ядерных реакторов. не существует в требуемом объеме топливных, конструкционных, поглощающих материалов прошедших стадии:

- Разработки
- Освоения в промышленности
- Процедур лицензирования

## Не ранее 2040-2050гг.

Коммерческая реализация в значимых масштабах ядерных реакторов нового Поколения-4

## Необходимо

Выполнение большого объема НИОКР в области радиационного материаловедения по совершенствованию продлению срока службы АЭС, ВВЭР Поколения - 3+ (Корпус, ВКУ, ядерное топливо – MOX, микросферические твэлы, ТВС- квадрат, SiC- SiC, сплавы циркония и т.д.)

Следует ожидать расширение рынка испытаний реакторных материалов



Следует ожидать расширение рынка испытаний реакторных материалов

# Экспериментальная база БУИ РОСАТОМА для проведения НИОКР в области радиационного материаловедения



## Исследовательские ядерные реакторы:

БОР-60, МИР, СМ-3, РБТ-10, РБТ-6, ИВВ-2М  
2020г.-МБИР

АО «ГНЦ НИИАР», АО «ИРМ»

Созданы условия по расширению международного сотрудничества в области испытаний и исследований реакторных материалов и элементов активных зон для действующих и инновационных ядерных реакторов.

**К 2020г. ожидается увеличение более, чем в 2 раза стоимости работ по международным контрактам.**

## Стенды:

РГС, ПУРС- ТЭП,РИСК, РИТМ, УРАЛ, ПАРАМЕТР,  
СПРИНТ- ЯЭДУ, Контур, РИГ  
и другие

Имеющиеся стенды и ускорители ионов соответствуют лучшим мировым аналогам и позволяют решать задачи по разработке новых реакторных материалов

## Ускорители:

ЭГП-15;ЭГ-2,5; в 2016г.- Tandertron

## «Горячие» материаловедческие лаборатории

АО «ГНЦ НИИАР», АО «ИРМ»

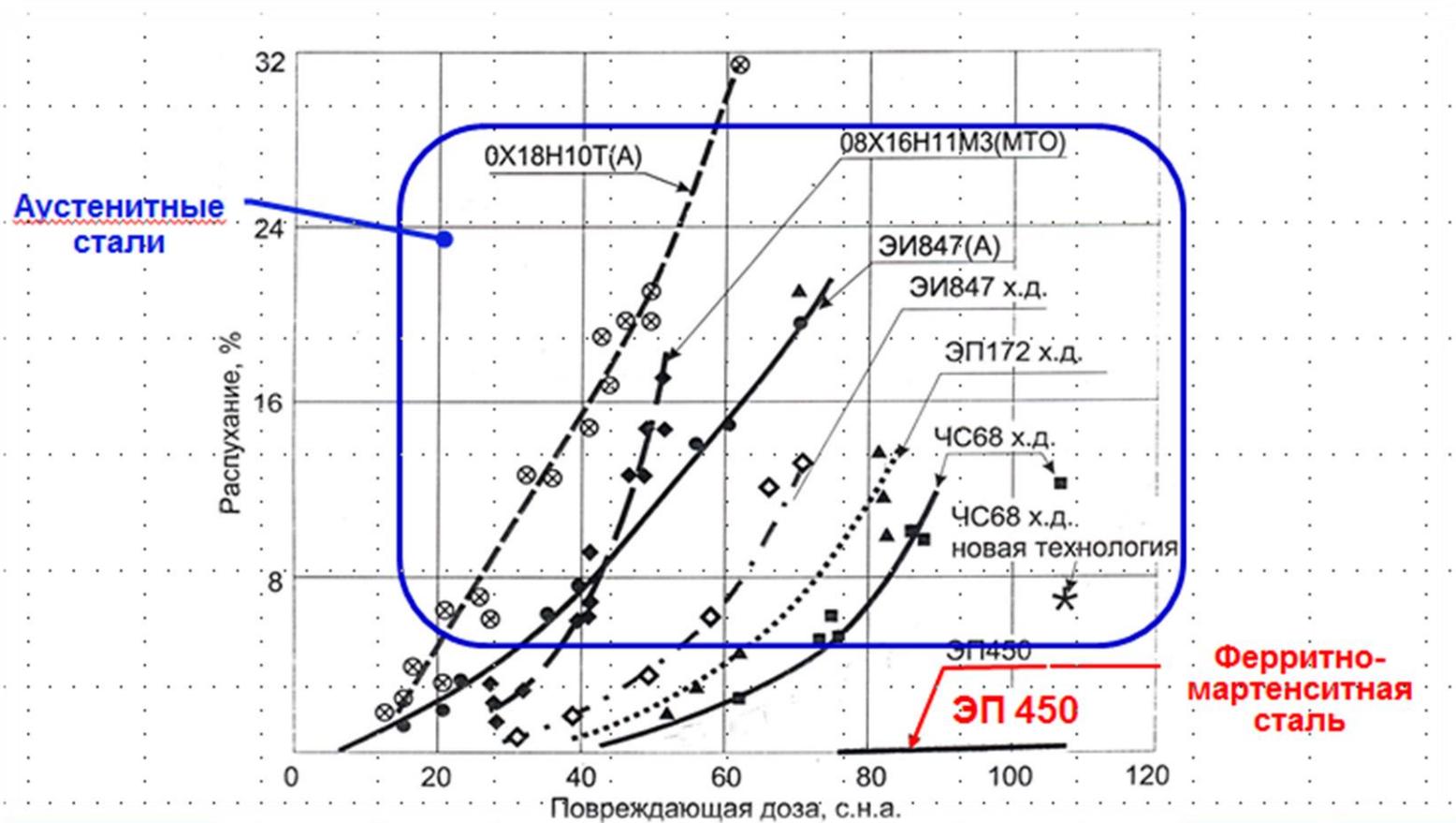
Современное состояние «горячих» материаловедческих лабораторий позволяют проводить НИР по зарубежным контрактам

