



РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Разработка новых материалов и задачи реакторного материаловедения

Дуб А.В., Рисованый В.Д.
(АО Наука и инновации», г. Москва)

Научная сессия «Наука для атомной энергетики»,
г. Обнинск, 7.06.2019г.



Содержание

РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Введение

1. Цель и основные задачи при разработке инновационных материалов
2. Трансформация подходов в развитии материалов
3. Новые требования к развитию и новые материаловедческие и технологические принципы
4. Реализация : конструкционные, топливные и конструкционные материалы
5. Принципы управления структурой
6. Формирование свойств материалов - многоуровневый подход: Мезо-уровень - включения, зерно
7. Многоуровневое моделирование
8. Методы ускоренных испытаний
9. Новые материалы и цифровые технологии: от материала к изделию
10. Основные задачи по разработке новых перспективных материалов в рамках Единого тематического плана НИОКР государственной корпорации «Росатом»

Заключение



РОСАТОМ

1. Цель и основные задачи при разработке инновационных материалов

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Цель - обеспечение лидерства в области создания новых материалов и нормативной базы/сертификации для обеспечения безопасности и экономической эффективности эксплуатации ядерно-энергетических установок, построение двухкомпонентной ядерной энергетики на основе управления эволюцией микро- и наноструктуры материалов

Основные задачи:

- оценка и разработка критериев разрушения/ эволюции свойств
- комплементарное применение многоуровневого моделирования, проведение ускоренных радиационных испытаний свойств материалов и изделий в обоснование конструкторских решений
- проведение исследований влияния параметров сфокусированной энергии на характеристики формирующихся материалов. Порошки. Композиты. Модифицирование поверхности
- разработка перспективной нормативной базы и стандартов, методов контроля для внедрения новых методов конструирования и производственных технологий.



РОСАТОМ

2. Трансформация подходов в развитии материалов

ГОСУДАРСТВЕННАЯ

ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

(Smart Big Data & Advanced Simulation & Optimization)-Driven Advanced (Design & Product Development)

21 век

20 век

Подходы к традиционным материалам

Металлы

Гибкость конструкции

Материалы с экстремальными свойствами

Новый технологический уклад

Рециклинг

«Быстрые процессы»

Цифровое производство

Расчеты вместо краш-тестов

Снижение веса – «зеленый» императив

Трансформация подхода: «от свойства материала к свойству изделия»

ДОСТАТОЧЕН ЛИ ЗАПАС, ЧТОБЫ БЫТЬ В ЛИДЕРАХ?

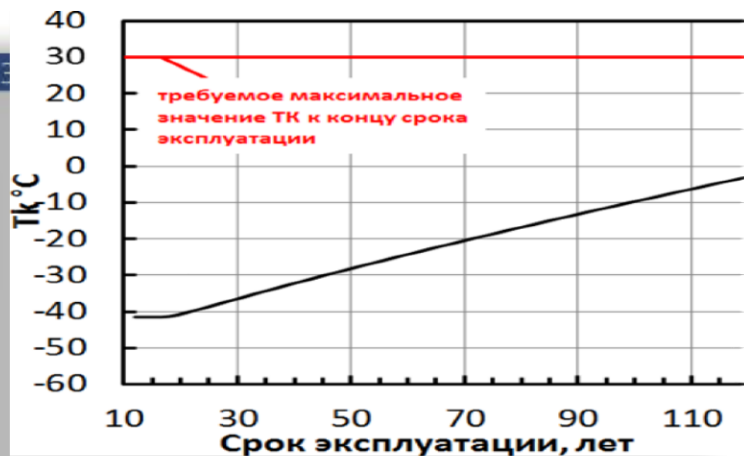
ВРЕМЯ!!!



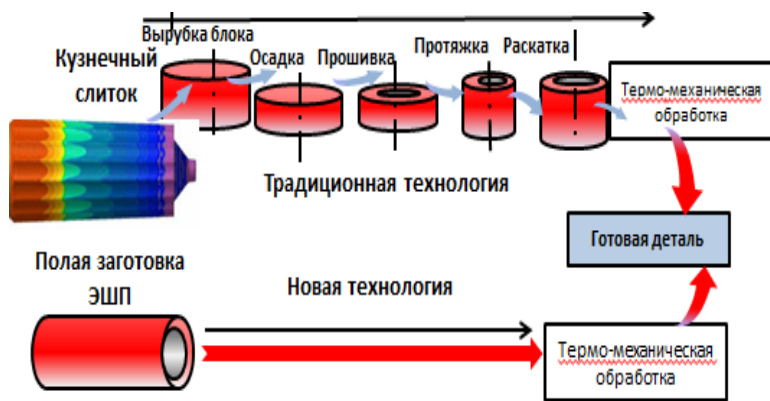
3. Реализация : Конструкционные материалы

Эволюция корпусной стали. ВКУ; ВВЭР-С. ВВЭР-СКД

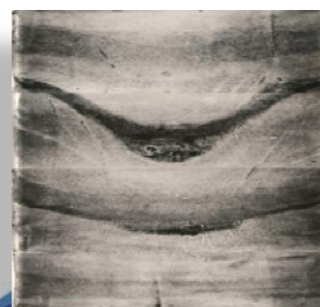
Содержание примесей



Наплавные последовательные процессы (ЭШП и др.)



**Масса металла снижается на 50%,
КИМ возрастает до 70%**



34ХНЗМ, 50 Гц



15Х11МФ, 2 Гц

Масса изделий – до 200 тонн.



РОСАТОМ

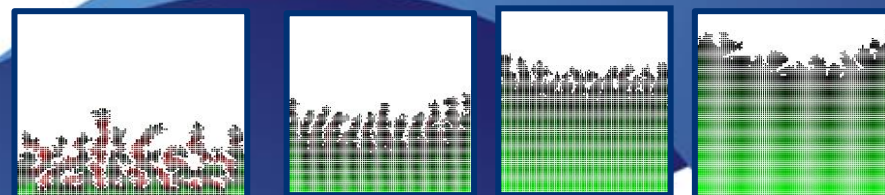
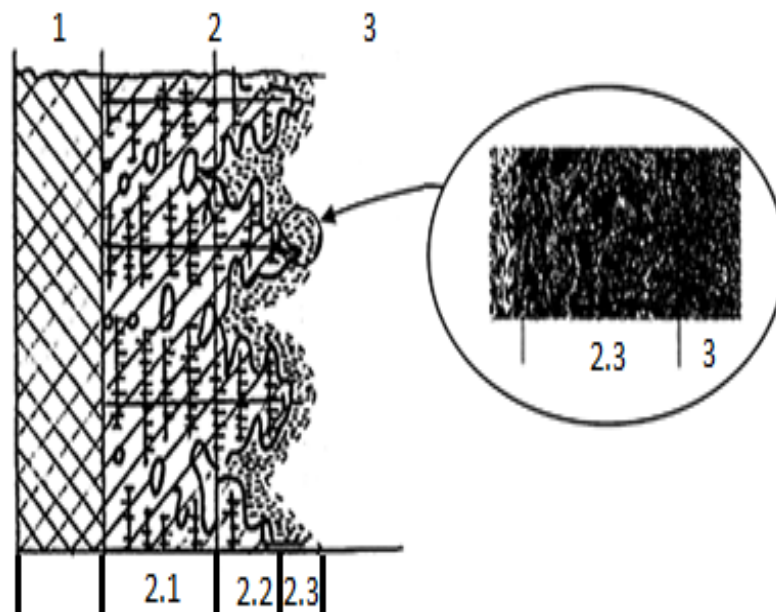
3.Формирование свойств материалов - многоуровневый подход: Микро-нано, фазовые переходы

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Масштаб уровней структуры

№ п/п	Название	Масштаб
МИКРОУРОВЕНЬ,		$\leq L_0$
1	Вакансия, атом	$2-3 \cdot 10^{-10}$ м
2	Кластеры	$2-5 \cdot 10^{-9}$ м
3	Дислокация	10^{-8} м
МЕЗОУРОВЕНЬ		
4	Блок мозаики, суб-зерно, сульфиды, НВ	$10^{-7}-10^{-6}$ м
УРОВЕНЬ ЗЕРНА,		L_s
5	Зерно. Дендрит. Сульфиды, НВ.	$10^{-5} - 10^{-4}$ м
МАКРОУРОВЕНЬ,		$> L_s$
6	Группа зерен	$2 - 5 \cdot 10^{-4}$ м
7	Участок образца	10^{-3} м
8	Образец в целом	Более $10^{-3} - 10^{-2}$ м

Формирование первичной кристаллической структуры



P, Si, C, S, O, H, Sb, As, Bi, Sn, N, Cu, Al, Mn



РОСАТОМ

3. Предлагаемые материалы для реакторов IV-го поколения

(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 авторов)

