

Научные и технологические вопросы атомной энергетики

Нерешенные вопросы АЭ, ограничивающие ее развитие в эпоху спроса на «зеленые» энерготехнологии

Ошибки прошлого этапа развития



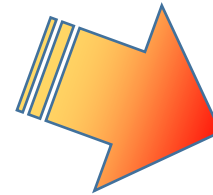
Три-Майл-Айленд



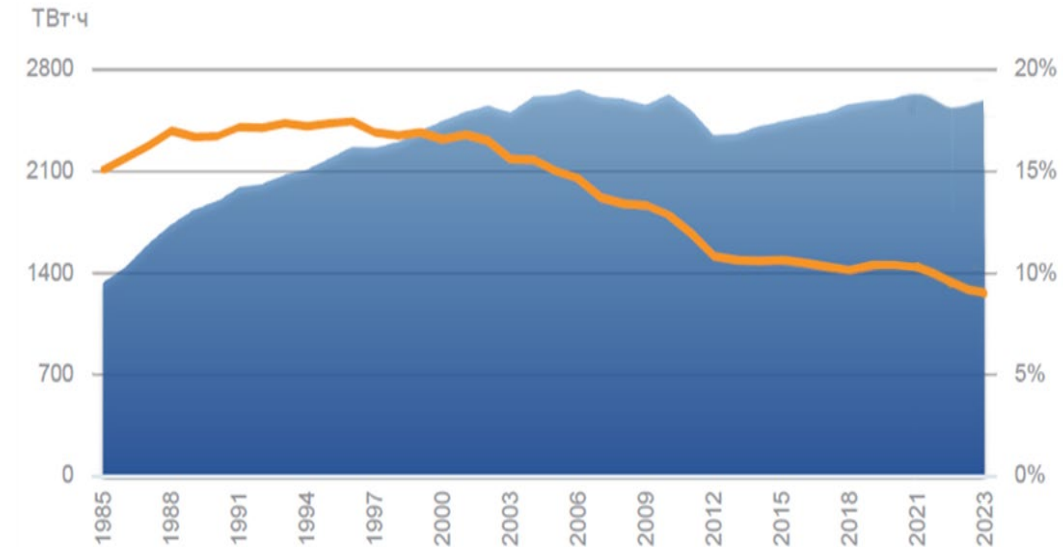
Чернобыль



Фукусима



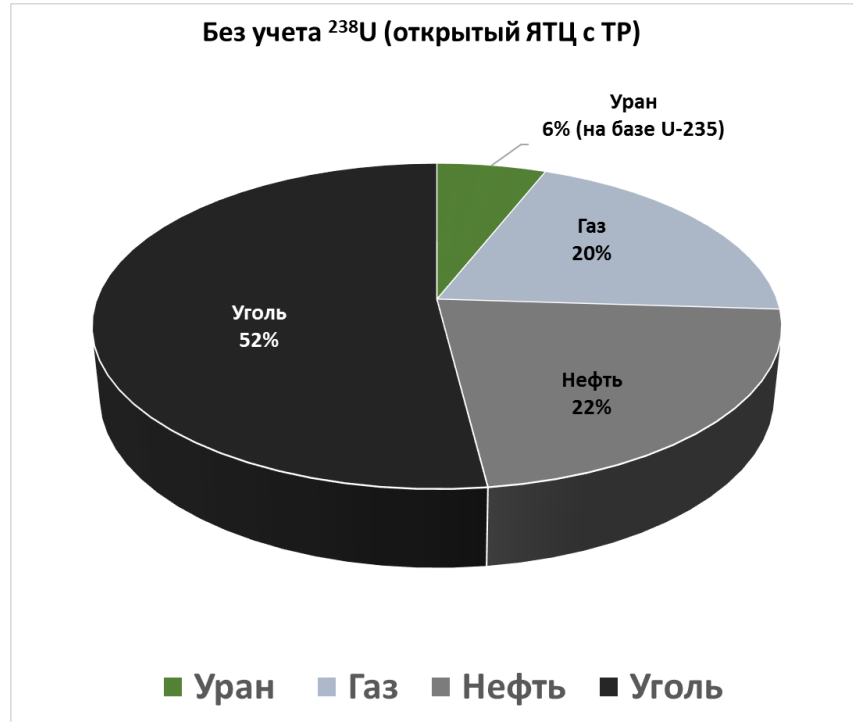
Отсутствие общепринятого решения по ОЯТ



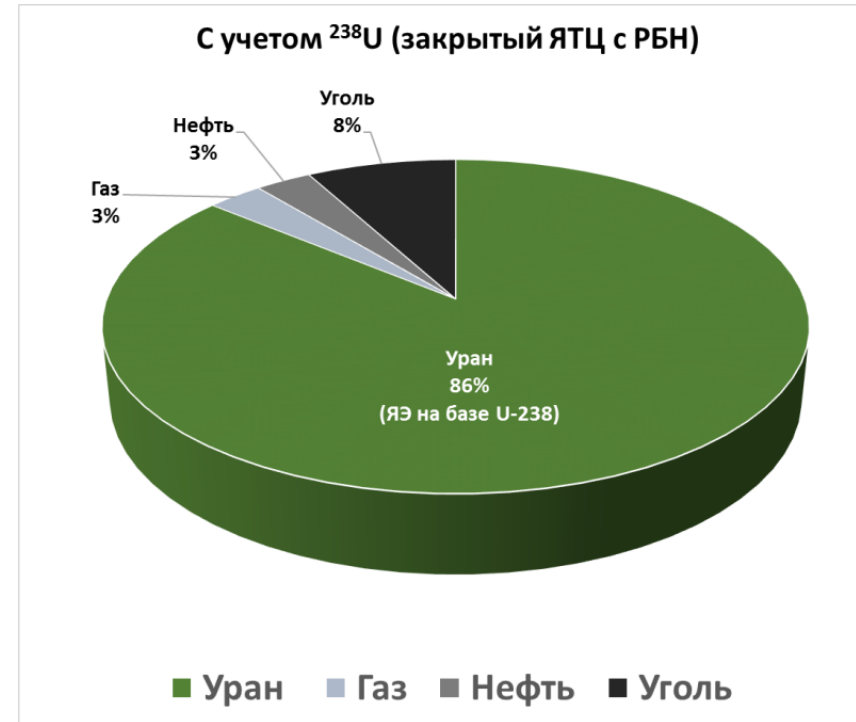
■ Выработка на АЭС ТВт·час;

— Доля АЭС от всех источников %

Сравнение энергоемкости различных природных энергетических ресурсов в мире



Уголь - $\sim 140^{*})$ - 400 лет



U^{238} - ~ 1400 - 4000 лет

Замкнутый ЯТЦ на базе быстрых реакторов за счет использования ^{238}U принципиально снимает проблему топливных ресурсов энергетики, увеличивая их практически используемую базу примерно в 150 раз и выводя АЭ на приоритетную позицию в общем энергобалансе ресурсов.

$^{*})$ - BP Statistical Review of World Energy 2021

Экологические причины целесообразности развития АЭ

8,7

млн человек*

ежегодно погибает от сжигания ископаемого топлива вследствие загрязнения атмосферного воздуха



NEA-OECD (2018), *The Full Costs of Electricity Provision* – Агентство по ядерной энергии при ОЭСР

АЭС не воздействуют на глобальные климатические процессы и являются одним из наиболее безопасных источников энергии с точки зрения воздействия на здоровье человека

