



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

«Федеральный проект «Специальные материалы атомной энергетики» Национального Проекта НАиЭТ.

Цели, задачи проекта, результаты, перспективы и взаимосвязь работ по синтезу тяжелых ионов с другими работами ФП»

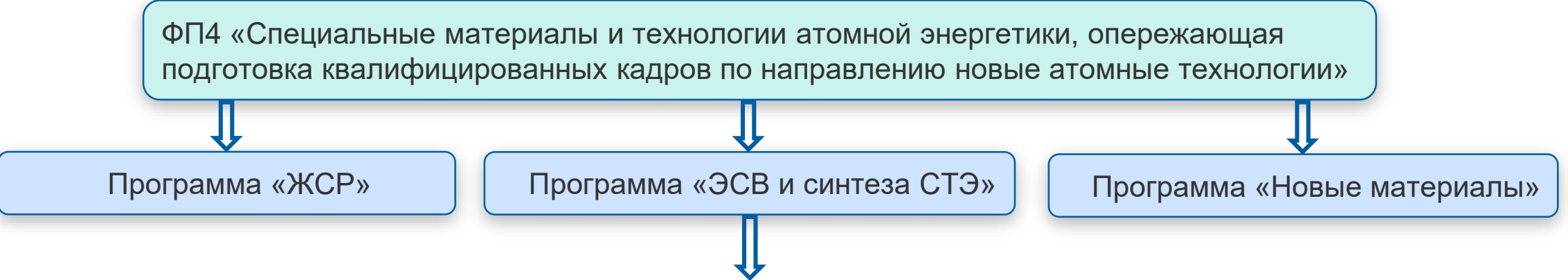
Сессия совета отделения физических наук РАН

28.06.2025

Дуб Алексей Владимирович

Первый заместитель директора ЧУ «Наука и Инновации»

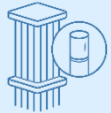
Финансирование Программы «НИОКР по разработке технологии экстремального состояния вещества и синтеза СТЭ»



Компонент	Исполнитель	Источник	Стоимость 2025, млн руб	Стоимость 2026, млн руб	Стоимость 2027, млн руб	Стоимость 2028, млн руб	Стоимость 2029, млн руб	Стоимость 2030, млн руб	Стоимость по проекту, млн руб	Итого, млн руб.
Разработка комплекса по синтезу сверхтяжёлых элементов, включая разработку технологий и получение изотопов для синтеза	ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ"	ФБ	540,0	576,8	0,0	450,0	1030,0	858,0	3 454,8	4 419,8
		ВнБ	0,0	80,0	620,0	265,0	0,0	0,0	965,0	



I. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ



КМ топлива



КМ тепломеханическое оборудование



КМ стратегических отраслей

II. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ГРАФИТ и РЗМ



Углеродное волокно



Композиционные и графитовые материалы



РМ, РЗМ, ЩЗМ, Магниты и Особо чистые вещества

IV. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



Металлические материалы



Керамические и полимерные материалы

III. ИНСТРУМЕНТЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ



Методы ускоренных испытаний



Цифровое материаловедение



Методика ионного облучения для подбора и обоснования применения новых материалов

АО «ГНЦ РФ - ФЭИ», НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ «Прометей», ИТЭФ



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
ROSATOM



Качественная методика

- **Время изучения** 1 материала: **36** месяцев
- Большой объем **имитационных** исследований на ускорителях сталей для **ВКУ** реактора **БН-1200**, для **ВКУ** реактора **ВВЭР СКД**, для АЗ реактора **БН-1200** и **референтных** сталей (08X18H10T, ЭП-823) и ЭП450 **до 200-250 сна**

Количественная методика

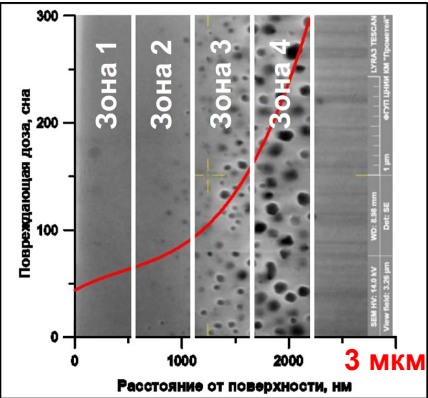
- **Время изучения** 1 материала: **3** месяца
- Учтено влияние химического состава, микроструктуры и технологии изготовления
- Методы определения **радиационной стойкости** сталей при **высокодозном** облучении

