

О ВОЗМОЖНЫХ РАЗВИЛКАХ В РАЗВИТИИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСА АТЭК

*Инга Равильевна Макеева,
Н.Д. Дырда, У.Ф. Шереметьева,
С.В. Пчелинцева, Ю.Г. Сырцова*

*XIV Забабахинские научные чтения
18-22 марта 2019 г., Снежинск*

Современное состояние АЭ

10 действующих АЭС

36 энергоблоков, установленная мощность
29,1 ГВт

Доля АЭ – 18,9%

Основа ЯЭ – тепловые реакторы (РБМК – 11,
ВВЭР-1000 – 12, ВВЭР-440 – 6, ВВЭР-1200 – 2)

Два РБН – БН-600, БН-800

Перерабатывается ОЯТ ВВЭР-440 и БН-600

Ежегодная наработка ОЯТ ≈ 950 т

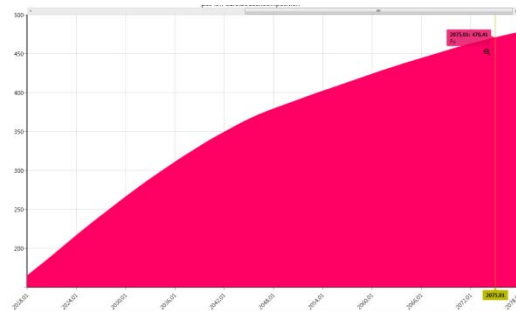
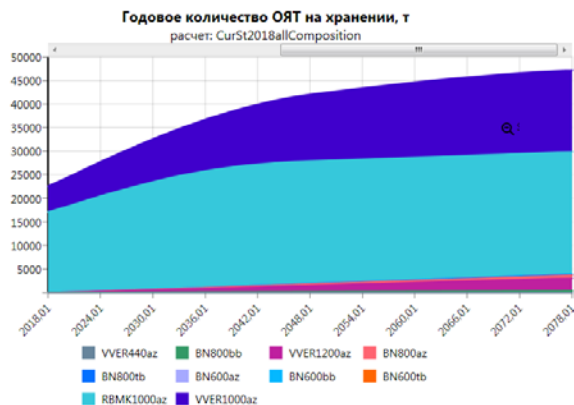
$\approx 17\,500$ т ОЯТ РФ находится на хранении



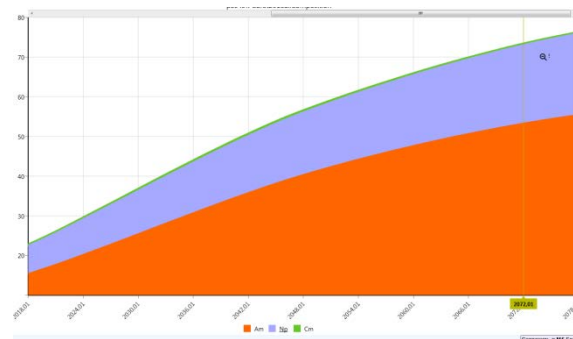
**Ядерный топливный
цикл РФ**

Современное состояние АЭ

*Если остановить ввод новых энергоблоков после 2018 г.,
к 2080 г. на хранении останется ≈ 47 тыс. т ОЯТ, где содержится 470 т Pu и 75 т МА*



Количество плутония в ОЯТ



Количество МА в ОЯТ

Реактор	Активность 1т ОЯТ, Бк	
	После выгрузки	После 30 лет
ВВЭР-1000	1,01E+19	1,70E+16
РБМК-1000	4,55E+18	1,37E+016

При объеме хранилищ – 20 тыс. т ОЯТ, необходим ввод трех хранилищ до 2042 года

Капитальные вложения ≈ 60 млрд. руб. (в текущих ценах)

Минимальная необходимая площадь для подземного захоронения ОЯТ (без переработки) – $7,5 \cdot 10^5 \text{ м}^3$

Задачи и разработки в развитии АЭ

Решение отложенных проблем предыдущего этапа развития ЯЭ

- Обращение с накопленным ОЯТ тепловых реакторов
- Вовлечение рециклированных материалов в топливный цикл
- Вывод объектов из эксплуатации
- Экологически приемлемое обращение с РАО