0

г/кВт.ч

- прямые выбросы CO₂ от выработки э/э на АЭС

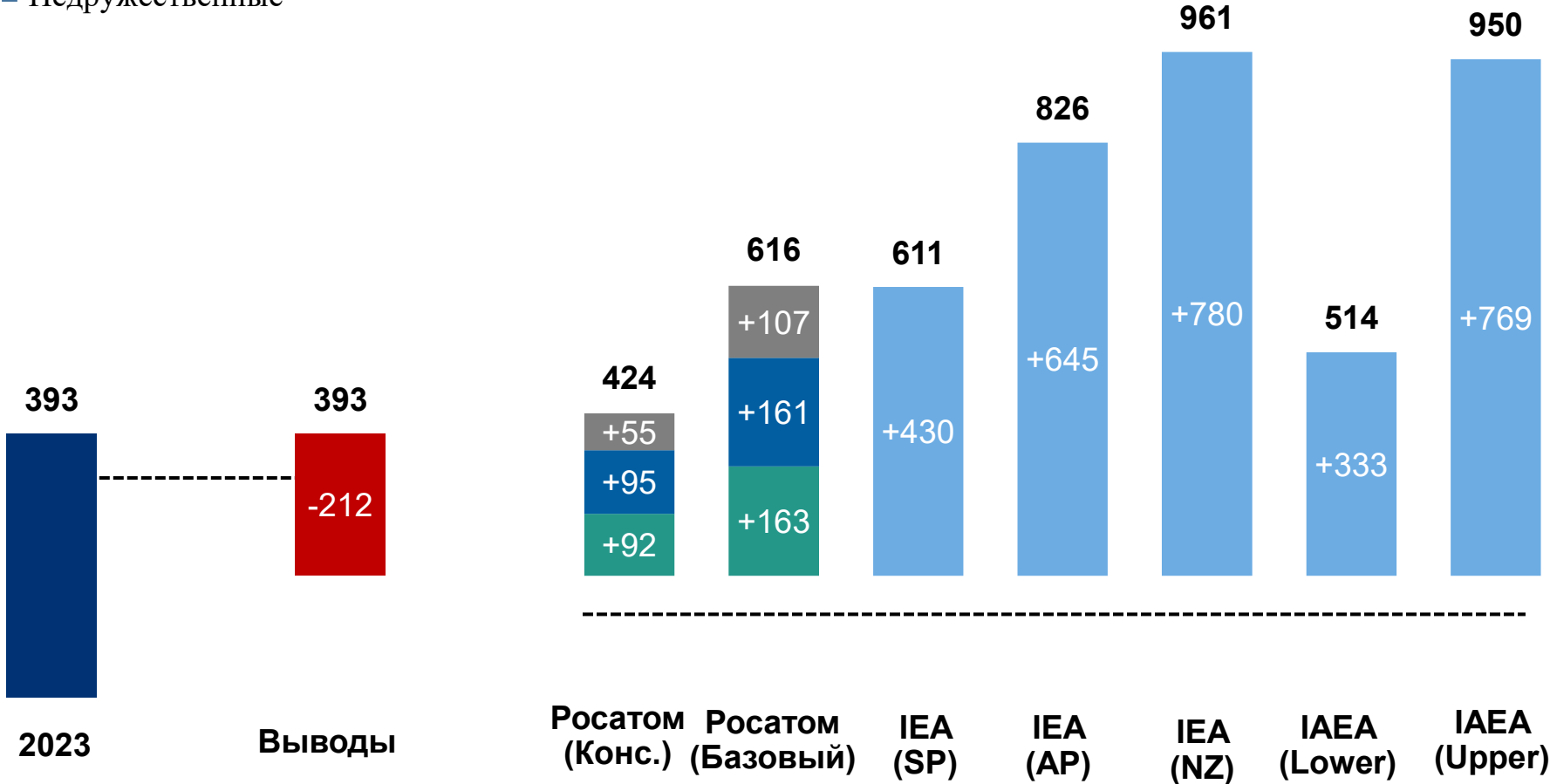


* Исследование Гарвардского и Бирмингемского университетов, 2021

Прогноз рынка АЭС в мире

Установленная мощность, ГВт

- Китай
- Прочие дружественные (в соответствии с Распоряжением Правительства РФ № 430-р, 2022 г.)
- Недружественные



Ввод АЭС в дружественных странах к 2050 году составит >320 ГВт

Ключевые конкуренты

КИТАЙ CPR-1000; АСР-1000; АСР-1400
ЮЖНАЯ КОРЕЯ APR-1400
США AP-1000
ФРАНЦИЯ EPR

Факторы конкурентоспособности

ГИБКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ФИНАНСИРОВАНИЯ
НОВИЗНА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
БЕЗОПАСНОСТЬ
РЕФЕРЕНТНОСТЬ

Источник: PRIS, IAEA, IEA WEO 2024, Модель Госкорпорации «Росатом». SP – Stated Policies (учитываются только уже озвученные и внедряемые меры по удержанию глобального потепления); AP – Announced Pledges (все правительства в мире выполняют все свои обязательства по удержанию глобального потепления); NZ - реализация основного сценария Парижского соглашения.

