



РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»



Направления исследований и физические вопросы в международных проектах Международный форум Поколение IV и ИНПРО

Усанов В.И.
АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»

Научно-техническая конференция «Нейтронно-
физические проблемы атомной энергетики –
Нейтроника-2019»
Обнинск, 27 – 29 ноября, 2019

В 2000 году практически одновременно были организованы два крупных международных проекта в области ядерной энергетики:

- *Международный проект по инновационным реакторам и топливным циклам (ИНПРО) в МАГАТЭ*, инициированный Россией, и
- *Международный форум Поколение – 4 (МФП)*, инициированный США в тесном взаимодействии с агентством по ядерной энергии (*NEA*) в структуре *ОЭСР (OECD)*

Цель проектов - кардинальным образом улучшить ядерную энергетику в областях экономики, нераспространения, ресурсов и экологии

Инструментами решения поставленных сложных задач по поиску ответов на современные вызовы были признаны инновации в технологической сфере, а также инновации в институциональной сфере (законодательство, образование и т.д.)

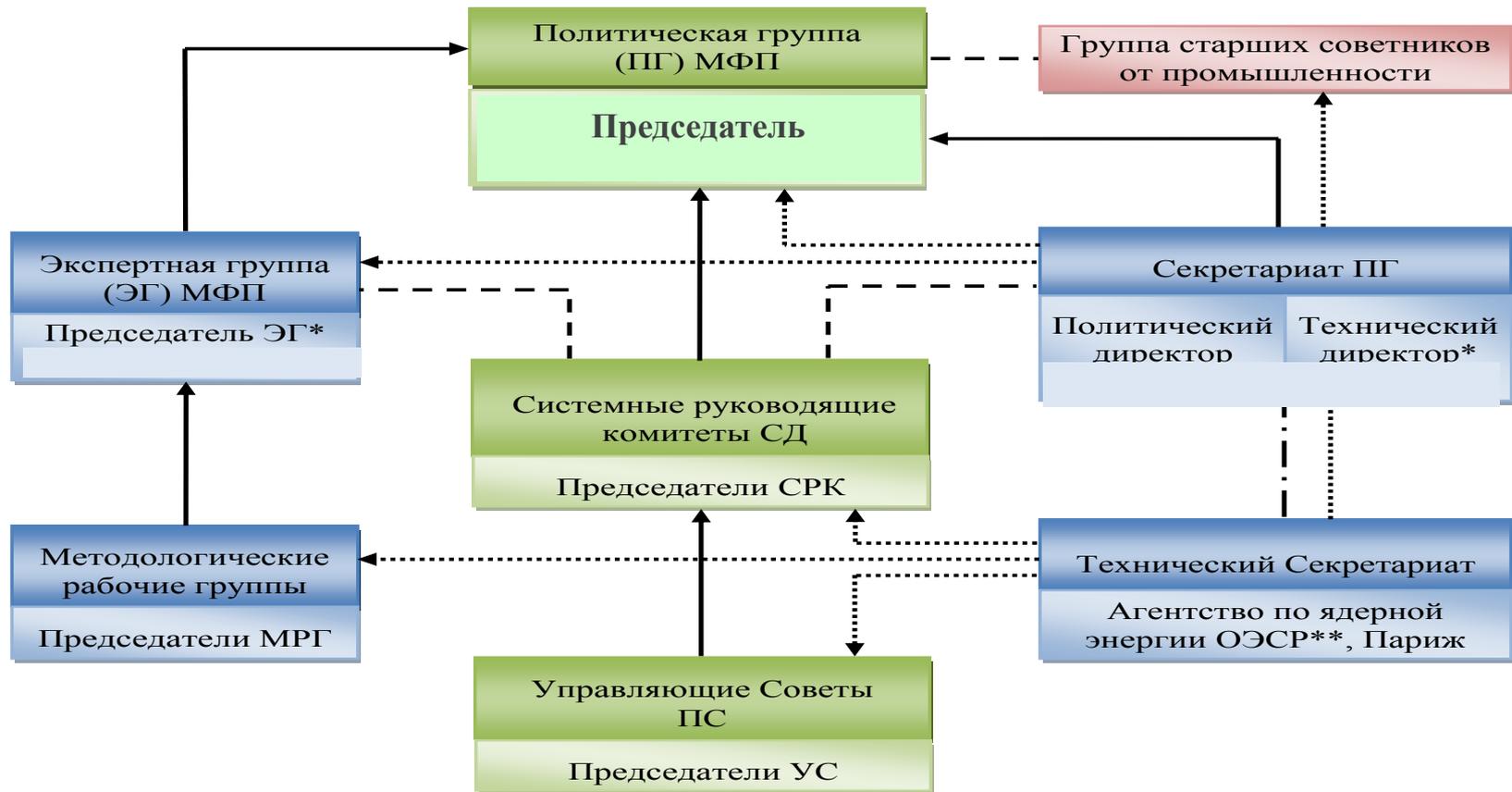
Проекты действуют как взаимодополняющие исследовательские направления:

- *МАГАТЭ/ИНПРО* – исследование перспектив устойчивого развития
- *МФП* – разработка инновационных реакторных технологий и систем.