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

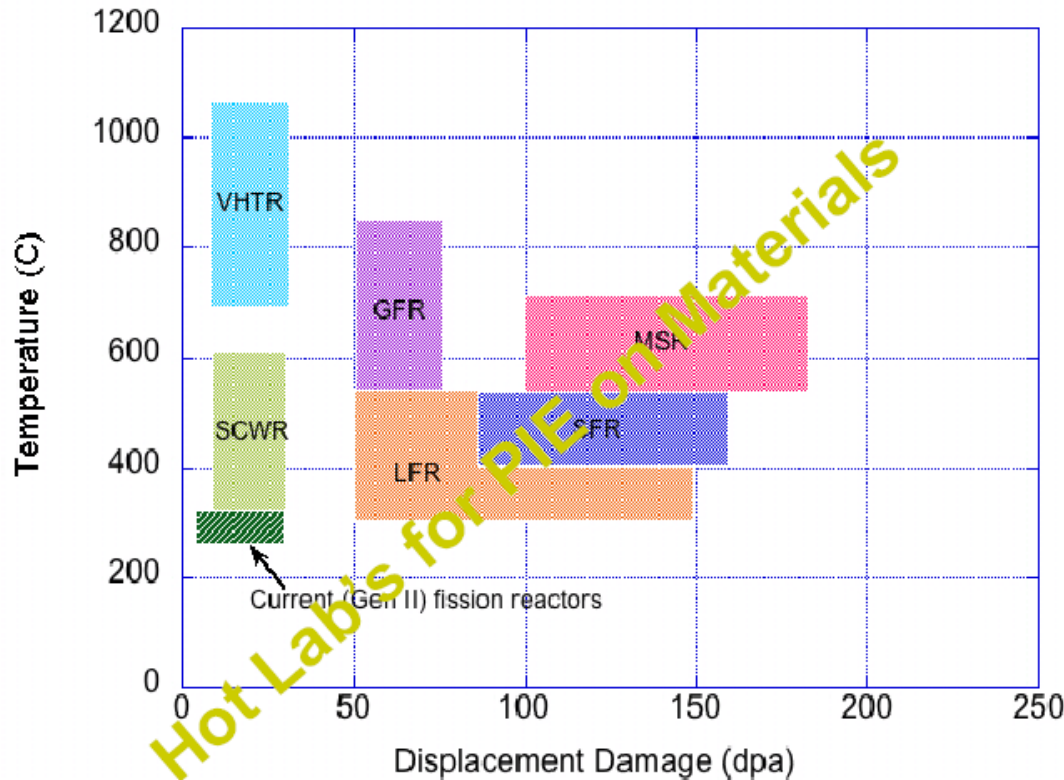
Реактор	Теплоноситель	Максимальная температура, °С	Материалы элементов активных зон		
			Топливо	Оболочка	Поглотитель
GFR быстрый	гелий	850	(U,Pu)C/SiC композитное керамическое, топливные частицы с керамическим покрытием	керамика (?)	
LFR быстрый	свинец или свинец- висмут	800	U-Pu (U,Pu)N	ферритно- мартенситная сталь (9...12% Cr) керамика	высокотемпературная керамика (карбиды или бориды металлов) на основе бора с содержанием изотопа ¹⁰ B до 95% - ¹⁰ B _x C,
SFR быстрый	натрий	520 (550)	U-Pu-Zr U-Pu-Zr + актиниды (U,Pu)O ₂ (U,Pu)O ₂ +актиниды	ферритно- мартенситная сталь (9...12% Cr) ODS сплавы ванадия с покрытиями*	W ¹⁰ B ₂ , Hf ¹⁰ B ₂ * HfNx Dy ₂ O ₃ ·HfO ₂ , Dy ₂ O ₃ ·HfO ₂ +V ₄ C*
SCWR быстрый (тепловой)	вода при сверхкритичес- ких параметрах	550 (P=25 МПа)	(U,Pu)O ₂ Дисперсионное (UO ₂)	ферритно- мартенситная сталь (9...12% Cr) Fe Ni Cr Ti ODS Inconel 690,625,718	
MCR надтепловой (быстрый)	соляной расплав	700	Соль	-	-
VHTR тепловой	гелий	1000	TRISO UOC в графитовой матрице с покрытием ZrC	графит с ZrC – покрытием ¹¹ B ¹⁵ N * ¹¹ B ¹⁵ N + ¹¹ B ₄ C* 7	карбид бора с пироуглеродной пропиткой *



РОСАТОМ

3.Требуемые температуры эксплуатации и повреждающие дозы в ЯЭУ различного типа

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»



S. Zinkle, SMINS 2007, Karlsruhe

All Gen IV and fusion concepts pose severe material challenges



РОСАТОМ

3. Разработка композиционных материалов типа SiC-SiC (ONL, США, 2014г)

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

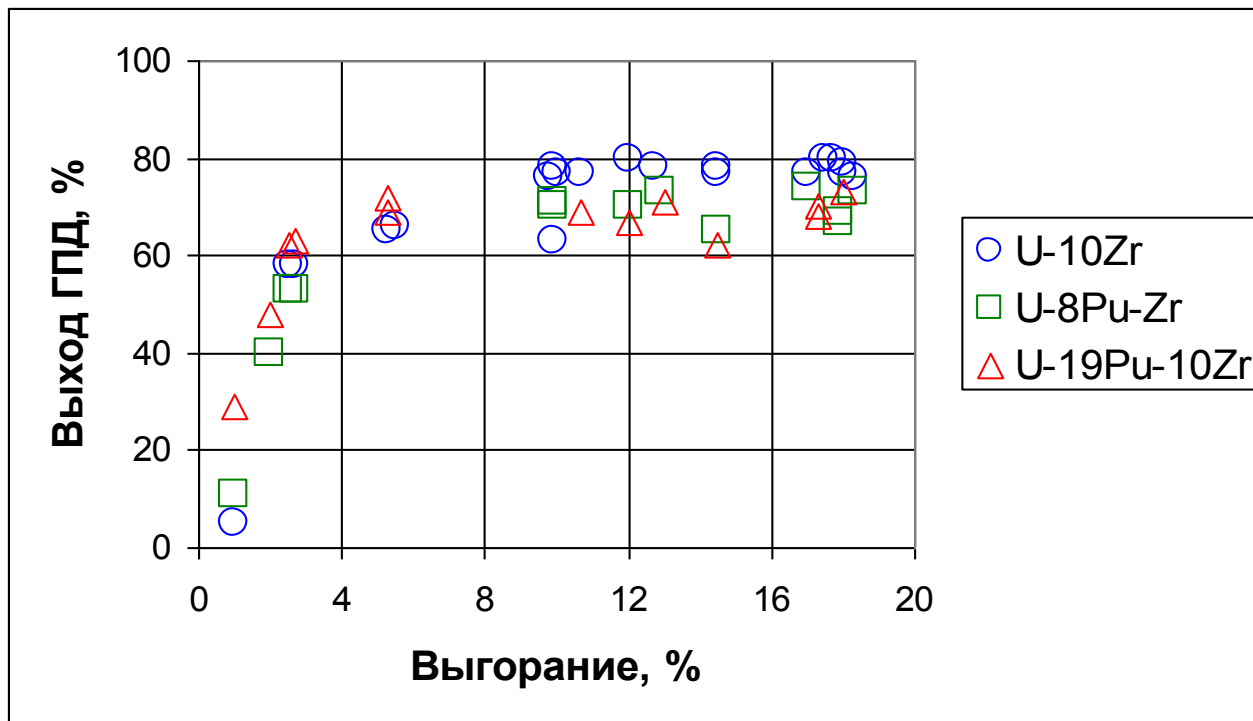
РЕАКТОР	Использование	Условия эксплуатации		
ИТЭР	Бланкет	He	400-900 ⁰ C	> 50сна
HTGR, VHTR тепловой	Конструкционные элементы	He	600-1100 ⁰ C	> 40сна
LWR (PWR,BWR) тепловой	Оболочки ТВЭЛ, Решетки, Каналы	Вода	300-500 ⁰ C	> 50сна
FHR, AHTR тепловой	Конструкционные элементы	Соли	700 ⁰ C	> 10сна
SFR быстрый	Оболочки ТВЭЛ, Конструкционные элементы	Na	500-700 ⁰ C	> 100сна
GFR быстрый	Оболочки ТВЭЛ, Конструкционные элементы	He	700-1200 ⁰ C	> 100сна



РОСАТОМ

3. Зависимость выхода газа от выгорания в металлическом топливе*

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»