**Россия – мировой лидер по испытаниям реакторных материалов в исследовательских ядерных реакторах.  
С вводом в эксплуатацию в 2020г. реактора МБИР - научный блок ГК «Росатом» укрепляет эти позиции.**

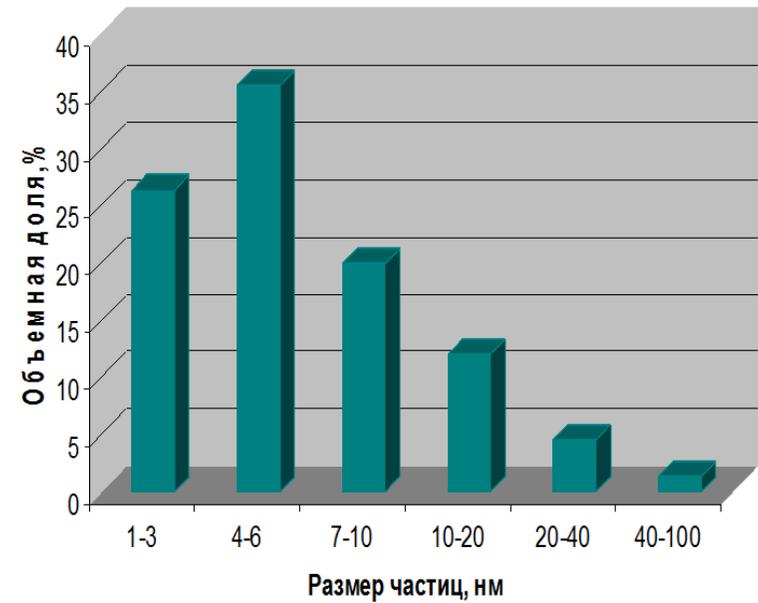
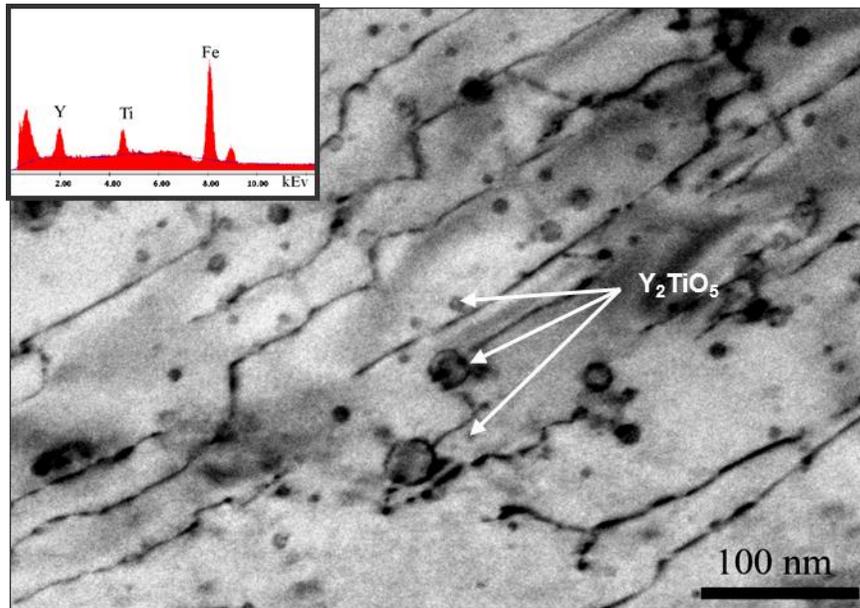
- ❑ Отработавшие в ЯЭУ ТВС, твэлы, СУЗы всех типов и различного назначения
- ❑ Ядерное топливо, конструкционные и поглощающие материалы различного состава и технологий изготовления после испытаний в стационарных, переходных и аварийных режимах в исследовательских ядерных реакторах
- ❑ Обоснование длительного хранения ОЯТ и переработки РАО
- ❑ Материаловедческий надзор, продление ресурса
- ❑ Физика радиационных повреждений
- ❑ Новые технологии изготовления, испытаний и исследований реакторных материалов