Международный форум Поколение – 4 (МФП)

Организационная структура МФП



* Технический директор является председателем Экспертной группы

** Организация экономического сотрудничества и развития

- Отчетность
- Взаимодействие Секретариата
- - - Тесная связь
- · - Координация

Выбор инновационных реакторных технологий четвертого поколения для разработки в МФП



Для разработки в качестве реакторных систем *Поколения – 4* были выбраны шесть систем:

- ***РБН*** – быстрый натриевый реактор;
 - ***СВТГР*** – сверхвысокотемпературный газовый реактор;
 - ***СКВР*** – сверхкритический водяной реактор;
 - ***БГР*** – быстрый газовый реактор;
 - ***СБР*** – свинцовый быстрый реактор;
 - ***ЖСР*** – жидкосолевой реактор.
- 14 стран и организаций подписали к настоящему времени Рамочное соглашение (Хартию) МФП и являются официальными членами МФП

Реакторные системы (1/2)

РБН - быстрый натриевый реактор:

- Назначение – замыкание ЯТЦ с Ру и МА,
- Конструкция - корпусная или петлевая компоновка, модульный (от 50 до 150 МВт) или интегральный (от 300 до 1500 МВт)
- Топливо: МОКС, металлическое, СНУП
- Переработка топлива: усовершенствованная водная или пирометаллургическая.

БГР - быстрый газовый реактор:

- Назначение – развитие направления БР, ЗЯТЦ с Ру и МА, достижения высоких температур
- Конструкция - БР с газовым охлаждением химически инертным теплоносителем (гелием) с архитектурой безопасности, которая должна отвечать требованиям П-4
- Топливо: плотное топливо (карбид или нитрид), способное работать при высоких температурах.

СВТГР – сверх высокотемпературный газовый реактор:

- Назначение – высокотемпературные процессы (производство водорода, термохимия и т.д.), температура на выходе а.з. выше 900 °С, цель 1000 °С
- Тепловой спектр нейтронов, гелиевый теплоноситель, графитовый замедлитель, топливо - многослойные частицы с графитом и керамическим покрытием (TRISO)

СБР - свинцовый быстрый реактор:

- Назначение – развитие направления БР, ЗЯТЦ с Pu и выжиганием МА, повышение безопасности
- Теплоноситель – свинец или эвтектика свинец / висмут. Варианты конструкция - 50–150 МВт ALFRED (ЕС), SSTAR (США, с большим сроком службы), 300–600 МВт (ELFR (ЕС), БРЕСТ-300 (РФ) и БРЕСТ-1200 (РФ).
- Топливо: УОКС, МОКС, СНУП
- Переработка топлива: усовершенствованная водная или пирометаллургическая.

ЖСР - жидкосолевой реактор:

- Назначение – минимизации радиоактивных ядерных отходов, включая эффективное сжигание трансурановых элементов из ОЯТ ЛВР
- Конструкция - реактор на расплавах солей с жидким топливом и спектром нейтронов от теплового до быстрого

• **СКВР** - сверхкритический водяной реактор:

- Назначение - повышению КПД и экономичности.
- Конструкция - реакторы со сверхкритическими параметрами воды (374 °С, 22,1 МПа) мощностью от 30 до 150 МВт со спектром как тепловых, так и быстрых нейтронов.

Действующие и готовящиеся системные договоренности (СД) и проектные соглашения (ПС)



Название СД/ПС	Начало действия	Евратом	Франция	Япония	Китай	Ю. Корея	РФ	Швейцария	США
СД: БР с натриевым теплоносителем	15.02.2006 16.02.2016	П	П	П	П	П	П		П
• Топливо (ПС)	21.03.2007	О	О	О	О	О	О		О
• Оборудование (ПС)	11.10.2007	Н	П	П	Н	П	Н		П
• Безопасность и экспл. (ПС)	11.06.2009 12.11.2012	П	П	П	П	П	П		П
• Системная интеграция (ПС)	22.10.2014	П	П	П	П	П	П		П
СД: Быстрый газовый реактор	17.12.2016	П	П	П					
СД: Сверх высокотемпературный газовый реактор	30.11.2016	П	П	П	П	П		П	П
СД: Сверхкритический водяной реактор	30.11.2006 30.11.2016	П		Н	П		П		
МОВ: БР со свинцовым теплоносителем	11.2010	П		П	П	П	П		Н
МОВ: Жидкосолевой реактор	10.2010	П	П	Н	Н	Н	П	П	П