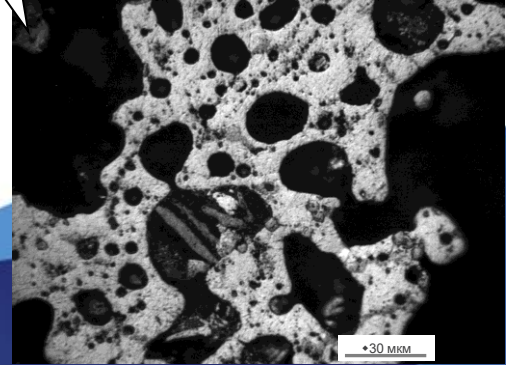
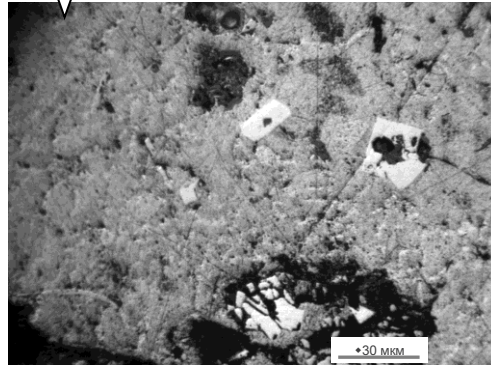
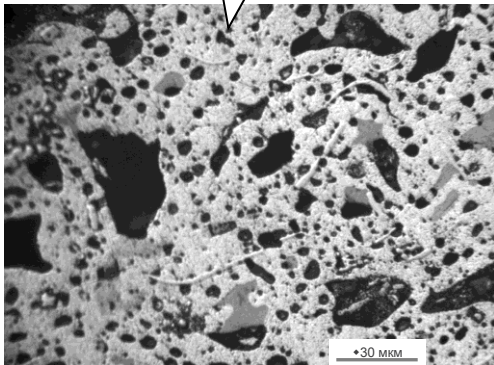
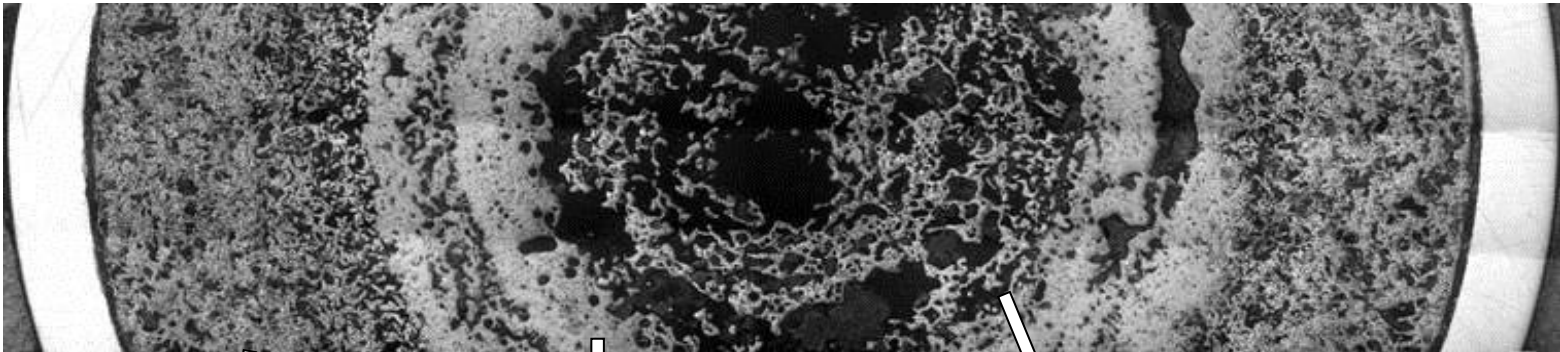
* R.Pahl, R.Wisher, M.Billone et al. Steady-state irradiation testing of U-Pu-Zr fuel to 18 at. % burnup. Proc. of the 1990 Int. Fast Reactor Safety Meeting, v.4, p.129



РОСАТОМ

3. Типичная структура U-19Pu-10Zr после реакторного облучения

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»



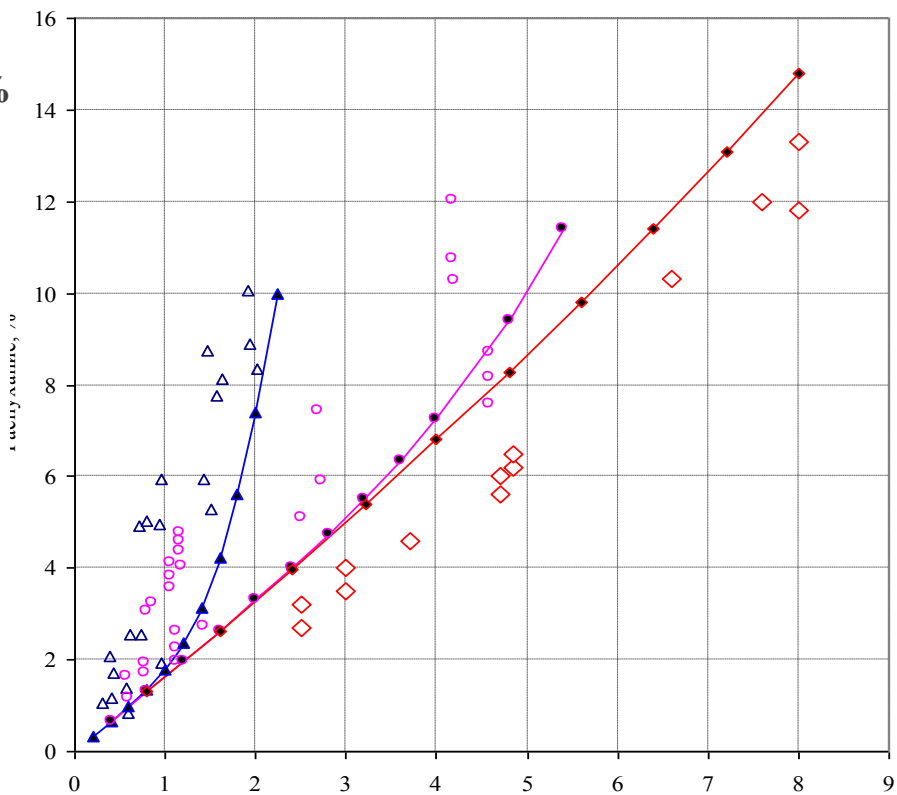


РОСАТОМ

3.Распухание нитридного топлива

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Распухание, %



UN, макс температура 1675 К, плотность 93%,
○ UN, макс температура 1460 К, плотность 95% - иссл. реакторы США,
◇ UN, макс температура 173 К, плотность 84-94% - БР-10, расчет: 1675 К - ▲, at 1460 К - ●, at 173 К - ◆.

Выгорание, % т.ат.

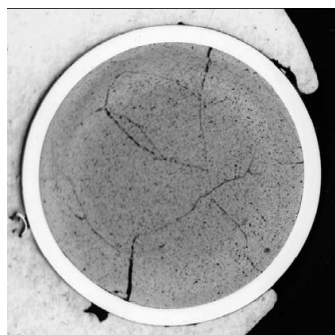
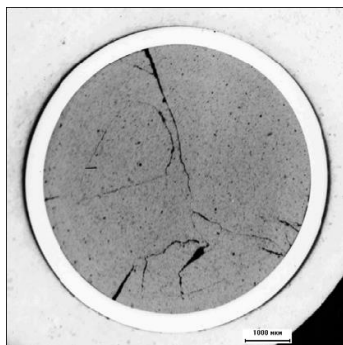
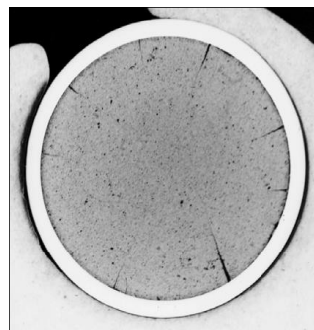
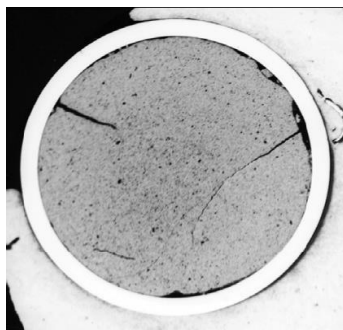


РОСАТОМ

3. Нитридное топливо (UPu)N в BORA-BORA

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Поперечные сечения топливных таблеток после облучения



Топливо	UPu _{0.6} N	UPu _{0.45} N
Скорость распухания % / %т.ат.	(0,48–0,68) ±0,04%	(0,64–1,11) ±0,04%
Выход ГПД, %	19	19
Макс глубина коррозии оболочки, мк	нет	15 (в верхнем сечении АЗ)