Переход с U^{235} на U^{238} , организация замыкания ЯТЦ

- Создание перспективных типов реакторов на быстрых нейтронах
- Создание технологий замыкания ядерного топливного цикла для РБН
- Экологически приемлемое обращение с РАО

Стратегические цели ГК «Росатом»

- повышение доли на международных рынках
- снижение себестоимости продукции и сроков протекания процессов
- новые продукты для российского и международных рынков

- Тепловые – урановые, на смешанном топливе;
- Быстрые – разные теплоносители
- Коэффициент воспроизводства

- Фракционирование РАО
- Трансмутация МА в ЖСР, БР
- Варианты остекловывания

- Водная (гидрометаллургия)
- Сухие (пирохимия, плазменная, ...)
- Хранение ОЯТ или плутония?
- Захоронение ОЯТ или РАО?

- Уран, торий
- Плутоний ТР, БР
- Оксидное, нитридное, металлическое, карбидное...
- Глубина выгорания?



Перспективные типы реакторных установок

Тип РУ	Характеристики РУ	Топливо	Технология переработки	КВ	Тип переработки
ВВЭР	тепловой водо-водяной	урановое или смешанное оксидное	варианты ПУРЭКС-процесса	<1	3-5 лет выдержка, централизованный
БН	быстрый натриевый	смешанное оксидное или нитридное	варианты ПУРЭКС-процесса, комбинированная (пиро+гидро)	1,13 – 1,3	1-7 лет выдержка, централизованный или пристанционный
БРЕСТ	быстрый свинцовый	смешанное нитридное	варианты ПУРЭКС-процесса, комбинированная (пиро+гидро), в перспективе один из вариантов «сухой» переработки	1,05	1-2,5 года выдержка, пристанционный

Предварительные замечания

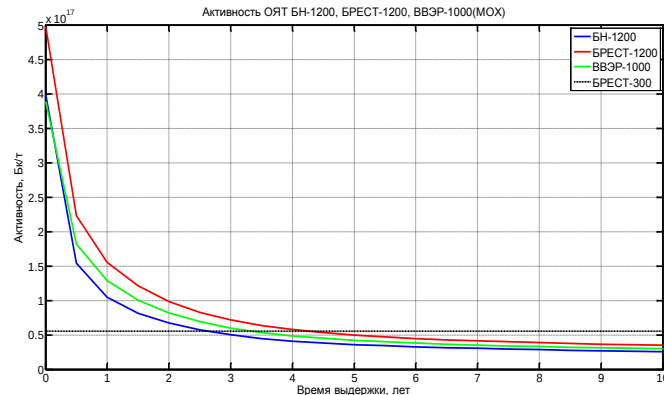
В зависимости от времени выдержки (1 – 7 лет) на накопленном в ОЯТ плутонии можно ввести в эксплуатацию:

24 ÷ 43 реакторов типа БН-1200	21 ÷ 36 реакторов типа БРЕСТ-1200
--------------------------------	-----------------------------------

Пристанционный вариант переработки ОЯТ с коротким временем выдержки требует разработки новых технологий (сухих) – пирохимическая, плазменная, фторпирохимическая...

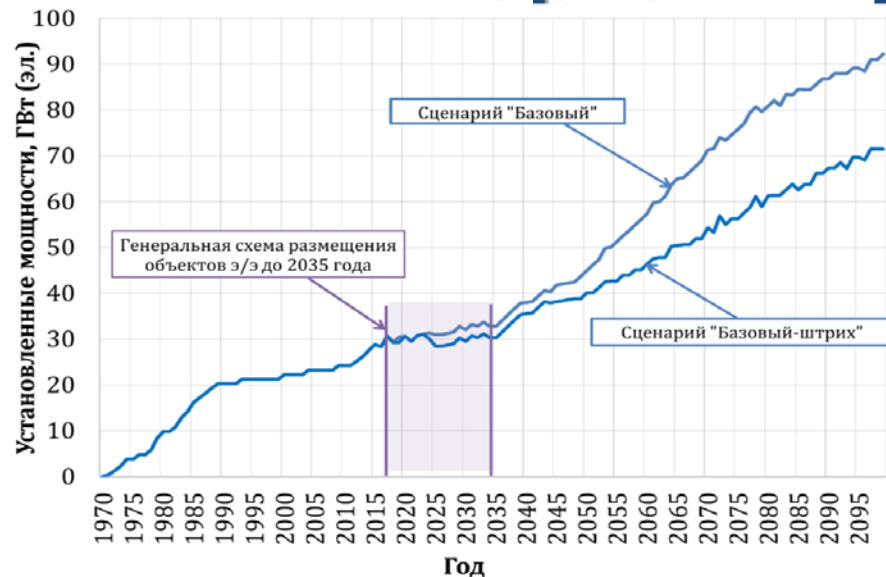
При большей длительности внешнего ТЦ может применяться гидрометаллургическая технология