П – подписант; ПП – в процессе подписания; В – временный участник; Н – наблюдатель; О – остановка заключения СД/ПС или его продления

Основные направления исследований и разработок

- **Перспективные виды топлива** – металл, нитрид, карбид; расплавы солей
- **Теплоносители** – газ и свинец в БР, расплавы солей
- **Новые активные и пассивные системы безопасности**
- **Конструкционные материалы** – металлы, графит, керамика и композиты для высоких и сверхвысоких температур и высоких нейтронных флюенсов
- **Радиохимическая переработка топлива и РАО** – пирометаллургическая и ее сочетание с гидрометаллургической, разработка систем отбора и переработки топлива ЖСР
- **Системы преобразования энергии** – газовая турбина, сверхкритические параметры воды и газа (CO₂)
- **Экономика** - снижение полных капитальных затрат (малые модульные реакторы), гибридные системы ВИЭ – АЭС
- **Технические и технологические меры усиления защищенности от распространения**
- **Методы расчета, компьютерные коды, бенчмарки.**

- Исследования выполняются в основном с использованием национальных инструментов и методов расчета, компьютерных кодов и бенчмарков, разрабатываемых в рамках деятельности **АЯЭ (NEA) ОЭСР**
 - **В программу «Ядерная наука»** комитета по ядерной науке (NSC) **АЯЭ** входит:
 - физика реактора
 - физика и химия топливных циклов
 - ядерная безопасность по критичности
 - материаловедение
 - радиационная защита
 - ядерные данные.
 - **Работа выполняется в рабочих и экспертных группах по научным вопросам:**
 - реакторных систем, топливного цикла, критичности и ядерной безопасности, топлива и конструкционных материалов
 - оценке ядерных данных, интегральных экспериментов для обращения с МА, анализа экспериментальных данных, бенчмарков и валидации
 - по исследовательским и экспериментальным реакторам и установкам и др.

Краткий обзор проектов с активным российским участием: ЖСР (MSR), СБР (LFR), РБН (SFR) (1/3)



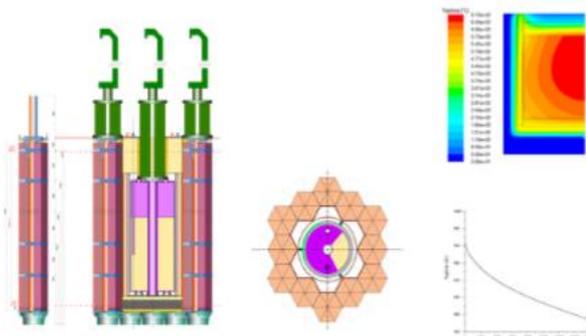
ЖСР:

- расплавленная соль - топливо и теплоноситель
- топливо из LWR или сжигание ВОУ, Pu и МА
- низкое давление и др.

Участники: Австралия, Евратом, Франция, РФ, Швейцария, США и Канада (2019 МОВ)

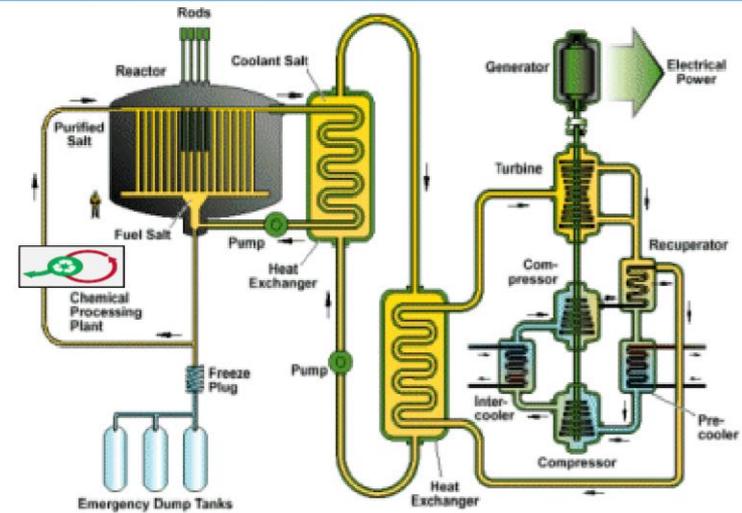
Наблюдатели: Китай, Ю. Корея, Япония

Design of heated zone for FLIBE salt



Статус ЖСР:

- Активная деятельность, но много разных концепций (шесть)
- Новый проект ЖСР ЕВРОАТОМА САМОСЭЙФЕР выбран для финансирования
- Опубликована Белая книга по безопасности MSR



Расчетные и экспериментальные исследования:

- поиск оптимальной конструкции из шести
- методы расчета, компьютерные коды, валидация и бенчмарки, в том числе по нейтронике
- свойства расплавов солей и конструкционных материалов (температуры плавления, токсичность, коррозия, растворимость актинидов и ПД, рециклирование и др.
- экономика и затраты.