Нет заметных изменений структуры топлива, кроме мелкой внутри-зеренной пористости и коагуляции зерно-границных пор (максимальная температура топлива 1750 °С)

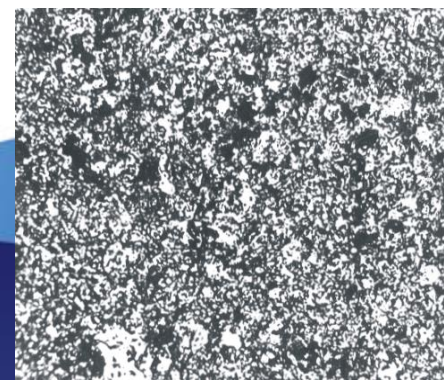
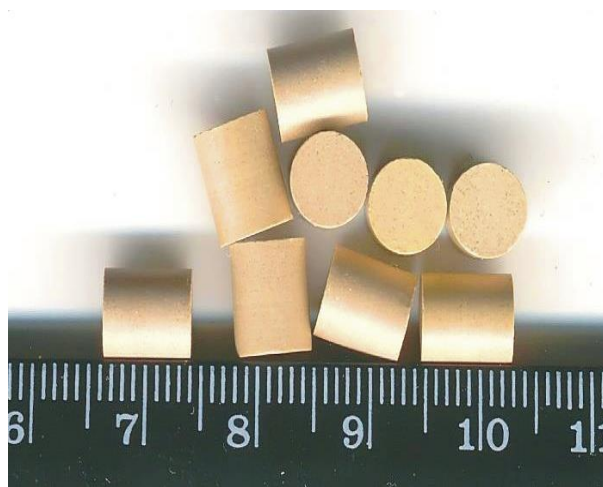
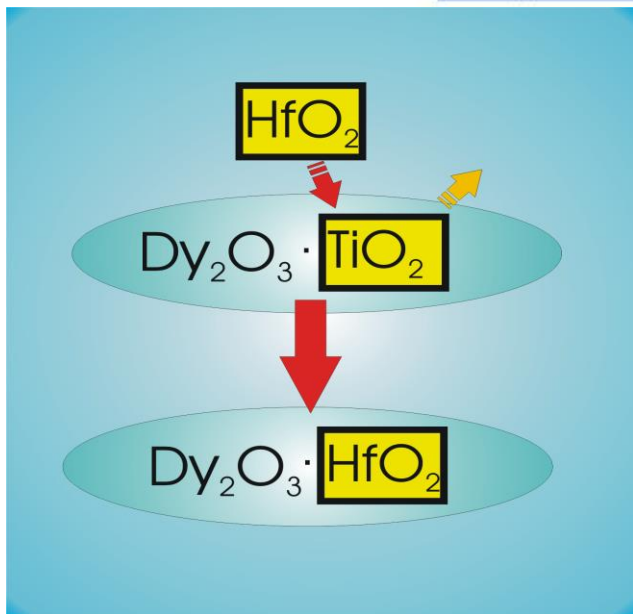
Не выявлено диссоциации нитрида при облучении в течение 2-х этапов ни по состоянию микроструктуры, ни по изменению содержания азота в газовой фазе под оболочкой твэлов, ни по каким-либо иным признакам.



РОСАТОМ

3. Гафнат диспрозия ($n\text{Dy}_2\text{O}_3 \cdot m\text{HfO}_2$) для реакторов на тепловых нейтронах

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»



Замена Ti на Hf позволяет

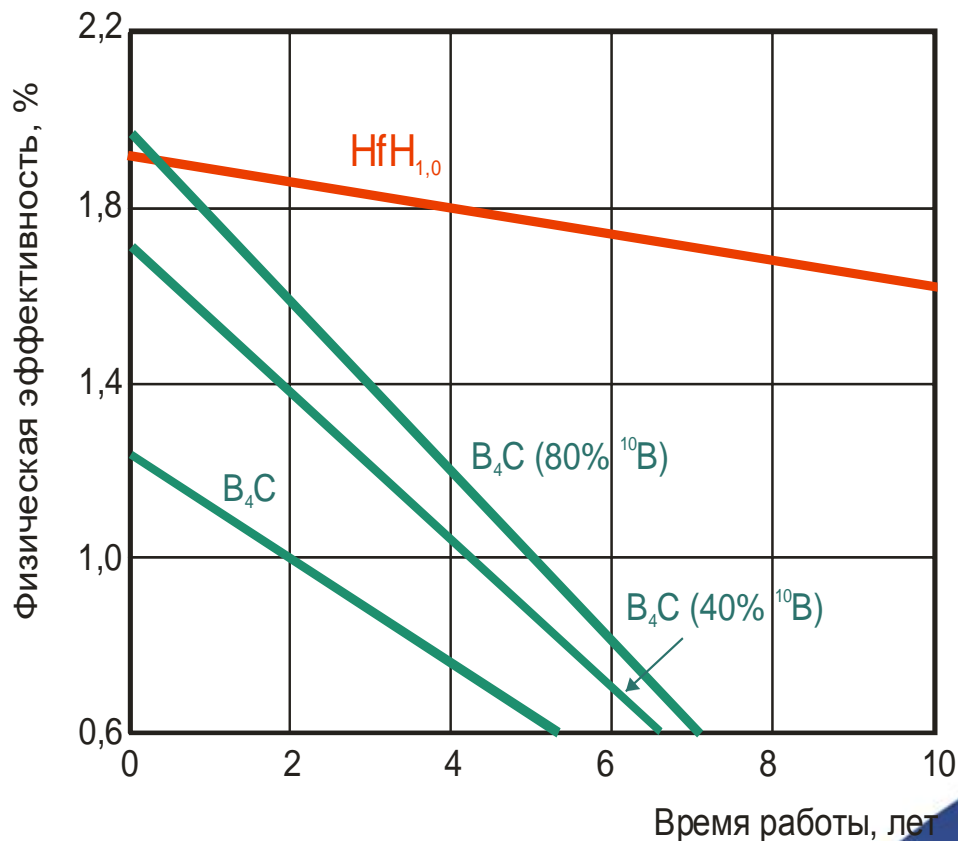
- повысить физическую эффективность поглотителя
- получить флюоритную кристаллическую структуру наиболее стойкую к реакторному облучению
- увеличить плотность таблеток с $6,2 \text{ г/см}^3$ до $8,0 \text{ г/см}^3$
- улучшить теплофизические характеристики



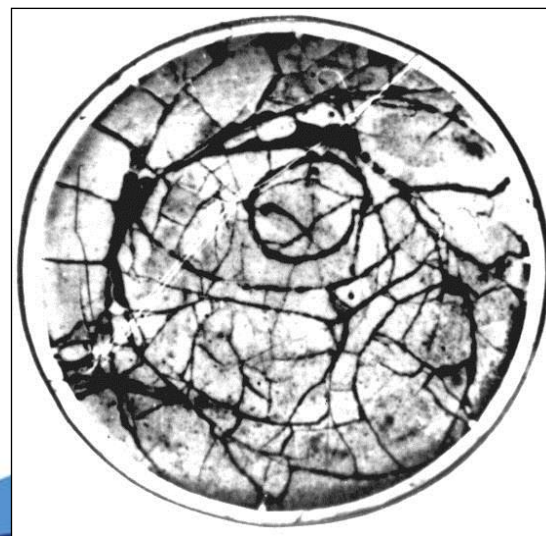
РОСАТОМ

3. Поглощающие материалы для БН- реакторов

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»