Проект ГОСТ (Первая редакция Методики)

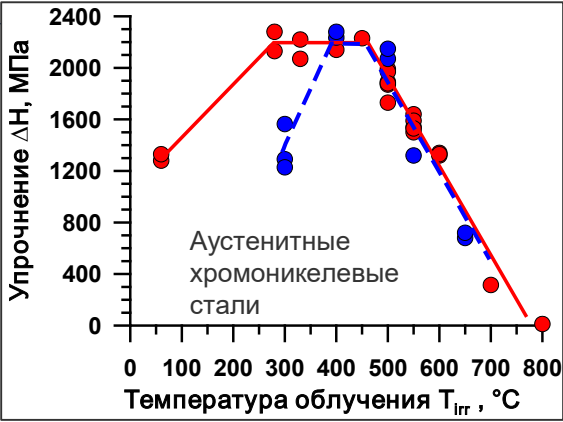
Программа стандартизации Госкорпорации «Росатом» (Приказ 1/66-П от 20.01.2025).

Вторая редакция Методики, дополненной Методами испытаний:

- **ВТРО** (Высокотемпературное радиационное охрупчивание)
- **Радиационная ползучесть** ФМ и аустенитных сталей
- **Коррозионное растрескивание** аустенитных сталей (среды, близкие к эксплуатационным)



Тип облучения	Средняя продолжительность исследования	Средняя стоимость работ по облучению одного материала
Реакторное	5-10 лет	~100 млн. руб.
Ионное	3 месяца	10-20 млн. руб.

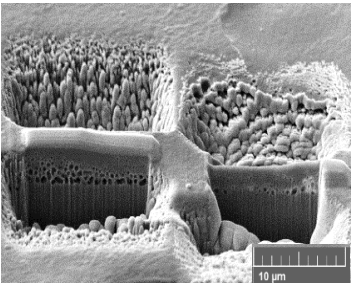


Критерии валидации Методики

1. Соответствие механизмов деградации
2. Подобие характеристик упрочнения и сопротивления разрушению
3. Подобие микроструктуры

Соответствие количественных характеристик:

- Диаметр и концентрация **вакансионных** пор
- Диаметр и концентрация **дислокационных** петель



Сопоставление упрочнения материала в зависимости от температуры облучения для ионного и нейтронного облучения

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Технология управления структурой материала



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

2024

- ✓ ПО «Слайсер» для установок селективного лазерного плавления с возможностью управления структурой материала (СЛП-УС).

Технология:

Изучены механизмы управления характеристиками материала СЛП-УС:

Микроуровень - проведены численные эксперименты, которые показали увеличение числа и размеров кластеров в зависимости от степени переохлаждения;

Мезоуровень - измельчение структуры в 1,5-2 раза;

Макроуровень - предел прочности – на **30%** выше требований ASTM* и на **17%** выше образцов СЛП без воздействия, предел текучести – на **50%** выше требований ASTM* и на **15%** выше образцов СЛП без воздействия.

Оборудование:

- ✓ Разработан и испытан опытный образец установки **СЛП-УС**.

2025-2030

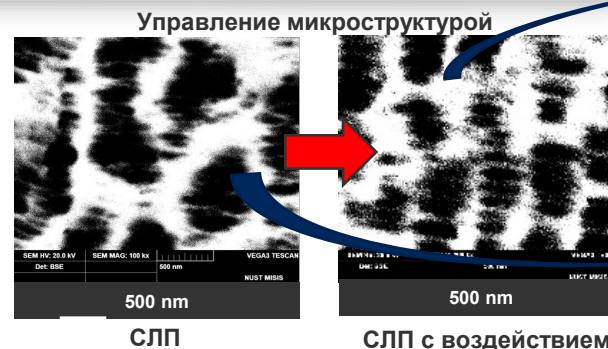
- ✓ ПО на основе феноменологической модели для прогнозирования структуры материала целевых изделий в процессе СЛП-УС;
- ✓ ПО «Слайсер» для установок прямого лазерного выращивания (ПЛВ).

Технологии:

- ✓ Подтверждены механизмы управления характеристиками материала СЛП-УС при изготовлении целевых изделий;
- ✓ Проведены реакторные испытания материала СЛП-УС;
- ✓ Изучены механизмы управления характеристиками материала, изготовленного методом ПЛВ.