Краткий обзор проектов с активным российским участием: **ЖСР (MSR), СБР (LFR), РБН (SFR) (2/3)**



СБР

Участники: ЕС, РФ, США,
Япония, Р. Корея, Китай (2019)

Состояние дел:

- Завершена оценка безопасности LFR
- Документ по проектным критериям безопасности LFR пересмотрен после комментариев, полученных от Рабочей группы по рискам и безопасности и США
- Подготовлена Белая книга по вопросам нераспространения и физической защиты
- Выполнен запрос на вклад в Годовой отчет 2019

Вклад участников проекта в 2019г:

Япония: результаты проведенных тестов по окислации сплавов свинца

Республика Корея: концепция микро-модульного свинцово-висмутового реактора без перегрузки для морских судов **MicroUranus**

ЕВРОАТОМ: результаты деятельности по проектам **MIRRHА** и **ALFRED** (Advanced LFA Demonstrator – возможное развитие в направлении большого ELFR или SMR)

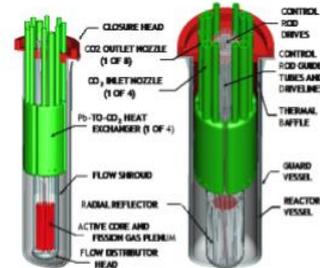
США: **SSTAR** и три других концепции **LFR SMR**

КИТАЙ: Мини **SMR** со свинцовым теплоносителем **Clear M10**

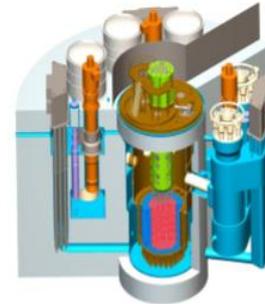
РФ: концепция свинцового быстрого реактора **БРЕСТ-300, НИОКР, сооружение и идеология** в целом. Перспективы направления критически зависят от состояния дел в России

Референсные системы

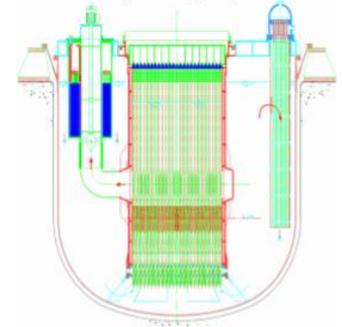
SSTAR
(USA)



BREST-OD-300
(Russia)



ELFR
(Europe)



Краткий обзор проектов с активным российским участием: **ЖСР (MSR), СБР (LFR), РБН (SFR) (3/3)**



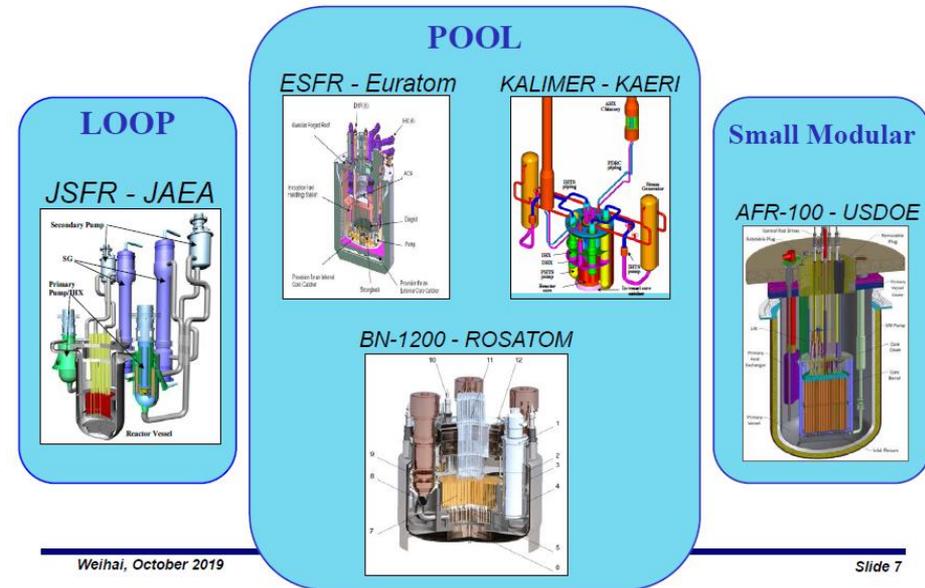
РБН Участники: Евратом, РФ, Франция, Япония, Китай, Р. Корея, США
5 концепций (design tracks): петлевая (JSFR), интегральная (KALIMER600, ESFR, BN1200), SMFR