- ❑ Снижение радиационного распухания аустенитных хромоникелевых сталей
- ❑ Повышение жаропрочности хромистых ферритно-мартенситных сталей
- ❑ Разработка новых материалов (например, ДУО сталей, ванадиевых сплавов, керамических материалов SiC-SiC)
- ❑ Повышение коррозионной стойкости хромистых ферритно-мартенситных сталей
- ❑ Совершенствование металлургического и трубного производства путем модернизации оборудования и технологических процессов

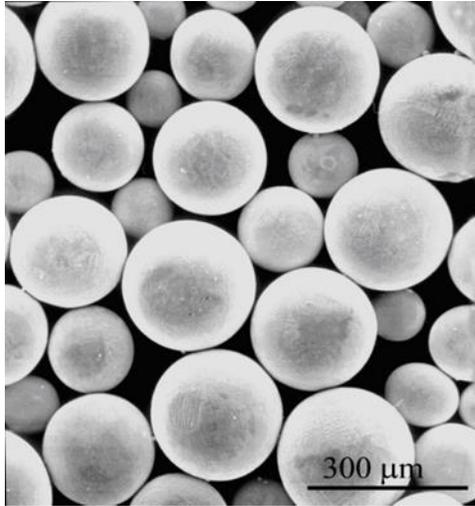
# Радиационное распухание – критерий выбора конструкционных материалов



## Ферритно-мартенситные 12 % хромистые стали



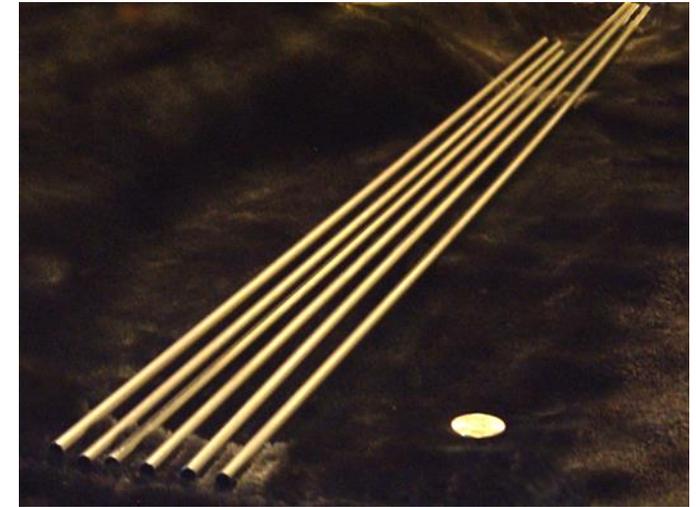
Микроструктура труб из стали ЭП450 ДУО и распределение частиц оксидов по размерам