Оборудование

- ✓ Проведены опытно-промышленные испытания установок **СЛП-УС**;
- ✓ Разработан и испытан опытный образец установки **ПЛВ** с возможностью управления структурой материала.



2030-2045

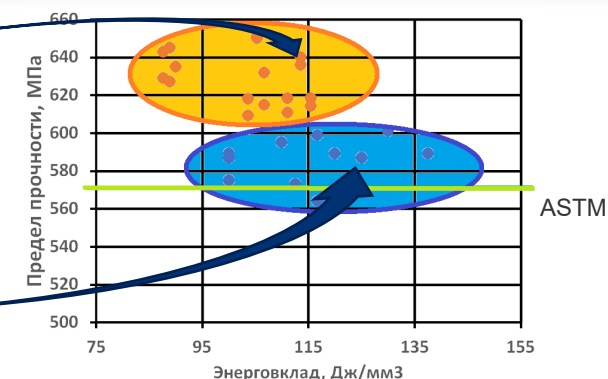
- ✓ ПО на основе феноменологической модели (как базовый элемент) для прогнозирования структуры материала целевых изделий в процессе ПЛВ.

Технологии:

- ✓ Механизмы управления характеристиками материала СЛП-УС внедрены в серийное производство изделий ОИАЭ;
- ✓ Подтверждены механизмы управления характеристиками материала ПЛВ при изготовлении целевых изделий;
- ✓ Проведены реакторные испытания материала ПЛВ.

Оборудование

- ✓ Серийное производство установок **СЛП-УС**;
- ✓ Проведены опытно-промышленные испытания установок **ПЛВ** с возможностью управления структурой материала.



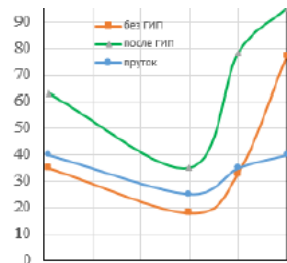
ЦЕЛЬ Обеспечение характеристик материалов на новых физических принципах.

Цифровые инструменты для индустриализации аддитивных технологий

Проектирование

База данных свойств материалов синтезированных АТ

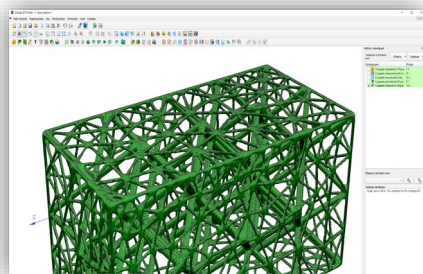
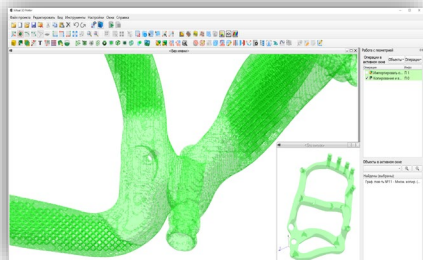
База данных свойств материалов синтезированных технологиями аддитивного производства: от исходного порошка до технологических режимов, микроструктуры, а также механических и эксплуатационных свойств



БД «Материалы АТ»

Разработка геометрии изделия (CAD)

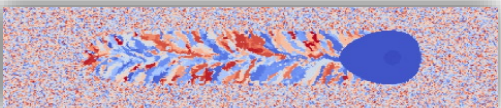
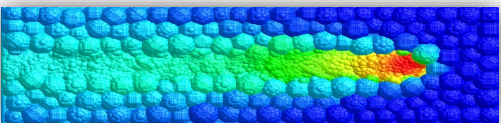
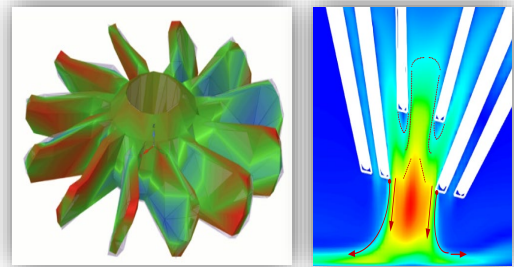
Геометрическое моделирование трёхмерных объектов, топологическая оптимизация генерация решетчатых структур, включая вписывание решетчатых структур в зависимости от назначения и условий эксплуатации