Общие черты:

- Наличие стратегии и планов внедрения РБН
- НИОКР по ключевым направлениям
- Создаваемая структура замкнутого ЯТЦ
- Основные физические вопросы в проектном соглашении по безопасности и эксплуатации:
 - разработка и проверка вычислительных инструментов – проведение бенчмарков
 - эксперименты в поддержку и проверку конкретных функций безопасности
 - анализ опыта и испытаний на действующих SFR

Вклад участников в 2019 году

- **Евроатом:** руководство по проектированию натриевых контуров
- **JAEA:** система пассивного останова реактора
- **CAEA:** оценка, оптимизация и демонстрация топлива SFR без МА
- **DOE:** оптимизация и демонстрация технологии изготовления металлического топлива с МА



ROSATOM: завершение оценки БН-1200 на основе методики, разработанной в МФП,
- разработка кода COREMELT3D для анализа переходных процессов и аварий в SFR
- оценка, оптимизация и демонстрация СНУП топлива SFR с МА

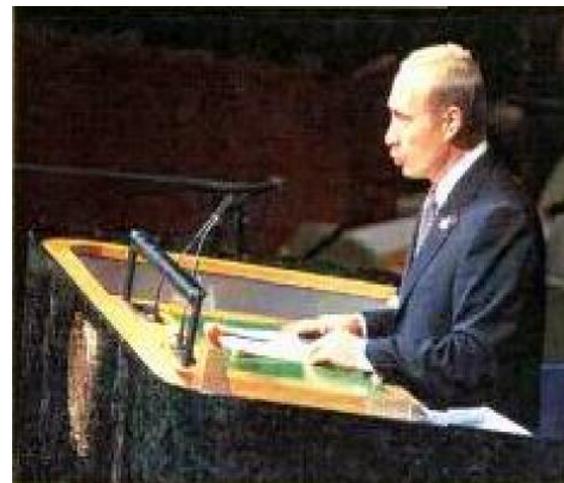
Проект БН-1200 признан как «design track» МФП, отвечающий требованиям, предъявляемым к РБН 4-го поколения



Международный проект по инновационным реакторам и топливным циклам – ИНПРО

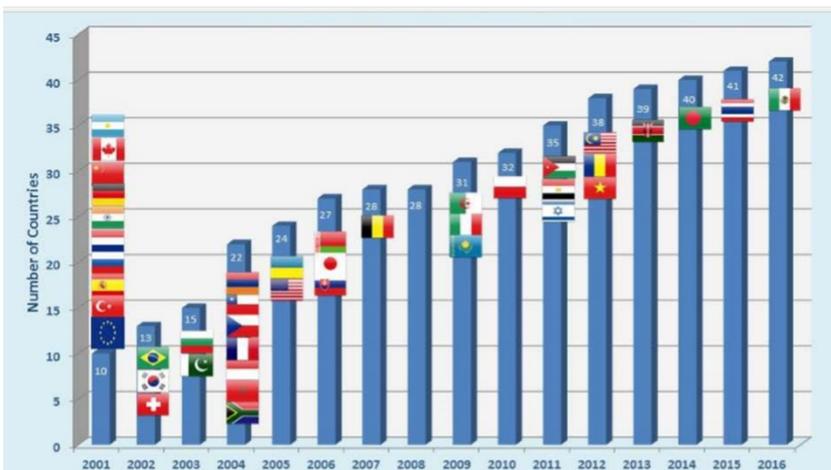
Создание и организационная структура проекта ИНПРО

- 6 сентября 2000 года в ООН на Саммите тысячелетия Президент РФ выдвинул инициативу по энергетическому обеспечению устойчивого развития человечества
- В рамках этой инициативы Россия предложила реализовать при участии МАГАТЭ соответствующий международный проект
- На Генеральной Конференции МАГАТЭ 18 сентября 2000 г. эта инициатива была отмечена и высказана готовность оказать поддержку в координации этого проекта
- В 2000 г МАГАТЭ инициировало международный проект ИНПРО



Главные цели ИНПРО:

- удостовериться, что ЯЭ в 21 веке будет способна внести достойный вклад в энергопотребности устойчивого развития человечества
- объединить обладателей и пользователей технологии и создать представительный форум для поддержки развивающихся инициатив на национальном и международном уровнях.