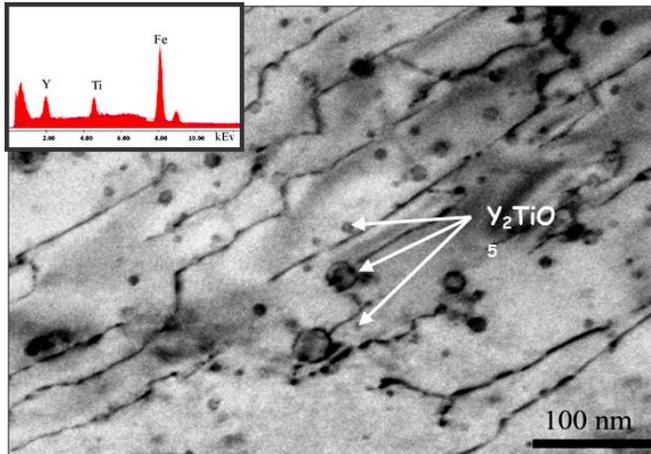
матричный порошок



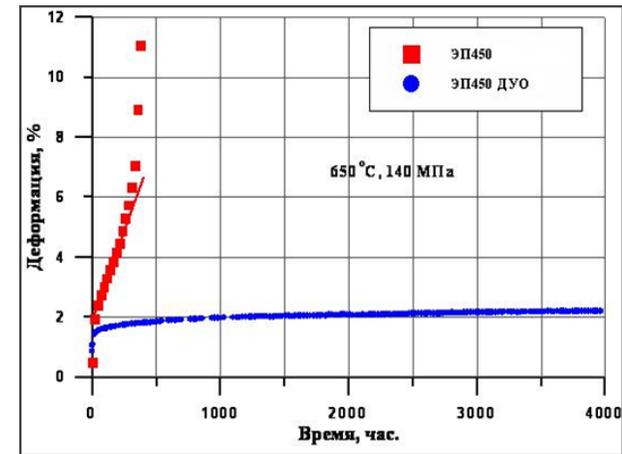
трубная заготовка



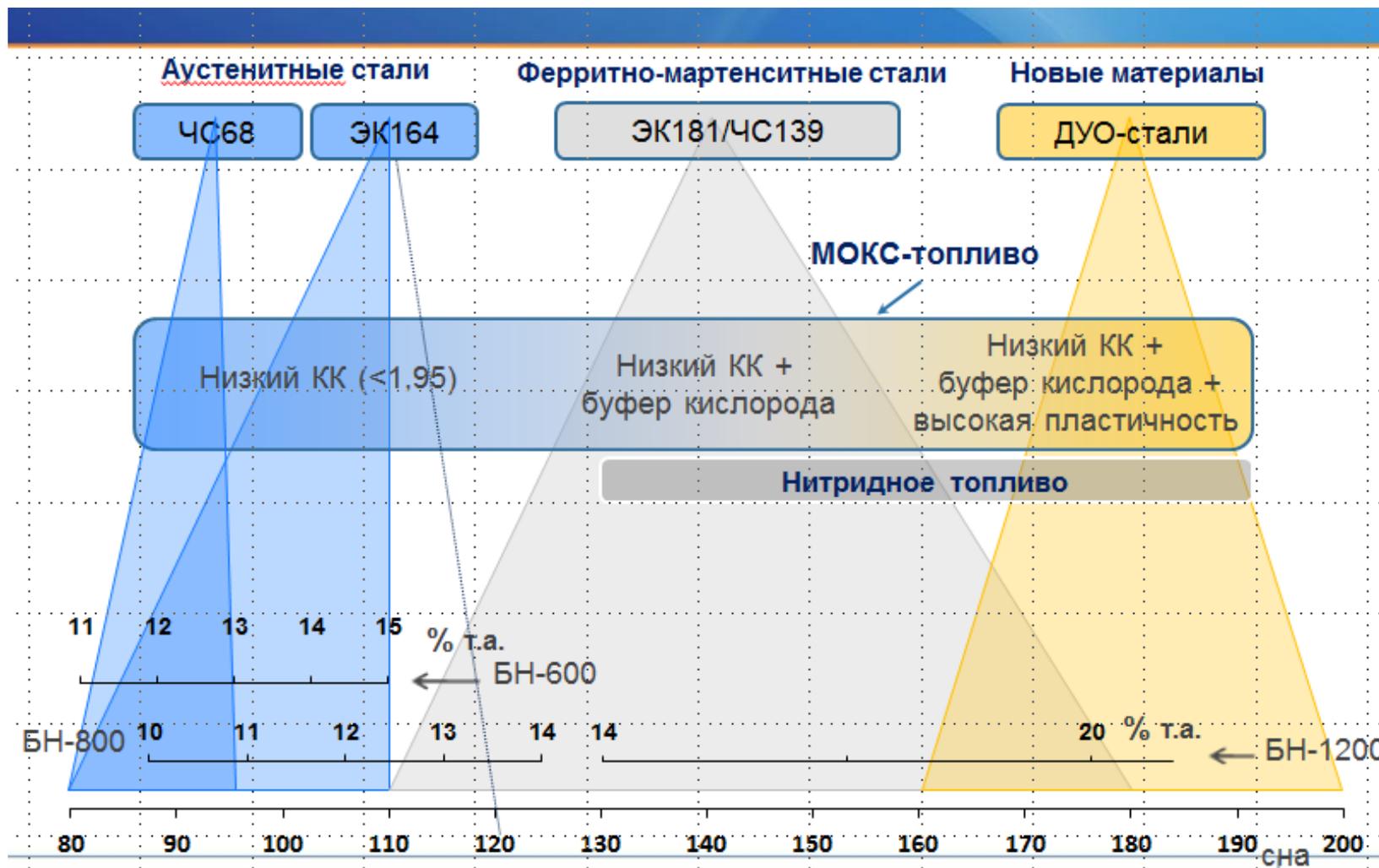
Особо-тонкостенные трубы



нанооксиды в стали ЭП450 ДУО



термическая ползучесть сталей ЭП450 и ЭП450 ДУО



**Потенциальное использование SiC- SiC в ЯЭУ**  
 (Yutai Katoh, ORNL, USA, 19-20.11.2013, US-RF  
 MSR/FHR Workshop)

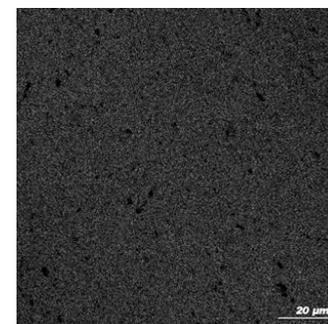
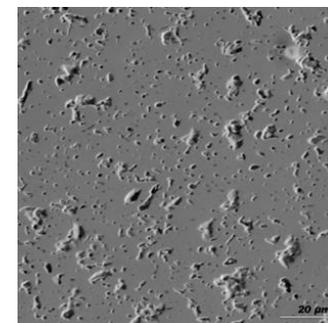
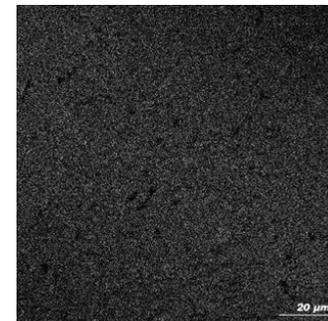
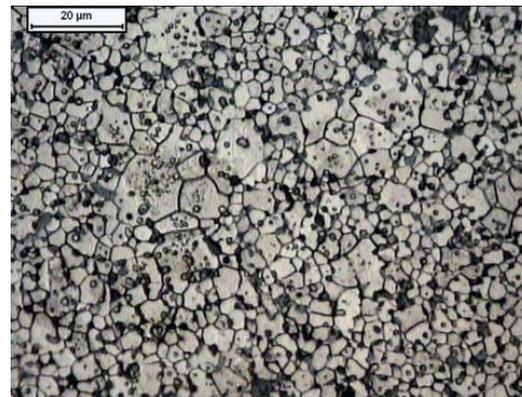