Макроструктура поперечного сечения таблеток В₄С после облучения

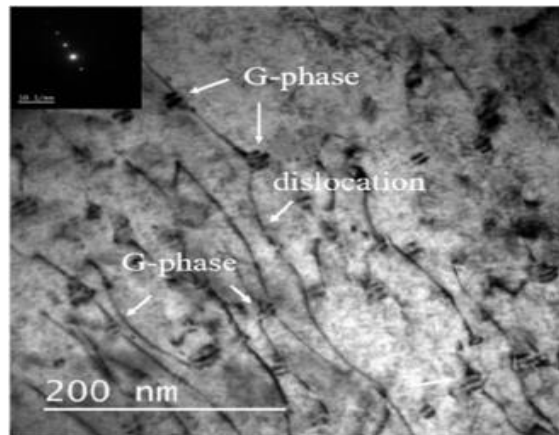
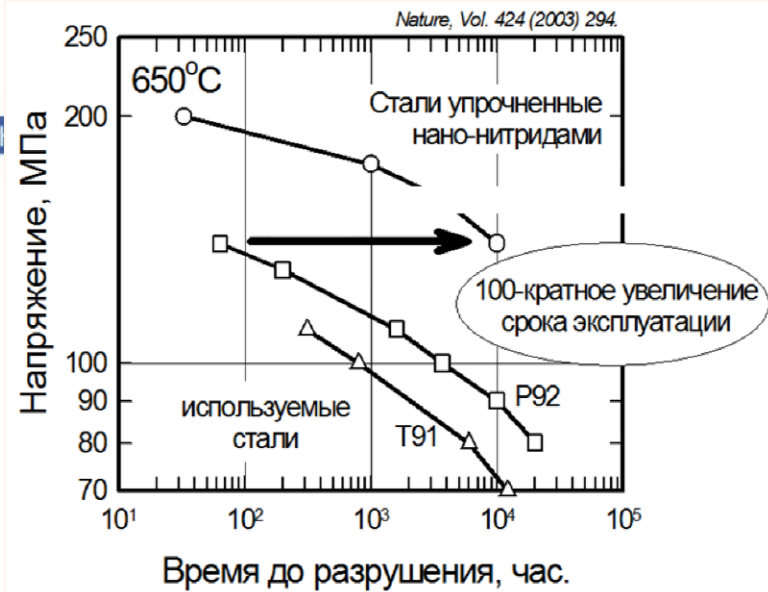
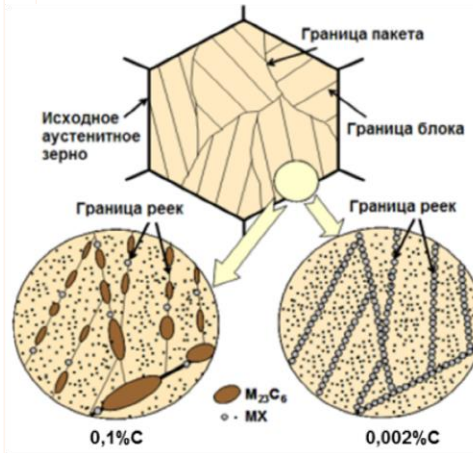
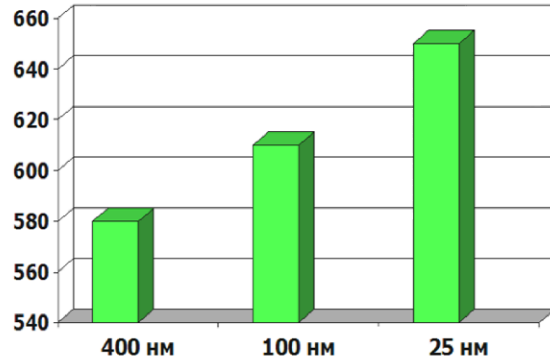


Физическая эффективность стержней регулирования в коммерческом реакторе на быстрых нейтронах JSFR (Япония, 2040-2050 гг.)

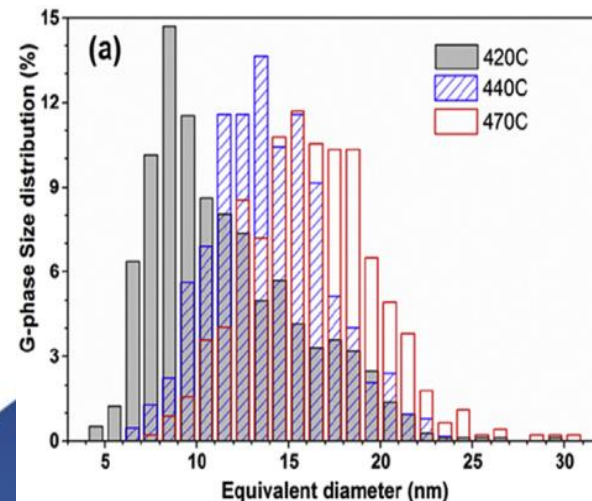


4. Формирование свойств материалов - многоуровневый подход: Мезо-уровень - включения, зерно

Влияние размера частиц на температуру эксплуатации 9%Cr стали мартенситного класса



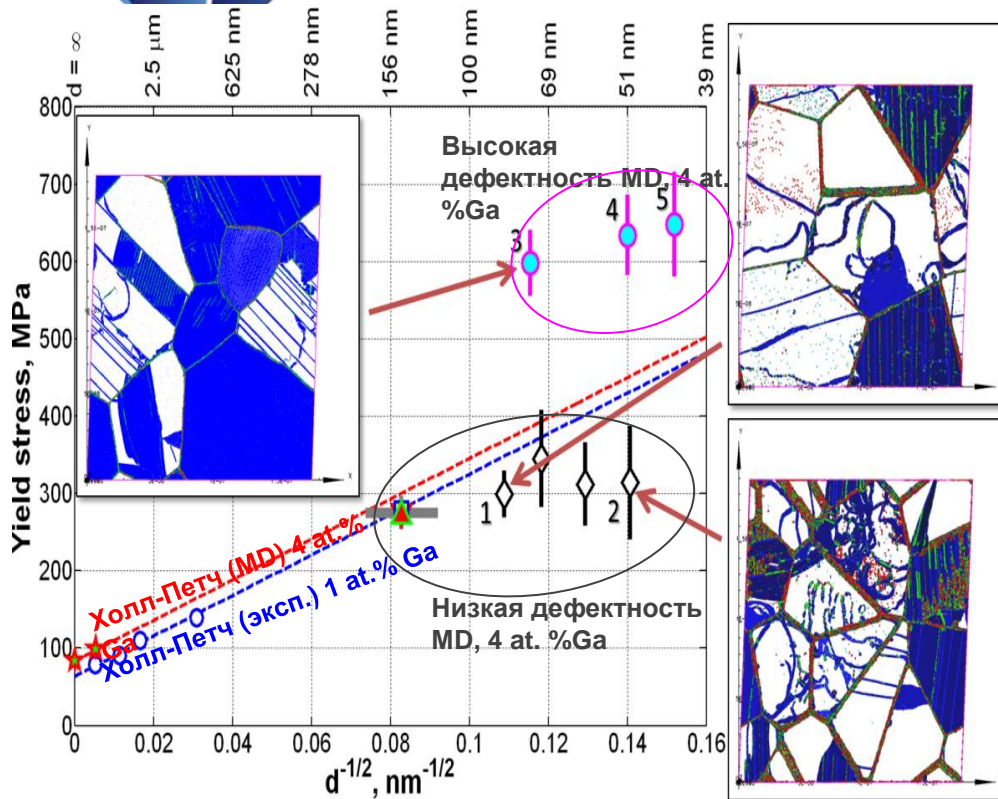
Ni, Si и Mn обогащенные выделения G-фазы, гетерогенно зародившиеся на дислокациях в 12%Cr Ф/М стали, облученной до 20 дпа при 440 С.



Распределение по размеру (%) частиц G-фазы как функция их эквивалентного диаметра в НТ9 облученном до 20 дпа при 420, 440 и 470.С.

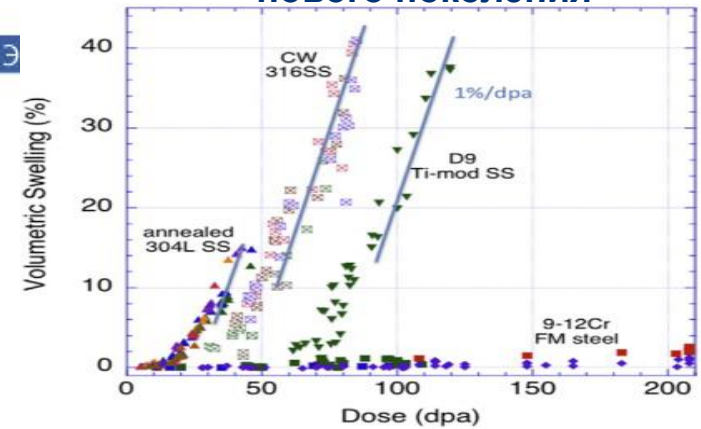


5. Многоуровневое моделирование



Юй Э

Создание материалов для реакторов нового поколения



Основные требования:

- рабочая температура 800 С
- сохранение свойств до 150 сна

Применение атомистического моделирования к реакторным материалам - решение частных задач:

Кластер Y-O-Ti
ДУО стали



взаимодействие дислокаций с зеренной структурой - управление кристаллизацией и упрочнением материала измельчением зерна и повышением степени внутриверенной дефектности