Число стран и организаций, разделяющих цели ИНПРО и принимающих в нем участие, постоянно росло и достигло 42-х

Организационная структура ИНПРО/МАГАТЭ



- В настоящее время план действий ИНПРО включает четыре программные области (задачи):
 - «Глобальные сценарии» - разработка глобальных и региональных сценариев глобального видения устойчивого развития ядерной энергетики
 - «Инновации» - изучение инновационных технологий ядерной энергетики и институциональных механизмов, поддерживающих ее устойчивое развитие
 - «Оценка устойчивости и стратегии» - помощь государствам-членам в разработке долгосрочных национальных стратегий посредством **применения методологии ИНПРО**
 - «Диалог-форум» – создание представительного форума заинтересованных сторон для объединения обладателей технологий и пользователей, оказания позитивного влияния и поддержки в координации технической политики, взаимодействии с другими международными организациями и инициативами.
- **Исследование физических вопросов** является существенной задачей при выполнении проектов в программных областях «Глобальные сценарии» и «Инновации»

- Существенным достижением проекта является разработка и опробование **методологии ИНПРО** – инструмента оценки ядерно-энергетических систем (ЯЭС) по критериям устойчивого развития

Методология имеет иерархическую структуру, состоящую из **Базовых принципов**, **Требований пользователя** и **Критериев**, в соответствии с которыми производится оценка ЯЭС в областях экономики, инфраструктуры, обращения с РАО, устойчивости к распространению, физической защиты, безопасности и воздействия на окружающую среду



ЯЭС признается соответствующей концепции устойчивого развития, если она отвечает всем критериям, требованиям пользователя и базовым принципам методологии

- Первое опробование методологии было проведено на примере быстрого реактора БН-800. Затем оценки ЯЭС были выполнены другими странами. Полученный опыт позволил создать **комплект методик, инструментов и средств для оценки ЯЭС – NESА**
- К настоящему времени оценки национальных систем или их компонентов выполнены Аргентиной, Арменией, Бразилией, Индией, Кореей, Украиной., Беларусью, Индонезией и Китаем.
- Опыт применения методологии и соответствующих средств (NESА) показал, что они позволяют провести всесторонний анализ ЯЭС и определить направления НИОКР для улучшения ее характеристик по критериям устойчивого развития

В настоящее время методология ИНПРО является единственным согласованным на международном уровне руководством по оценке ядерно-энергетических систем по критериям устойчивого энергетического развития

- Важной вехой развития проекта стала организация в его рамках **совместных исследований стран-участниц** по актуальным проблемам ЯЭ
- В совместном исследовании по быстрым реакторам (2005, 8 стран-участниц) и по архитектуре глобальной ЯЭС (2008, 16 стран-участниц и ЕС) была создана аналитическая основа **для оценки сценариев развивающейся ЯЭС**, включающая:
 - согласованные сюжеты развития ЯЭ и прогнозы спроса на ядерную э/э
 - гетерогенную модель мировой ЯЭ, учитывающую особенности различных стран
 - разработку и адаптацию необходимых расчетных инструментов
 - подготовку баз данных существующих и будущих ядерных реакторов и ЯТЦ
 - анализ результатов моделирования сценариев с использованием ключевых индикаторов, отражающих значимые цели, которые должны быть достигнуты путем реализации инновационных технологических решений.

В дальнейшем разработанный подход широко использовался и развивался в сценарных исследованиях проекта ИНПРО

Достижения целей, поставленных во многих сценарных исследованиях ИНПРО и, в особенности в проектах SYNERGIES и ROADMAPS, потребовало глубокого анализа вопросов реакторной физики

В проекте **SYNERGIES** (2012, 24 страны) изучались варианты использования синергии для повышения устойчивости глобальной ЯЭС

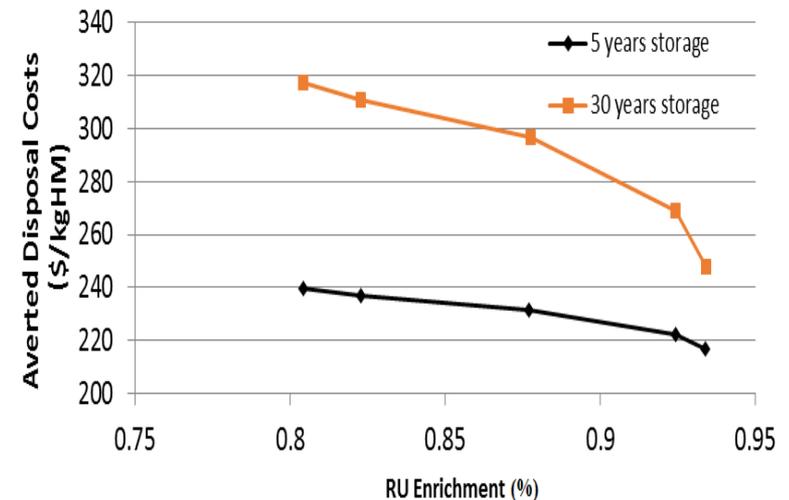
- Выполнено **28 исследований** по улучшению показателей ЯЭС за счет:
 - сочетания реакторных технологий и ТЦ разного типа (синергия технологий)
 - сотрудничества между странами (синергия сотрудничества).
- Канада и страны с LWR: сценарий сжигания америдия из LWR в HWR