Подготовка производства

Математическое моделирование (CAE)

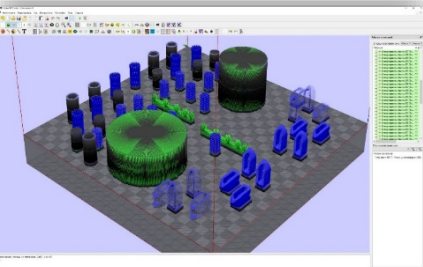
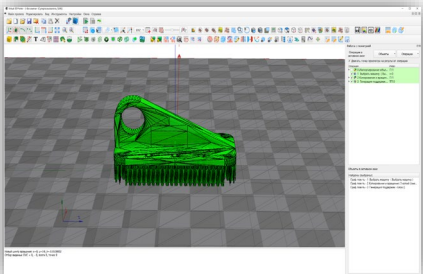
Моделирование физических процессов аддитивных технологий (технологии селективного лазерного сплавления и прямого выращивания) на разных масштабных уровнях: прогнозирование геометрии детали (короблений), микроструктуры и свойств материала



ПК «Виртуальный принтер»

Технологическая подготовка производства (CAM)

Подготовка и оптимизация процесса печати: создание поддерживающих структур, стратегии печати, размещения деталей в зоне печати



Печать

Программно-аппаратная платформа для оборудования АТ

Программно-аппаратная платформа для управления процессом печати с применением систем мониторинга и контроля в реальном времени для обеспечения стабильности качества синтезированного материала



Оборудование



Изделия из жаропрочных\тугоплавких материалов (Mo, Nb, W) и сплавов на их основе

Исполнители: АО «НИИ НПО «ЛУЧ»

Результаты:

- Технология изготовления монокристаллических сырьевых прутков
- Технический проект на установку электронно-лучевой аддитивной наплавки
- Технология и оборудование изготовления изделий из тугоплавких металлов (**Mo, Nb, W**) и сплавов на их основе методом селективного электронно-лучевого плавления с высокотемпературным подогревом рабочей зоны (ВТСЭЛП)
- Технология и оборудование выращивания дисковых заготовок методом электронно-лучевой аддитивной наплавки.
- Комплекс свойств изделий, изготовленных на установках.



Эффект:

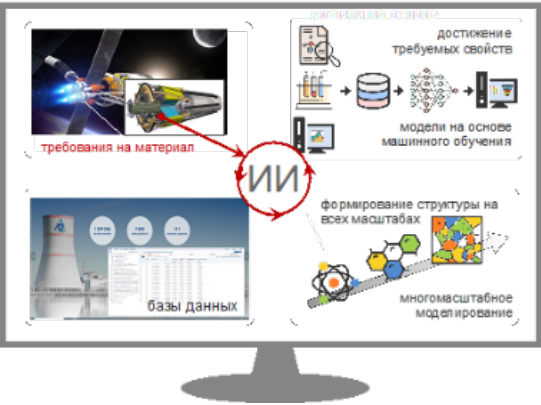
- ✓ Технология, позволяющая снизить трудозатраты и время производства в 3-4 раза крупногабаритных изделий.
- ✓ Изготовление сложногопрофильных высоконагруженные изделия из тугоплавких металлов с ранее недостижимыми механическими характеристиками (рабочий диапазон температур от **1100 °C** до **1800 °C** и боковое усилие - 1750Н) и возможным размером получаемой заготовки: 1000мм в трех измерениях.
- ✓ Изделия для аэрокосмических двигателей (рабочий диапазон температур от 1100 до 1800°C и боковое усилие - 1750Н.)
- ✓ Изделия для **ЯЭУ** (**550** мм и **130** мм в диаметре) выдерживающие механические и радиационные нагрузки при температурах до **1300 °C**.