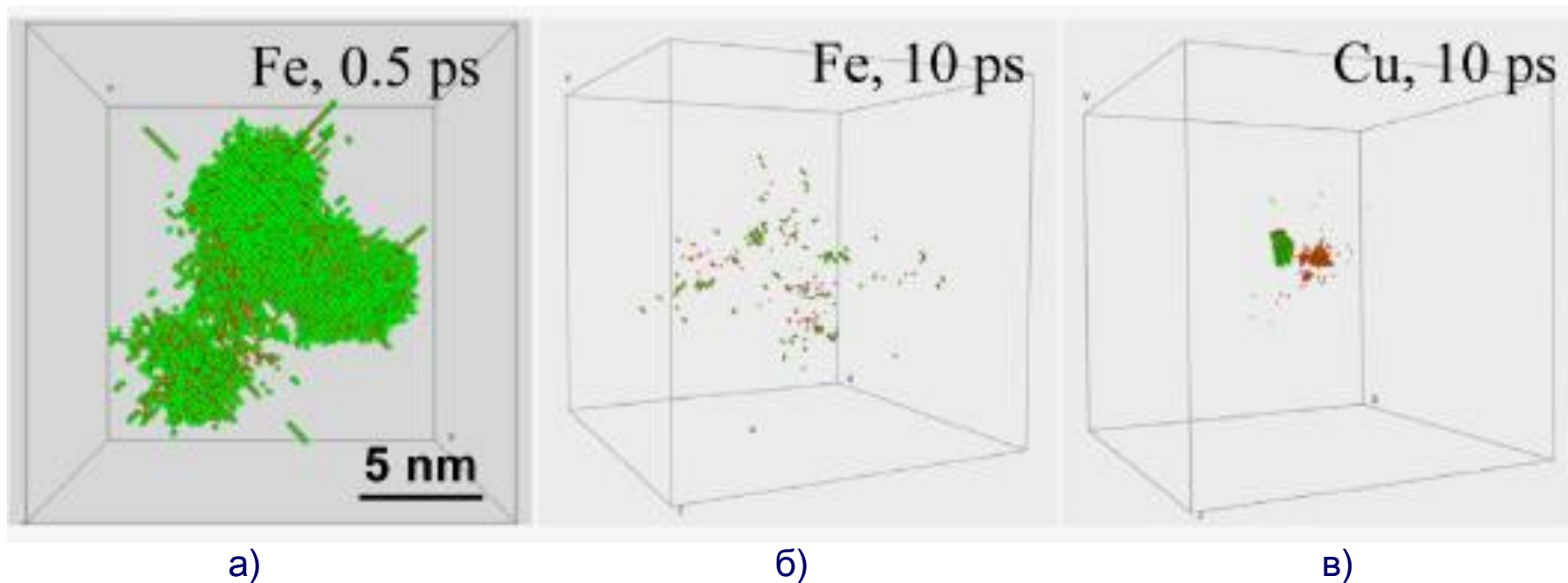
Моделирование механизмов упрочнения и стабилизации (ДУО сталей - упрочнение мелкодисперсными оксидными частицами Y-Ti-O)

5. Физическое моделирование реакторных материалов



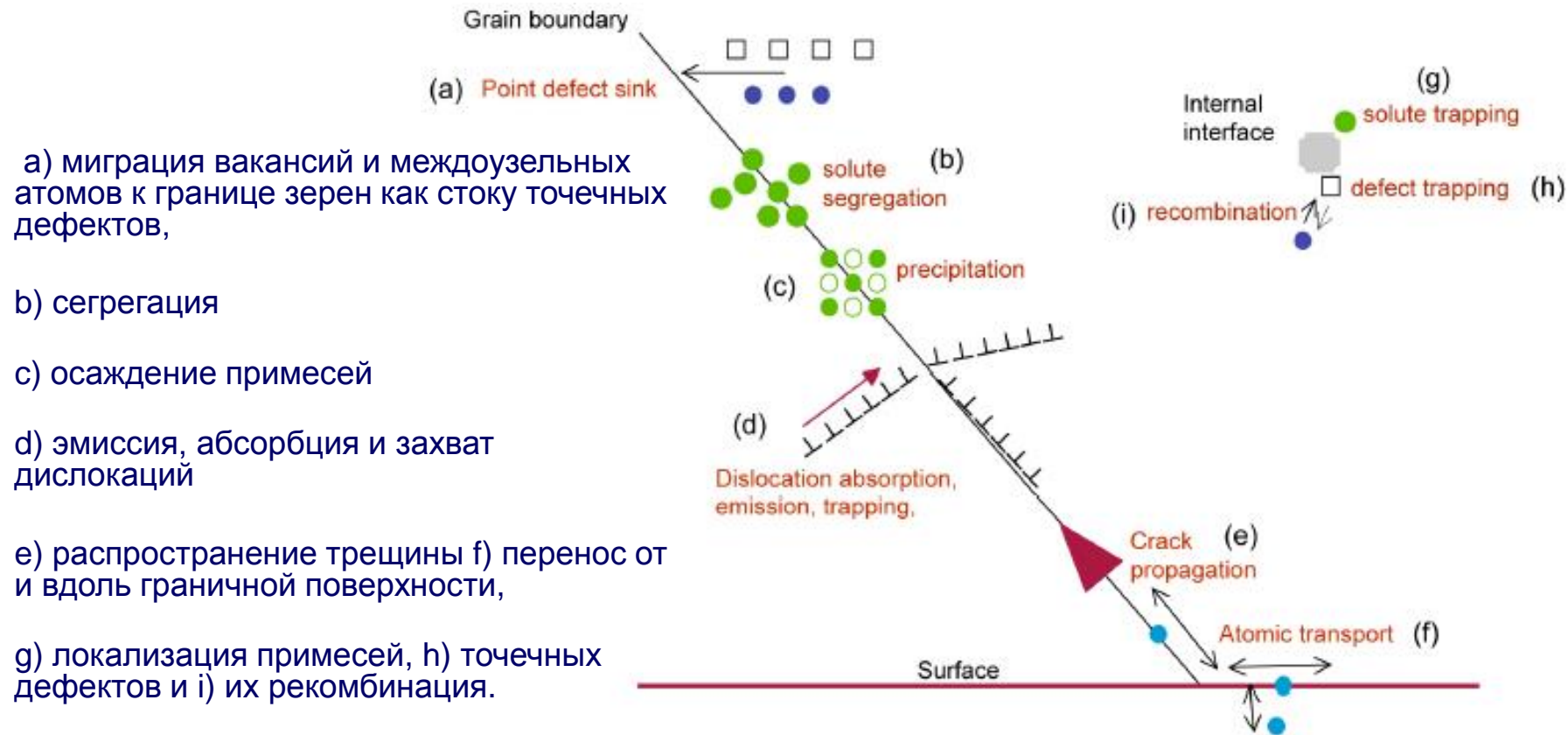
5. Материалы под облучением

«Мгновенные снимки» МД–генерации вакансий (красные точки) и междоузельных атомов (зеленые точки) в месте рассеяния нейтрона с энергией ~ 0.7 МэВ на железе (ОЦК) и меди (ГЦК) при максимуме точечных дефектов (а), после частичной их рекомбинации в «температурном пике» (б) и после охлаждения (в)



5. Материалы под облучением

Графическая модель межфазной границы как центра притяжения процессов, стимулируемых облучением, которые могут изменять структуру и состав материала, а следовательно, и его свойства



a) миграция вакансий и междоузельных атомов к границе зерен как стоку точечных дефектов,

b) сегрегация

c) осаждение примесей

d) эмиссия, абсорбция и захват дислокаций

e) распространение трещины f) перенос от и вдоль граничной поверхности,

g) локализация примесей, h) точечных дефектов и i) их рекомбинация.