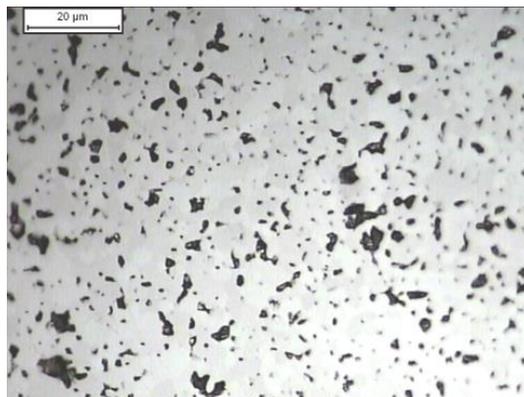
<b>РЕАКТОР</b>	<b>Использование</b>	<b>Условия эксплуатации</b>		
<b>ИТЭР</b>	Бланкет	He 50сна	400-900°C	>
<b>HTGR, VHTR тепловой</b>	Конструкционные элементы	He 40сна	600-1100°C	>
<b>LWR (PWR,BWR) тепловой</b>	Оболочки ТВЭЛ, Решетки, Каналы	Вода 50сна	300-500°C	>
<b>FHR, AHTR тепловой</b>	Конструкционные элементы	Соли 10сна	700°C	>
<b>SFR быстрый</b>	Оболочки ТВЭЛ, Конструкционные элементы	Na 100сна	500-700°C	>
<b>GFR быстрый</b>	Оболочки ТВЭЛ, Конструкционные элементы	He 100сна	700-1200°C	>