Двухкомпонентная ядерная энергетика с замкнутым ЯТЦ

Цель - ЯЭС 4-го поколения:

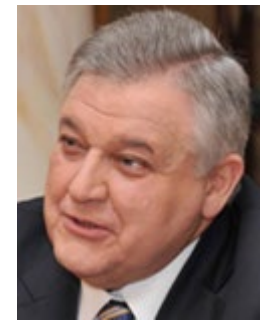
- Повышенная безопасность
- Неограниченность ресурсов
- Высокая экономичность
- Минимум отходов



Е.О. Адамов
Росатом



В.Г. Асмолов
Росатом



М.В. Ковальчук
НИЦ КИ

Современная АЭ (открытый топливный цикл)

	РУ	Топливо
Тепловые	ВВЭР, РБМК	урановое
Быстрые с теплоносителем из Na	БН-600	урановое
	БН-800	урановое

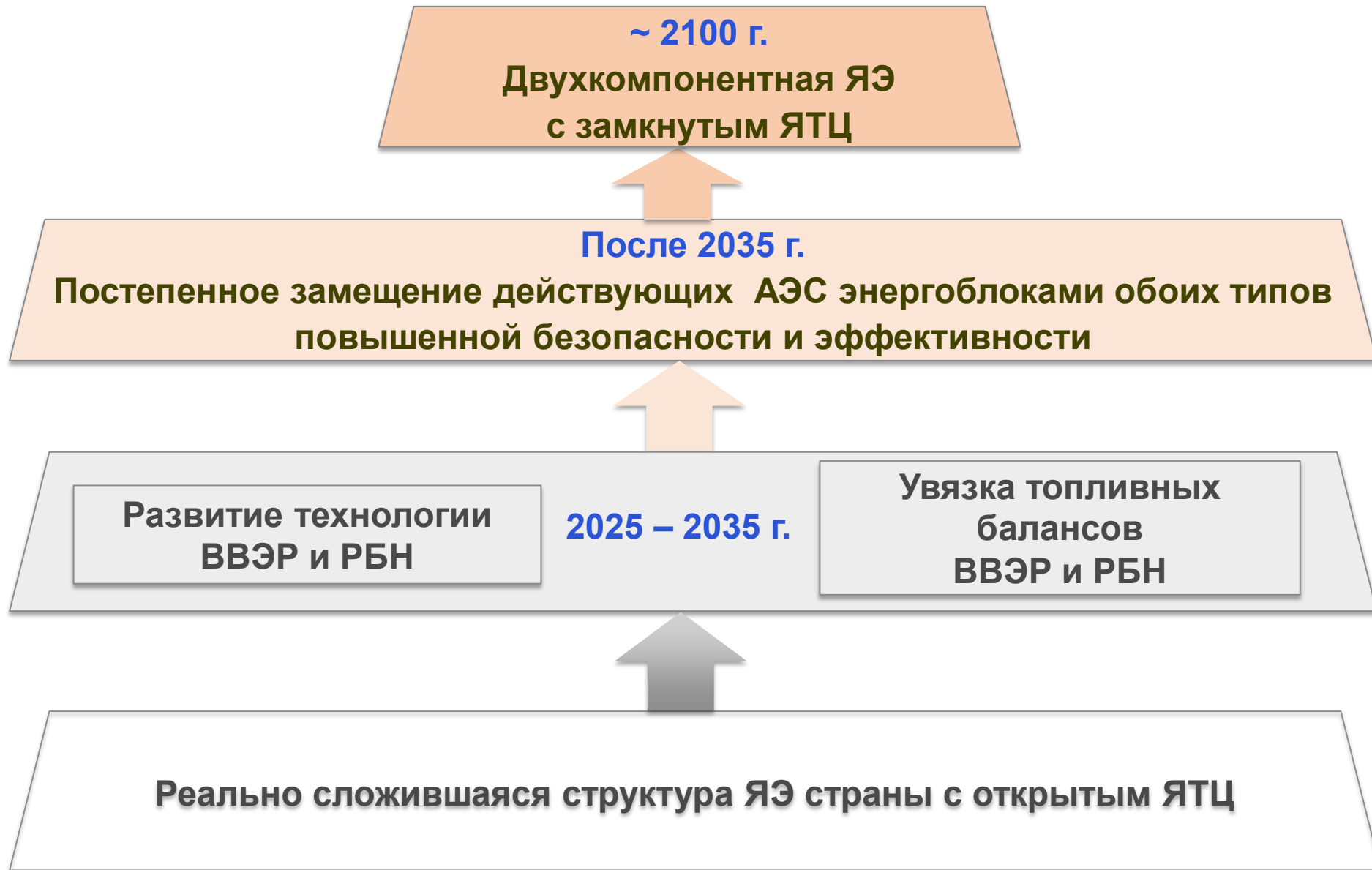
Двухкомпонентная АЭ (замкнутый топливный цикл)

	РУ	Топливо
Тепловые	ВВЭР-С	уранплутониевое
Быстрые с теплоносителем из Na (БН-1200), Pb (БР-1200).	БН-1200	уранплутониевое
	БР-1200	

Преимущества двухкомпонентной энергетики:

- ✓ вовлечение в топливный цикл U^{238} – переход атомной энергетики в разряд возобновляемых источников энергии;
- ✓ рециклирование U, Pu, минорных актинидов (Np^{237} , Am^{241} , Cm^{244}) в топливе реакторов – снижение объемов ОЯТ и ВАО;
- ✓ трансмутация минорных актинидов при рециклировании – перспектива возможности захоронения ВАО.