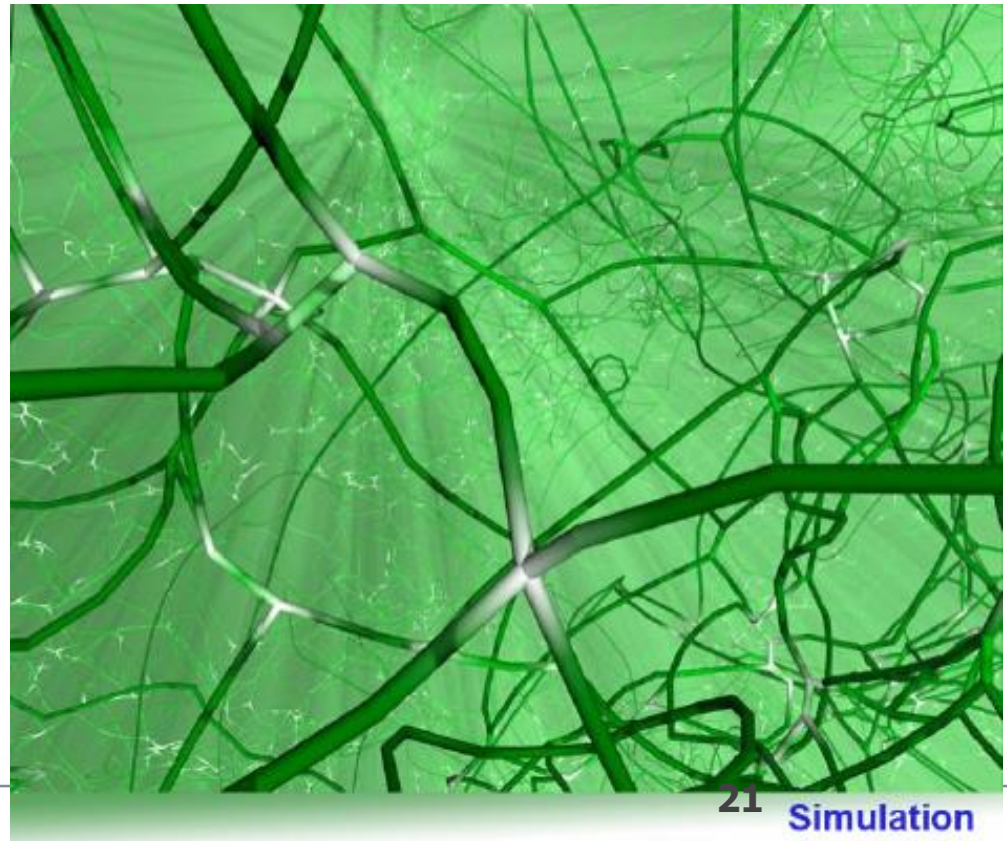
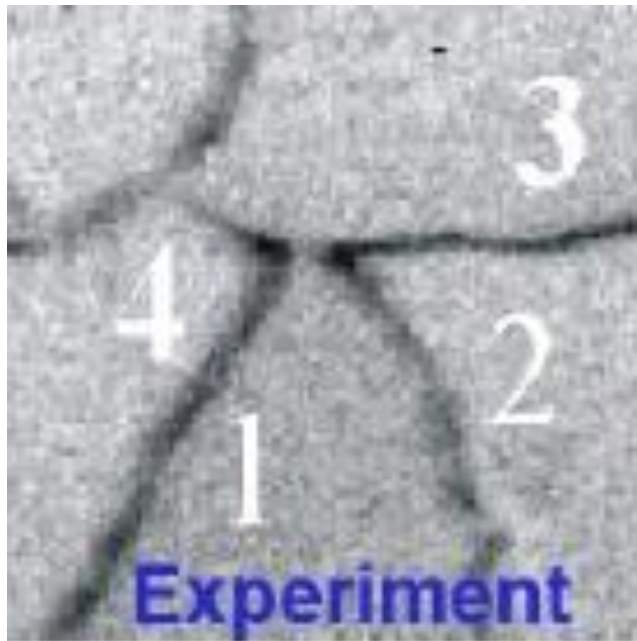
5. Моделирование систем под облучением



РОСАТОМ

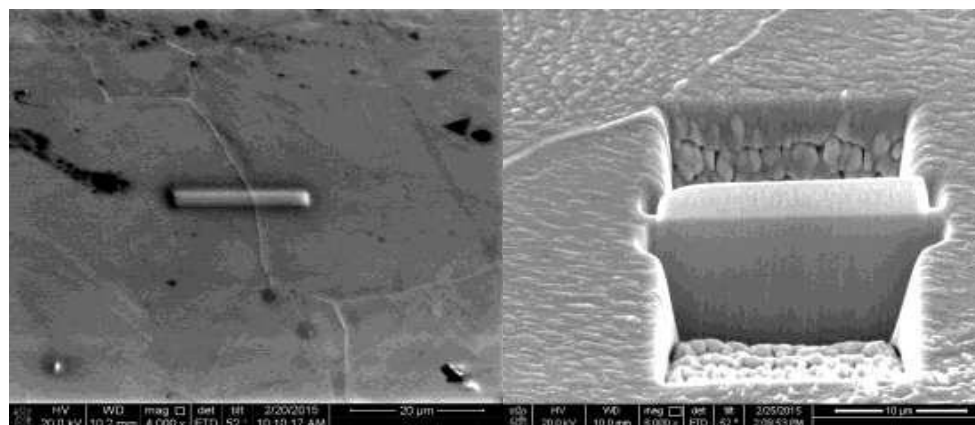
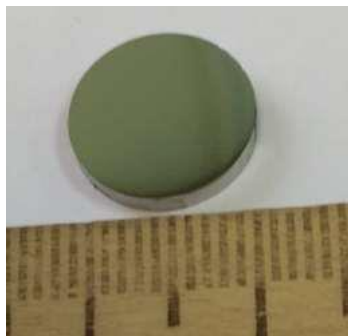
Моделированием на суперкомпьютере (LLNL, 10 тыс. параллельных процессоров) установлено, что упрочнение (закалка) металла происходит, когда дислокации связываются в узлы по четыре на каждый узел

Это подтверждается экспериментом, что открывает новые технологические возможности для упрочнения конструкционных материалов.



6. Методы ускоренных испытаний

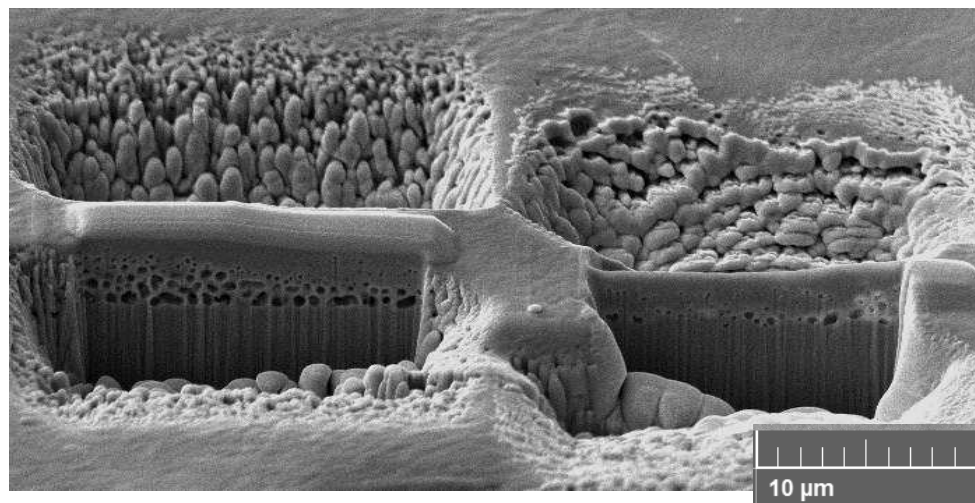
Общий вид
дискового
образца
для ионного
облучения
(D=12 мм, t=2мм)



Вырезка темплета из облученной поверхности
методом сфокусированного ионного пучка (FIB)