При использовании плутония в тепловых реакторах: сокращается количество ОЯТ на хранении	Дegradiрует изотопный состав плутония
--	---------------------------------------



Модестов Д.Г. Решение уравнений радиоактивного распада. Вопросы атомной науки и техники // Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2006.

Варианты развития АЭ



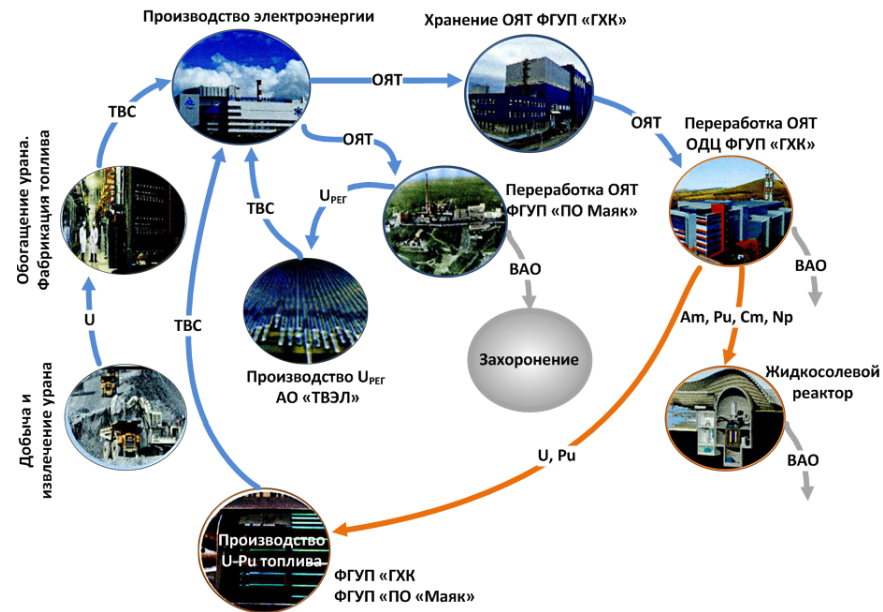
Сценарий «Базовый-штрих»¹

установленная мощность:

к 2035 году: 30 ГВт

к 2050 году: 40 ГВт

к 2100 году: 70 ГВт



Все варианты могут быть промоделированы с использованием ПК АТЭК²

¹ «Стратегия развития ядерной энергетики РФ», проект

² Макеева И.Р., Симоненко В.А., Дырда Н.Д., Рыкунова А.А., Пчелинцева С.В. Задачи моделирования технологий ядерного топливного цикла. Платформа АТЭК // Сборник материалов XIII Международной конференции «Забабахинские научные чтения». – Снежинск, 2017. – С. 255.

Характеристики сценарных вариантов

	Реакторы	Переработка ОЯТ реакторов	Рецикл топлива	Заводы переработки и производитель- ность
Открытый цикл	БН-600, ВВЭР-440, РБМК-1000, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 ВВЭР-ТОИ	ВВЭР-440, БН-600, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200	Уран, плутоний для БН-800	РТ-1 (200 ттм/г) ОДЦ (220 ттм/г)
Замыкание на тепловых реакторах	БН-600, ВВЭР-440, РБМК-1000, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 ВВЭР-ТОИ,	ВВЭР-440, БН-600 ВВЭР-1000, ВВЭР-1200	Уран, плутоний для БН-800 и ВВЭР-ТОИ	РТ-1 (200 ттм/г) ОДЦ (220 ттм/г) Наращивание мощности
Замыкание на быстрых реакторах	БН-600, ВВЭР-440, РБМК-1000, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 ВВЭР-ТОИ, БН-1200, ВВЭР-С, различные КВ	ВВЭР-440, БН-600 ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, БН-1200, ВВЭР-С	Уран, плутоний	РТ-1 (200 ттм/г) ОДЦ (400 ттм/г) Наращивание мощности