- Нитридное уран- плутониевое топливо
- MOX- топливо
- Металлическое топливо
- Композиционное керамическое микросферическое топливо
- Плотное топливо с минор-актинидами

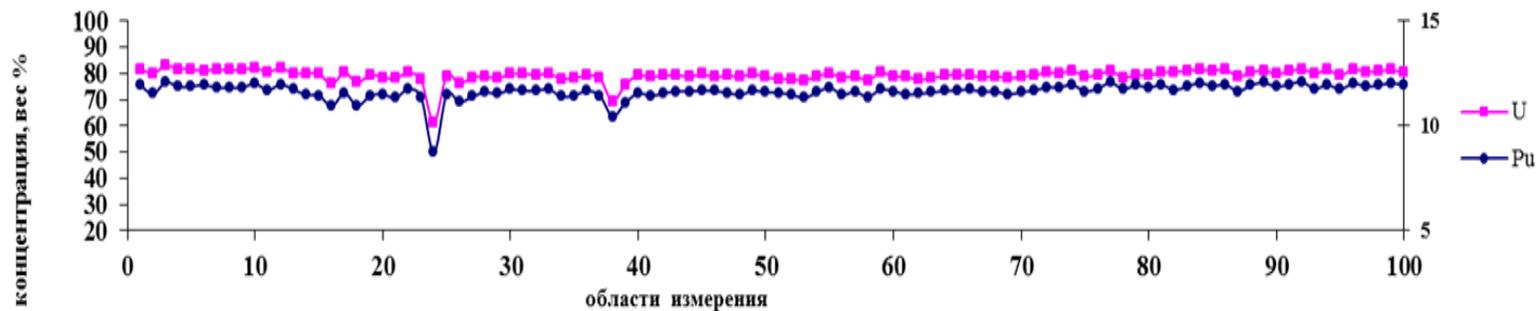
## Нитридное топливо (UPu)N

Нитридное топливо разрабатывается для инновационных ядерных реакторов БРЕСТ-300 и БН-1200