Анализ сжигания америдия из ОЯТ PWR в HWR показал возможность снижения тепловыделения ВАО, позволяющее уменьшить объемы хранилища и стоимость длительного хранения ВАО

Снижения затрат на хранение благодаря трансмутации ^{241}Am составляет ~217 долл. США / кг ТМ и 248 долл. США / кг НМ для ОЯТ PWR с выгоранием 27 ГВт сутки/ т ТМ, содержанием $\text{U}_5 \sim 0,95\%$ и хранением в течение 5 и 30 лет

Увеличение выгорания приводит к большему снижению затрат – до 240 и 320 долл. США / кг ТМ при хранении 5 и 30 лет соответственно

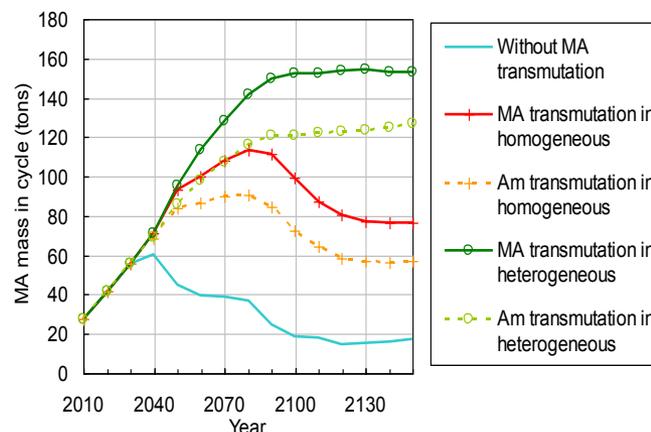
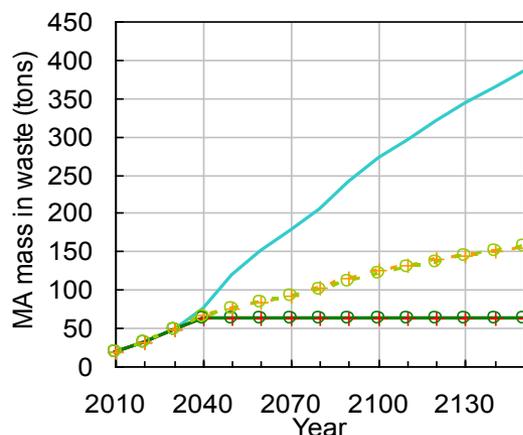
Снижение стоимости природного урана снижает величину экономии благодаря трансмутации ^{241}Am



Целью исследований ЕС и Франции было получить оценку промышленных перспектив разделения и трансмутации МА для региональных услуг ЯТЦ

В исследовании Франции было получено:

- трансмутация МА значительно уменьшает их запас в геологическом хранилище; однако запас МА в реакторах и установках увеличивается