Платформа АТЭК для моделирования технологий ЗЯТЦ



	РФЯЦ-ВНИИФ (Снежинск)
	ГНЦ Курчатовский институт (Москва),
	НПО ВНИИНМ им. акад. А.А. Бочвара (Москва),
	НПО РИ им. В.Г. Хлопина (С. Петербург),
	НПО ВНИИХТ (Москва),
	НИИАР (Дмитровград),
	ФЦЯРБ (Москва),
	ГИ ВНИПИЭТ (С. Петербург),
	ФЭИ (Обнинск),
	НИКИЭТ (Москва),
	ПО Маяк (Озёрск),
	ФГУП «ГХК» (Железногорск)

АТЭК. Особенности моделирования

Описание характеристик материального потока (химический, нуклидный составы, активности, количество) в зависимости от времени

Описание функционирования узлов и аппаратов с точки зрения эксплуатации в заданных условиях – сроки эксплуатации, потребности и периодичности профилактики, коррозионный износ и т.п.

Описание экономических характеристик технологий и соответствующих производств

Описание физико-химических процессов в отдельных узлах и аппаратах с различной степенью точности от инженерной до первопринципной на уровне физико- и химико-математических моделей процессов

Интегрированная среда для моделирования технологий ЯТЦ

Динамическое построение расчетной схемы на всех уровнях от стратегического до технологического

Библиотека моделей технологических процессов

Проведение связанных расчетов ТЦ реакторов (НФР + внешняя часть ТЦ)

Расчет экономических характеристик на основе технологических параметров и ЖЦ объекта

Оптимизация технологий и технологических подсистем

Учёт нуклидных составов при оценке безопасности

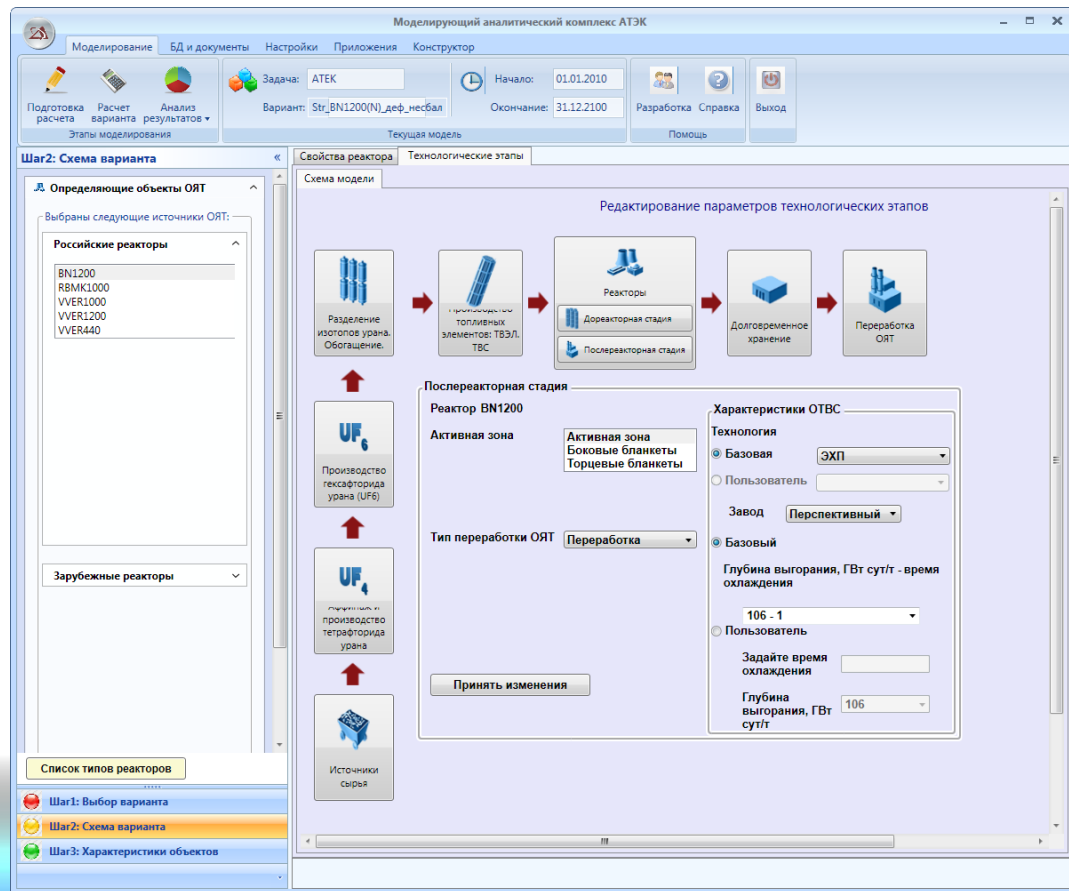
Оценка уровней активности и тепловыделения, особенно при рефабрикации топлива из ОЯТ;