Производственные заказы:

- ✓ Обеспечено производство для **внеотраслевых** заказчиков дисков и лопаток турбин, заслонок форсунок, регуляторов частоты вращения, узлов крепления
- ✓ Обеспечено производство для **отраслевых** заказчиков заготовок (дистанционирующие решетки, гильзы систем управления защиты, вытеснители)

Автоматизированный синтез материалов с заданным набором физико-механических характеристик

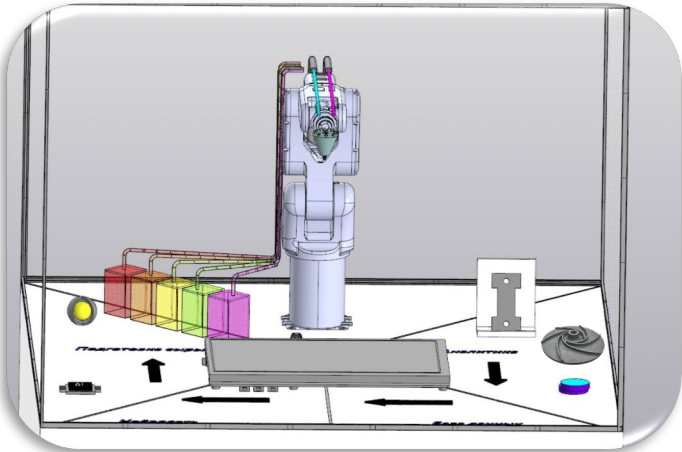
данные



Создание рецептуры новых материалов с помощью методов ИИ

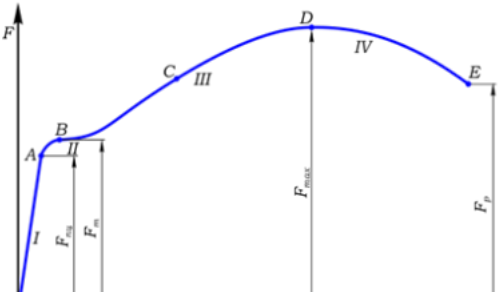
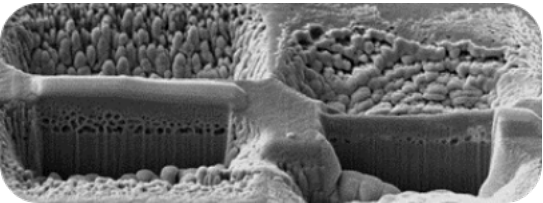
Программно-аппаратный комплекс для синтеза новых материалов