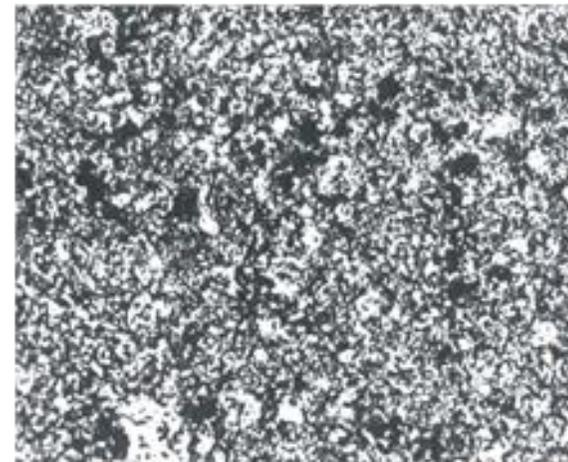
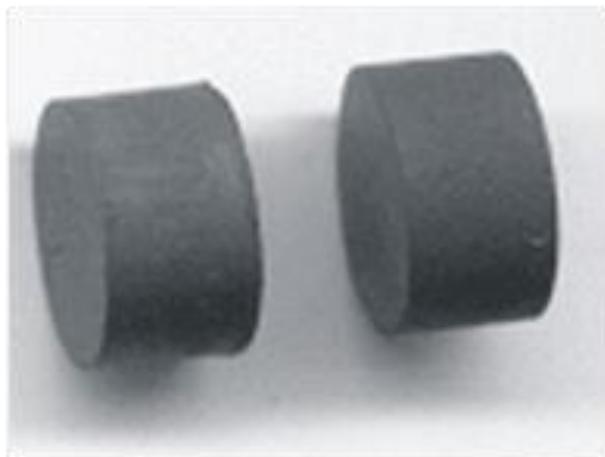
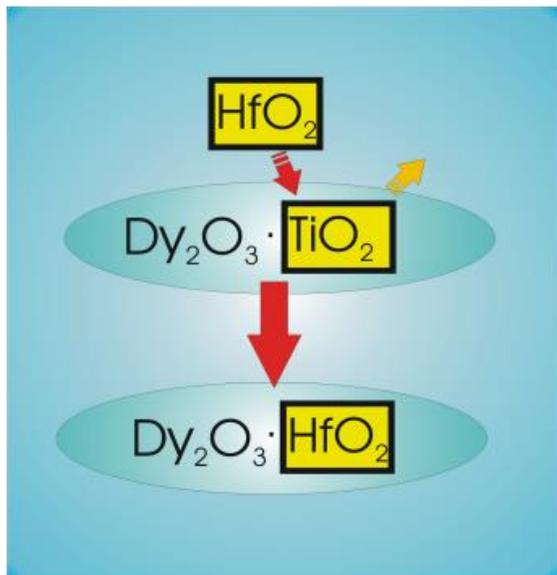
Проводятся испытания (UPu)N в БН-600 и БОР-600 с разной технологией изготовления, составом, величиной и типом пористости таблеток до различного выгорания в диапазоне температур 700-1700 °С для обоснования допустимого ресурса тепловыделяющего элемента