Описание накопления продуктов деления и актинидов, в частности, плутония в отдельных аппаратах, емкостях, фильтрах и т.п.

Оценка рисков выбросов радиоактивности при проектных и запроектных авариях;

Определение вероятности проектных аварий в зависимости от принятых технических решений и характеристик обрабатываемого потока.

Возможности комплекса



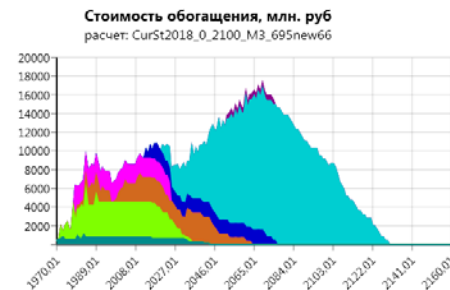
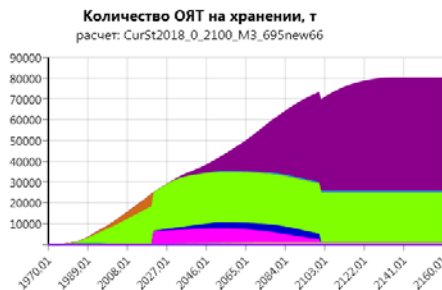
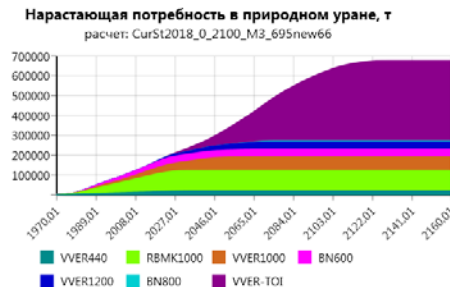
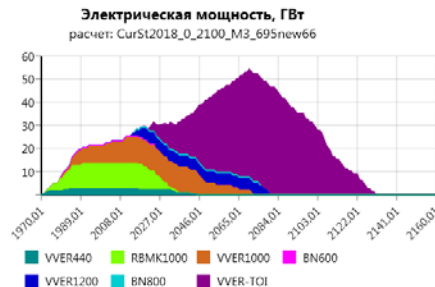
**ВВЭР1000, ВВЭР440,
ВВЭР1200, РБМК, БН600,
БН800, ВВЭР-МОКС,
БН1200, ВВЭР300,
БРЕСТ1200**

**Блоки АЭС в объеме
Генеральной схемы
развития энергомощности**

**Ввод перспективных
реакторов, в т.ч.
зарубежных, без привязки
к станциям**

Открытый ЯТЦ

Ограничение на запасы природного урана – 695 тыс. т



В 2050 году – электрическая мощность 39,6 ГВт

Максимальная энергомощность – 70 ГВт в 20171 г.

Максимальная производительность обогатительных заводов – 12 млн. ЕРР/год

Накоплено 80 тыс. т ОЯТ (895 т плутония, 93 т – Am, Cm, Np)

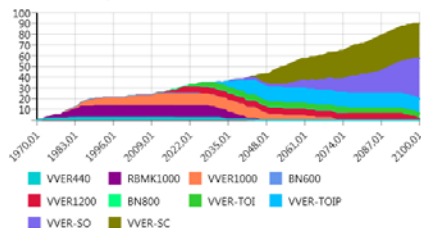
Необходимо 4 хранилища ОЯТ (по 20 тыс.т)