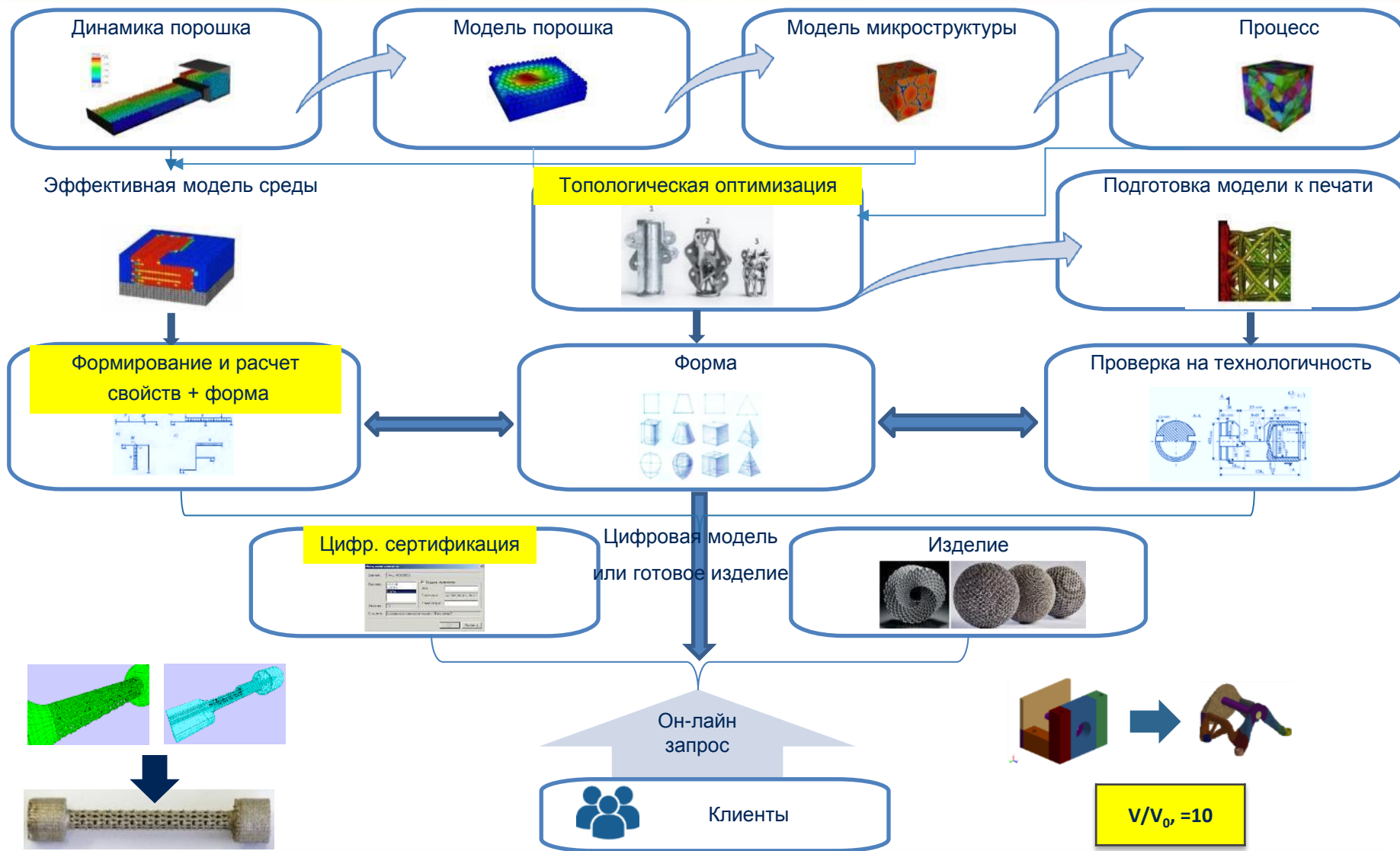
Ускоритель ионов TANDETRON
в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»



Неравномерность пористости
при облучении стали

Максимальная повреждающая доза $D_{max} = 185 \text{ сна}$
Температура облучения $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$

7. Новые материалы и цифровые технологии: свойства изделия



8. Основные задачи по разработке новых неядерных материалов в рамках Единого отраслевого тематического плана НИОКР Госкорпорации «Росатом»



<p>Водо-водяные энергетические реакторы</p> <ul style="list-style-type: none"> • Унификация стандартов хрупкой прочности свар. швов корпуса реактора • Нац. стандарты стойкости к межкристаллитной коррозии нержавеющей сталей • Цифровое управление качеством • Корпусная сталь и ВКУ ВВЭР С /СКД • Методы контроля • Сварочные материалы 	<p>Реакторные установки со свинцовым теплоносителем</p> <ul style="list-style-type: none"> • Обоснование ресурса до 30 и 60 лет • Методы контроля • Сварочные материалы 	<p>Жидко-солевые реакторы</p> <ul style="list-style-type: none"> • Состав топливной соли • Конструкционные материалы топливного контура • Конструкционные материалы установки переработки соли • Расчёты условий работы • Методы контроля • Сварочные материалы
<p>Изделия для РАО и ОЯТ</p> <ul style="list-style-type: none"> • Многослойные материалы • Методы контроля • Сварочные материалы 	<p>Атомные станции малой мощности</p> <ul style="list-style-type: none"> • Новая сталь повышенной прочности • Обоснование срока службы материалов на 30 и 60 лет • Методы контроля и сварочные мат-лы 	<p>Реакторы на быстрых нейтронах БН-1200</p> <ul style="list-style-type: none"> • Увеличение срока службы парогенератора до 60 лет • Методы контроля • Сварочные материалы
<p>Конструкционные материалы топлива</p> <ul style="list-style-type: none"> • Критерии разрушения и прочности • Радиационно-стойкие стали • Стали упрочн. дисперсными оксидами • Композиты SiC/SiC • Материалы тепловыделяющих элементов легководных реакторов • Поглощающие материалы • Методы контроля и сварочные мат-лы 	<p>Аддитивные технологии</p> <ul style="list-style-type: none"> • Виртуальный принтер • 3D-оборудования и технологий для печати металлических изделий • Сложнопрофильные и крупногабаритные изделия атомной энергетики • Механизмы управления кристаллизацией 	<p>Углеродные материалы и композиты</p> <ul style="list-style-type: none"> • Интеллектуальные композиты • Функциональные материалы • Радиационностойкие C-, C-C, C-Si – материалы • Биосовместимые углеродные материалы

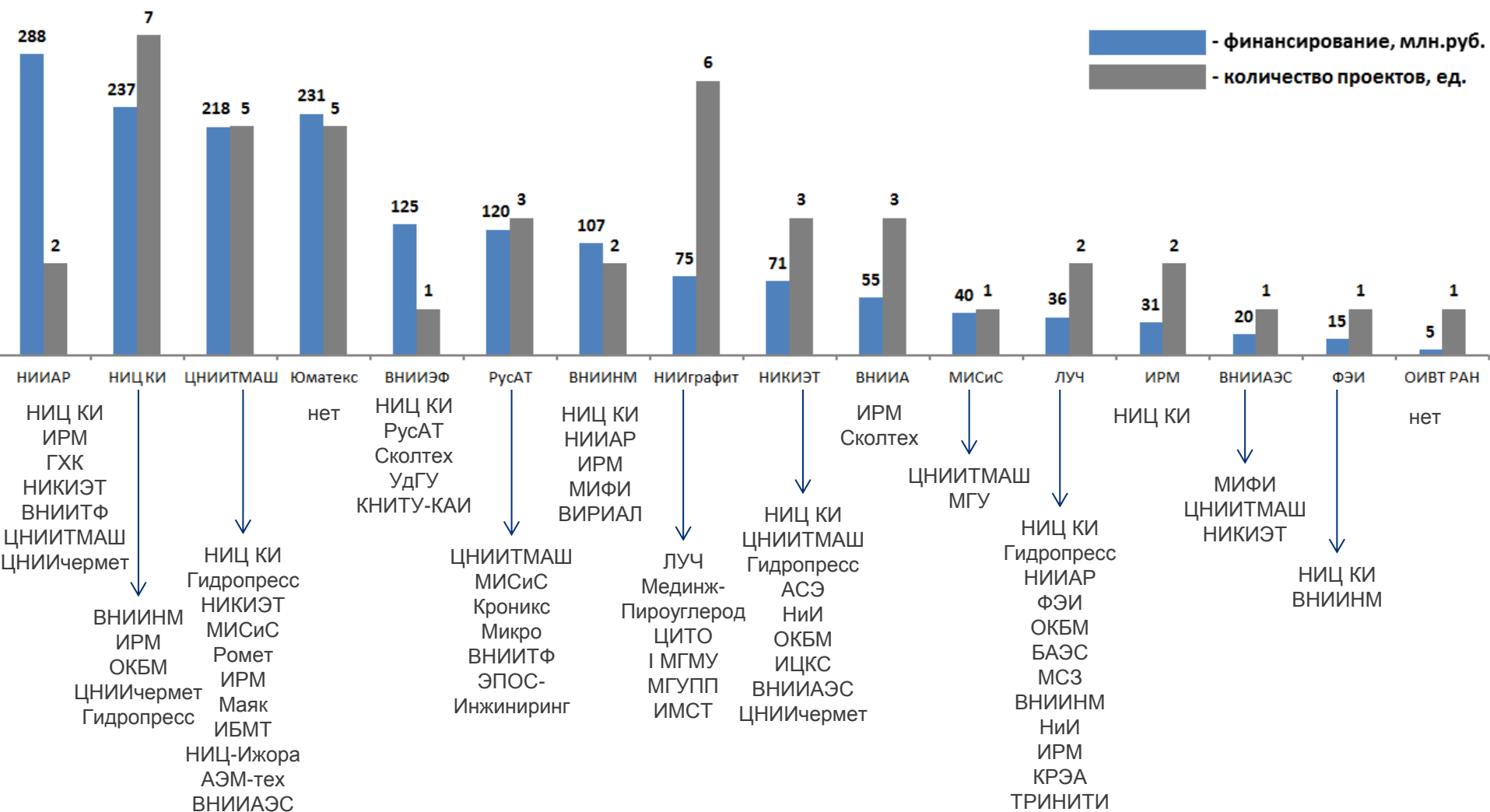
8. ЕОТП. Материалы и технологии



8. Распределение проектов по головным организациям и соисполнителям (2019 г)



РОСАТОМ



Спасибо
за внимание