задание на синтез



синтез

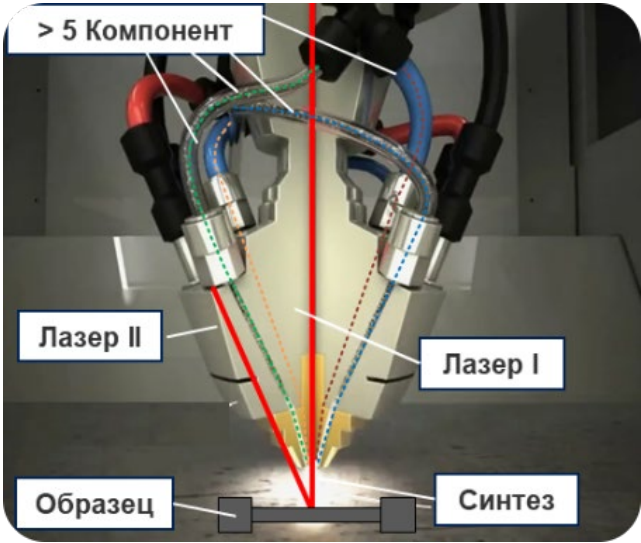
Новые материалы
для технологий
будущего



Анализ микроструктуры и свойств образцов

образцы

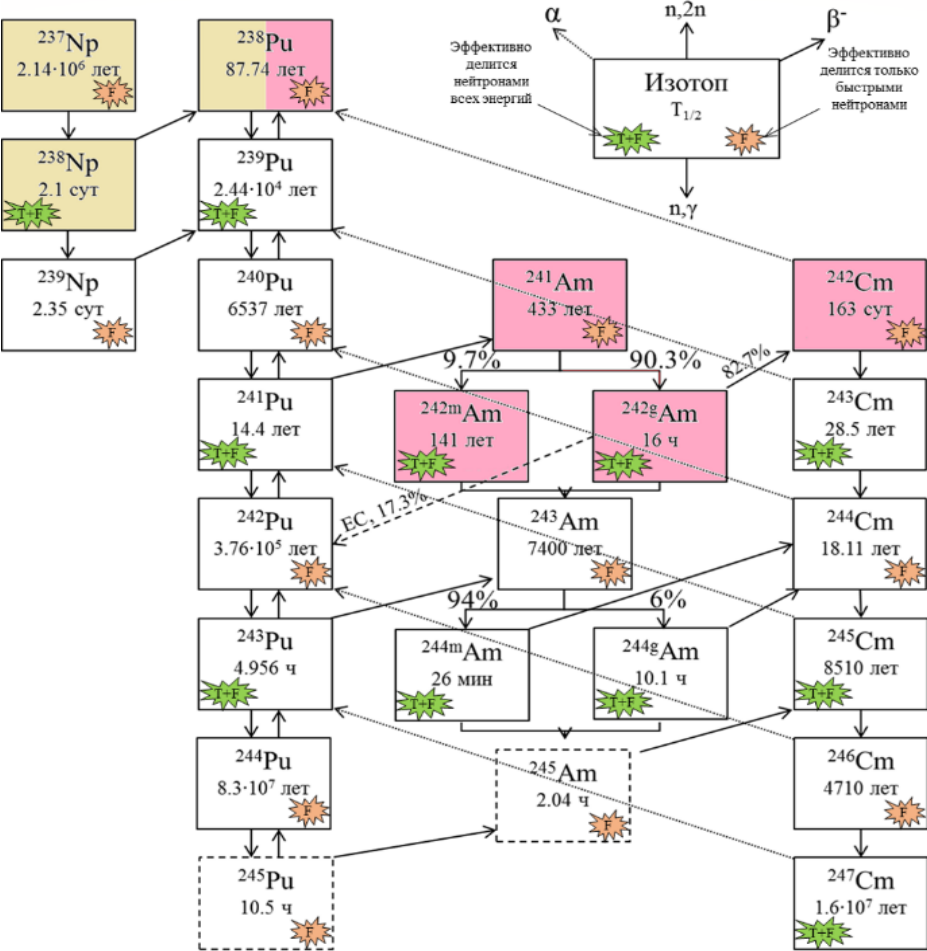
Сопло для синтеза новых материалов (Лазер I) с управлением свойствами (Лазер II)



Физические особенности Cm и Pu



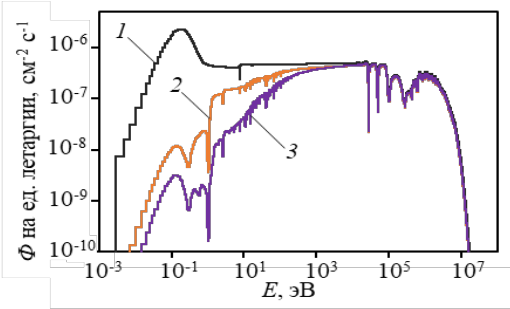
НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ



Основной канал утилизации МА в ЖСР-С –
деление дочерних ядер

Состав Pu и Cm соответствует ОЯТ ВВЭР с
выгоранием 5%т.а. и выдержкой 10 лет

Изотоп	Содержание в смеси, %	σ_f , барн	σ_c , барн
^{238}Pu	2,6	1,99	10,19
^{239}Pu	55,7	21,93	14,12
^{240}Pu	26,4	0,25	48,69
^{241}Pu	8,8	35,71	11,66
^{242}Pu	6,6	0,13	35,95
Pu		15,50	24,32
Cm-243	1,693	180.0	29.0
Cm-244	85,42	0.5	21.0
Cm-245	11,88	283.6	42.2
Cm-246	0,986	0.3	5.0
Cm-247	0,00080	66.3	33.8
Cm		39,31	24,25