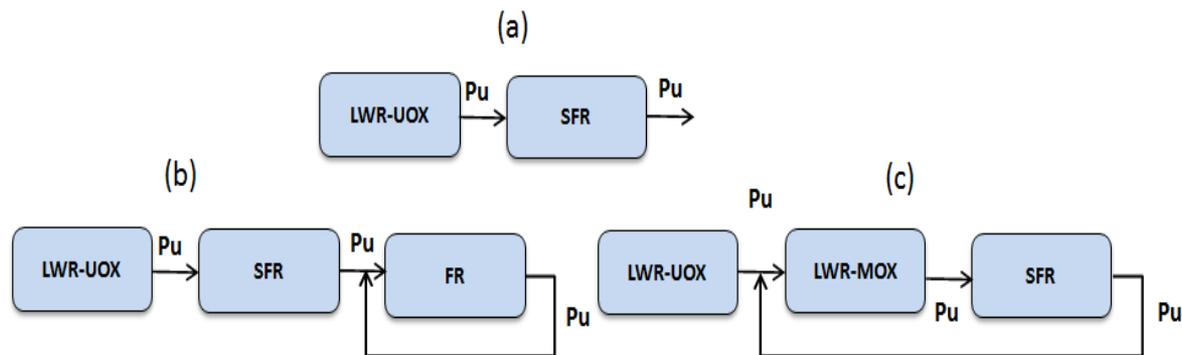


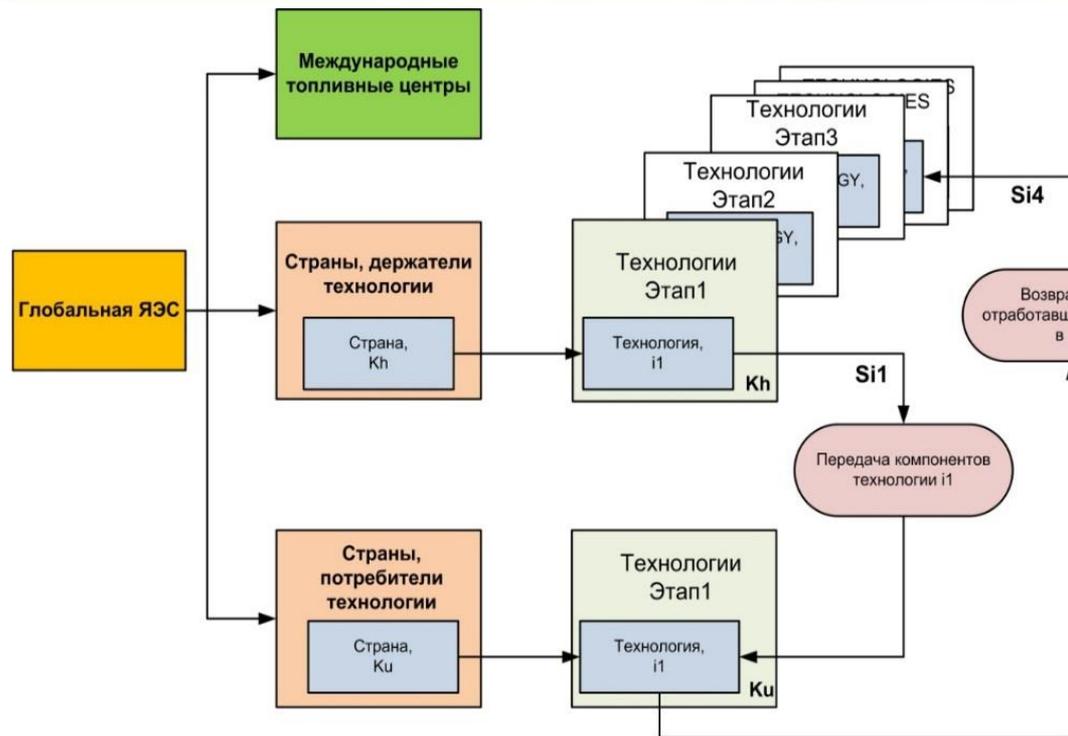
- Только трансмутация всех МА позволяет стабилизировать их накопление с течением времени
- Трансмутация Am и МА привела бы к уменьшению до 7,3 (Am) до 9,8 (МА) зоны обслуживания зоны захоронения ВАО после периода хранения 120 лет
- Более высокое содержание МА на этапах производства и обращения с топливом потребует значительных модификаций конструкции для решения проблем тепловой и радиационной защиты

- Сложность операций, выполняемых на этапе эксплуатации (погрузка / разгрузка, временное хранение отходов, транспортировка), также будет увеличена
- Сценарии, включающие трансмутацию всех МА чрезвычайно затруднены присутствием кюрия и ограничения часто превосходят на порядок те сценарии, в которых трансмутируется только америций
- Проведенные экономические исследования показывают, что увеличение затрат, связанных с процессом трансмутации, может варьироваться от 5 до 9% в SFR и 26% в случае ADS

Исследования России и Франции по сценариям развития двухкомпонентной ЯЭС с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ЯТЦ для глобальной ЯЭС

- Схемы ЯЭС в российском исследовании: а) начальный этап, б) для стран с высоким энергетическим спросом, с) для стран с небольшим энергетическим спросом





ROADMAPS (2014, 16 стран)

Что может дать сотрудничество в варианте возврата ОЯТ

Для пользователей:

- сокращение затрат на инфраструктуру национальной ЯЭС;
- решение проблем ОЯТ и РАО

Для обладателей технологии:

- расширение бизнеса;
- снижение затрат за счет эффекта масштаба.

Для ЯЭ в целом:

- повышение безопасности и экономичности глобальной ЯЭС (эталонные технологии и высокие стандарты);
- расширение ресурсной базы (использования ДМ из ОЯТ);
- снижение риска распространения и т. д.

Для реализации этих возможностей необходимо:

- убедительная демонстрация новых технологий;
- обеспечение транспортировки ядерного топлива;
- дальнейшее развитие сотрудничества и законодательства

К настоящему времени система услуг на начальной стадии ЯТЦ в основном создана
 Инновационные физические системы (SFR, LFR, MSR и др.) могут стать основой столь же эффективной системы на заключительной стадии ЯТЦ



РОСАТОМ

Спасибо!