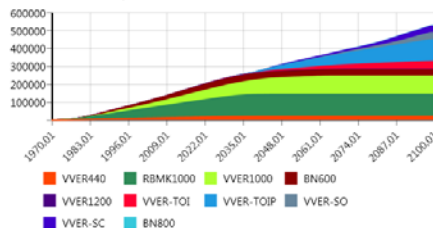
Себестоимость электроэнергии – 44 коп./кВт·час
Основной вклад в топливную составляющую – стоимость природного урана

Замыкание ЯТЦ на тепловых реакторах

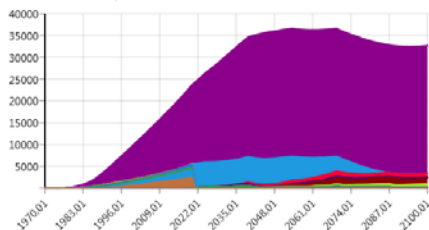
Электрическая мощность, ГВт
расчет: CurSt2018_2_2100_1



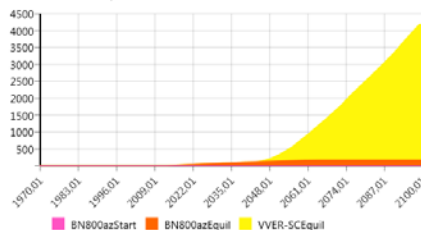
Нарастающая потребность в природном уране, т
расчет: CurSt2018_2_2100_1



Количество ОЯТ на хранении, т
расчет: CurSt2018_2_2100_1



Нарастающая потребность в Pu, т
расчет: CurSt2018_2_2100_1



Электрическая мощность - 90 ГВт в 2100 г.

Производительность заводов переработки ОЯТ: 1000 т/год – урановое топливо,

600 т/год – смешанное топливо

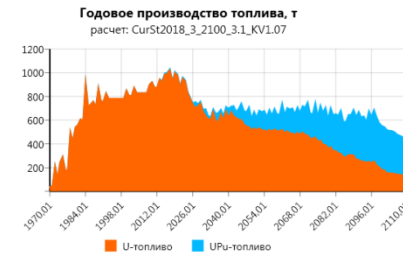
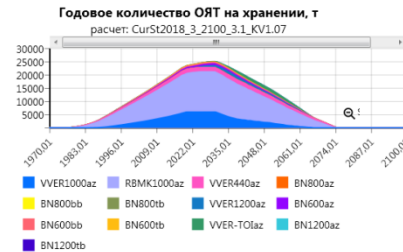
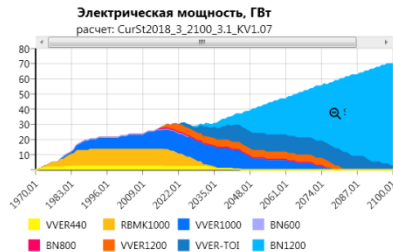
Максимальная производительность обогатительных заводов – 9 млн. ЕРР/год

На хранении остается только ОЯТ РБМК

Себестоимость электроэнергии – 46 коп./кВт·час
Основной вклад в топливную составляющую –
производство топлива и переработка ОЯТ

4 тыс. т плутония вовлекается в топливный цикл

Замыкание ЯТЦ на быстрых реакторах



Себестоимость электроэнергии – 40 коп./кВт·час
Основной вклад в топливную составляющую –
производство топлива и переработка ОЯТ



Электрическая мощность - 90 ГВт в 2100 г.

Производительность заводов переработки
ОЯТ: 1000 т/год – урановое топливо,
600 т/год – смешанное топливо

Потребность в обогащении урана
постепенно сокращается

Отсутствует длительное хранение ОЯТ

При низких КВ возникает дефицит
плутония – необходим поддерживающий
ввод тепловых реакторов

Заключение

При умеренных темпах роста ЯЭ существует целый спектр примерно равноценных возможных сценариев развития

Использование плутония в тепловых реакторах сокращает количество хранимого ОЯТ

При низких КВ обеспечить рост АЭ можно только в условиях двухкомпонентной энергетики

Развитие технологий ВВЭР – фактор обеспечения устойчивого развития ЯЭ

Для более адекватной оценки экономических характеристик ЯТЦ необходимо учитывать готовность технологий и затраты на НИОКР

Спасибо за внимание!



02.04.2019

XIV Забабахинские научные чтения

i.r.makeyeva@vniitf.ru

17