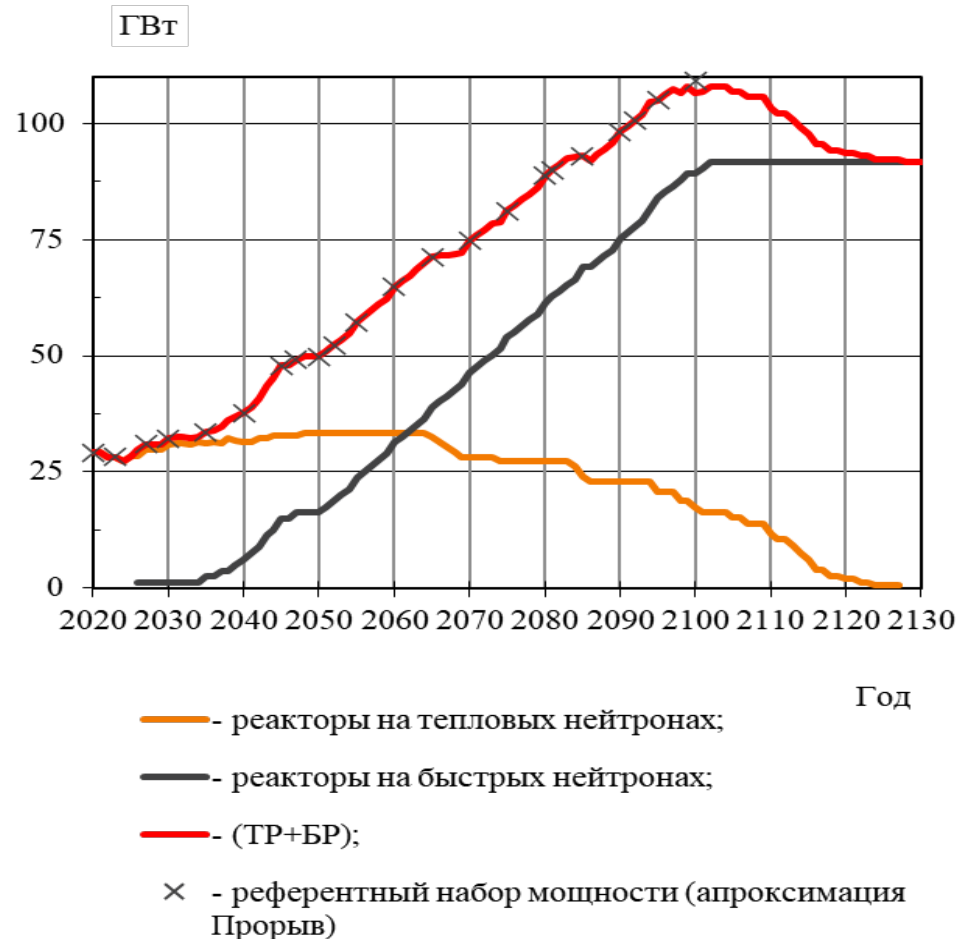
Спектр ППН. 1-соль+CmF₃, 2 Соль+ PuF₃ ,
3 - соль+ PuF₃ + AnF₃

Трансмутация кюрия в ЖСР-См для ЯЭ России



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

Мощность АЭС с ТР и БР в
рассмотренном сценарии ЯЭ России



- Расчеты одного из сценариев развития ЯЭ России, рассмотренного в ПН Прорыв, показывают, что среднее годовое количество См, выделяемое в год из ОЯТ ТР и РБН в период 2050—2100 годов, составит примерно 180 кг/год. Исходя из этого на указанный период тепловая мощность ЖСР-См должна быть 550-600 МВт при КИУМ 82%.
- Стартовая загрузка кюрия в ЖСР-См ~133 кг. Выход на равновесный режим подпитки около 3 лет.
- За время работы ЖСР-См будет трансмутировано 95% загруженного См практически без накопления вторичных долгоживущих актинидов. Основная «примесь» - плутоний, менее 1%.

Конструктивная схема и основные характеристики ЖСР-С/ ЖСР-См

Параметр	Значение	
Тепловая мощность ЖСР-С/ЖСР-См, МВт	2 400	600*
Кампания, лет	50	
КИУМ	0,82	
Высота цилиндрической части части а.з., см	400	~190
Радиус активной зоны, см	190	~100
Ежегодная загрузка МА в равновесном режиме работы, кг	250	180 (См)
Ежегодная загрузка плутония в равновесном режиме работы, кг	500	Нет
Тип реактора	Гомогенный, жидкосолевой	
Несущая соль	73 LiF - 27 BeF ₂	
Температура на входе в активную зону, °С	630	
Температура на выходе из активной зоны, °С	700	
Плотность топливной соли, г/см ³	2,115	~1,95
Молярная доля ТУЭ в топливе в равновесном режиме работы, %	1,25	~0,14
Средняя ППН в а.з., н/(см ² с)	7,7 10 ¹⁴	~1,4*10 ¹⁵
Максимальная ППН в а.з., н/(см ² с)	10 ¹⁵	~1,8*10 ¹⁵

* - Предварительная проработка