Распределение U и Pu обр 7



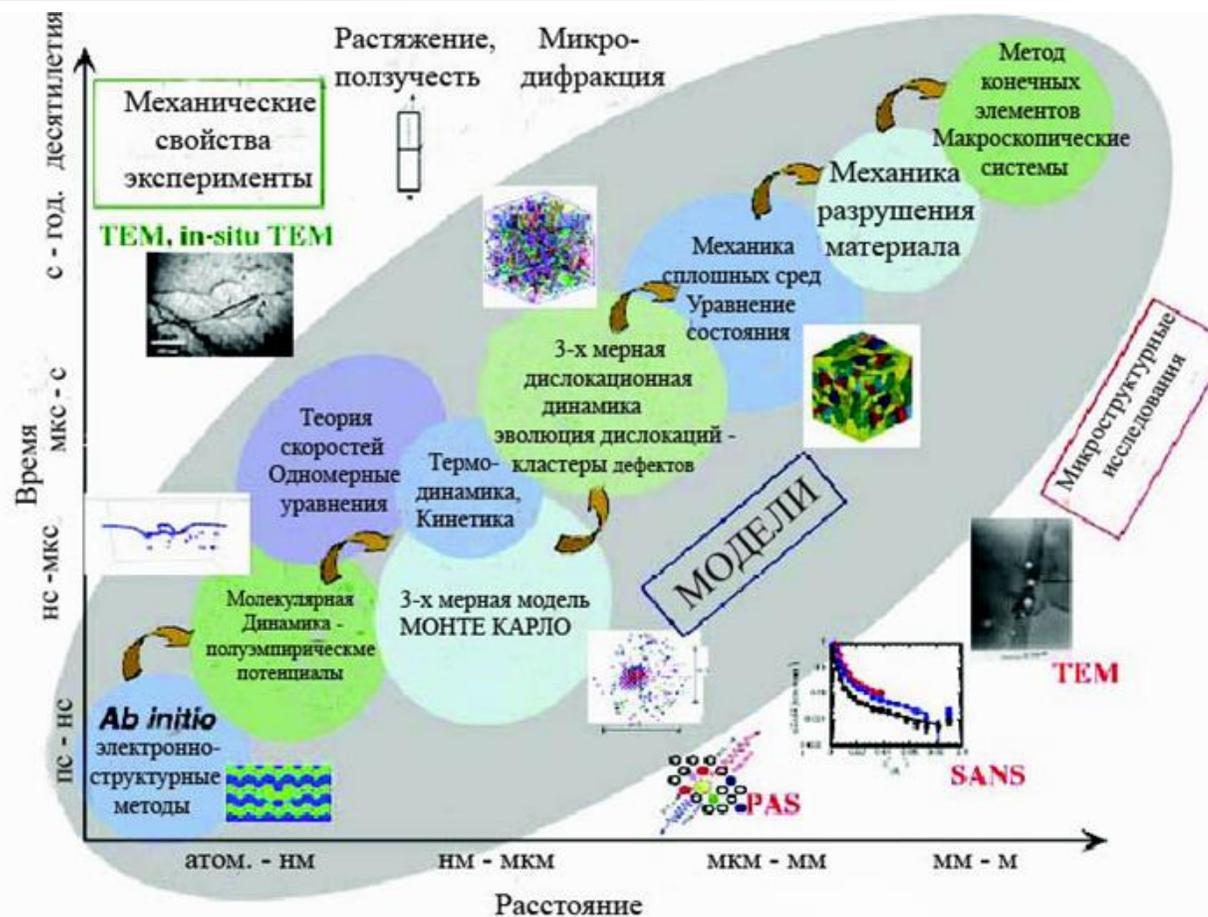
- ❑ Изделия из карбида бора ( $B_4C$ ) больших размеров (более 80мм) плотностью более 95% от теоретической и обогащением по изотопу бор-10 выше 95%
- ❑ Гидрид гафния ( $HfH_x$ )
- ❑ Оксиды редкоземельных элементов и тугоплавких металлов с разупорядоченной флюоритной структурой ( $nDy_2O_3mHfO_2$ )
- ❑ Оксиды редкоземельных элементов в металлической матрице ( $Eu_2O_3 + Co$ )



## Замена $\text{Ti}$ на $\text{Hf}$ позволяет

- повысить физическую эффективность поглотителя
- получить флюоритную кристаллическую структуру наиболее стойкую к реакторному облучению
- увеличить плотность таблеток с  $6,2 \text{ г/см}^3$  до  $7,8 \text{ г/см}^3$
- улучшить теплофизические характеристики





Физическое моделирование реакторных материалов - обязательное условие при разработке новых реакторных материалов и обосновании ресурса, перспективное направление в развитии международного сотрудничества

Широкомасштабное (large-scale) молекулярно-динамическое моделирование конденсированных сред под облучением

Разработка методов ускоренного МД-моделирования на большие времена (long time scales)

Разработка технологии передачи информации с атомного уровня на средний (mesoscale) уровень и в континуальную модель

Идентификация механизмов разрушения на атомарном уровне, исходя из данных макроскопического разрушения.

## Некоторые вопросы для изучения радиационной стойкости методами физического моделирования

- Какие механизмы контролируют разрушение материалов в экстремальных условиях (облучения, мех. напряжения, коррозии)?
- Почему ОЦК металлы менее подвержены набуханию, чем ГЦК?
- Как влияет атомный беспорядок на свойства реакторных материалов?
- Какую роль играет межфазная граница в деградации материалов под облучением?
- Как связать методы и средства моделирования физических систем разного характера и разной степени детализации в адекватный междисциплинарный инструментарий?

---

Моделирование (**modeling and simulation**) рассматривается как третья ветвь (!), соединяющая эксперимент и теорию.

С помощью моделирования (**modeling**) можно объединить большинство теорий и концепций, разработанных в разных отраслях науки.

С помощью моделирования (**simulation**) можно использовать передовые компьютерные методы, алгоритмы и платформы, чтобы получить результаты, недостижимые другими средствами.

---