Сценарий формирования двухкомпонентной ядерной энергетики России



ВВЭР-С средней мощности на площадке Кольской АЭС-2

- ✓ Реактор с регулированием спектра нейтронов;
- ✓ Переход с 30% загрузки уран-плутониевым топливом к 100%
- ✓ Охлаждение водой докритических параметров;
- ✓ Повышение Коэффициента Воспроизводства топлива с 0.3 до ~ 0.7 .
- ✓ Снижение со 150 т до 1 т расхода урана в двухкомпонентной энергетике с замкнутым топливным циклом (на 1 ГВт(э)·год).



2022–
2024 г.

Разработка ТЗ, эскизного и концептуального проектов, выполнение предпроектных и базовых НИОКР

2025–
2030 г.

Завершение НИОКР в обоснование проектных решений. Технический проект РУ. Проектирование АЭС.

2030–
2035 г.

Сооружение и запуск головной блока АЭС.

БРЕСТ-300 на площадке СибХимКомбината г. Томск

- ✓ Реактор с быстрым спектром нейтронов;
- ✓ Рb в качестве теплоносителя;
- ✓ Повышение КВ до ~ 1.05 и снижение расхода урана до 0 (на 1 ГВт(э)·год).

Идет строительство прообраза промышленно-энергетического комплекса ПЭК (АЭС с РБН и инфраструктура замкнутого ЯТЦ на одной площадке). Пуск реактора – 2028 г.



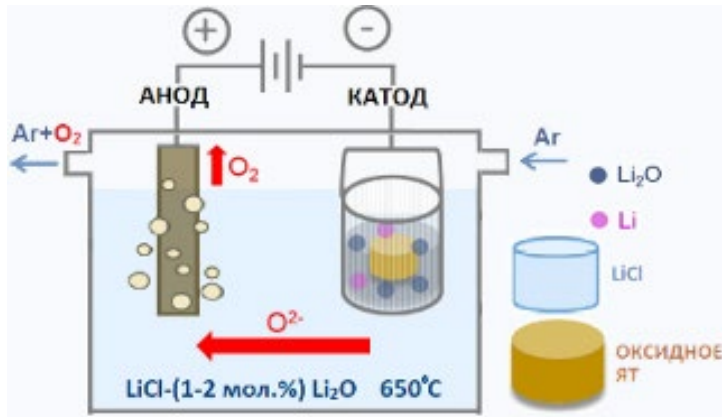
Вид на
площадку
строительства
БРЕСТ-300
(2024 г.)

Исследования элементов двухкомпонентной ЯЭ на действующем реакторе БН-800 (начаты 2024 г.):

- ✓ сделан первый шаг к ЗЯТЦ - БН-800 на 100% загружен U - Pu топливом, идет исследование особенностей режима работы реактора;
- ✓ изготовлены и загружены в реактор ТВЭЛы с Am^{241} , идет изучение эффективности трансмутации Am^{241} .

Пирохимическая технология переработки ОЯТ

Основная реакция : $\text{U(Pu)O}_2 + 4\text{Li} = 2\text{Li}_2\text{O} + \text{U(Pu)}$



Катодный
уран



Восстановленные
таблетки на
основе U



Ю.П. Зайков
РАН



Ю.С. Мочалов
Росатом

Достигнутые результаты:

степень извлечения U – 99,7 %;

степень очистки:

- 10^{-5} по благородным, щелочным и щелочноземельным элементам;
- 10^{-4} по редкоземельным элементам.

Требуется повысить степень извлечения и степень очистки U,Pu.

В 2045 – 2050 г. планируется запустить новый завод по переработке ОЯТ.

Технология переработки в стадии выбора:

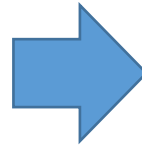
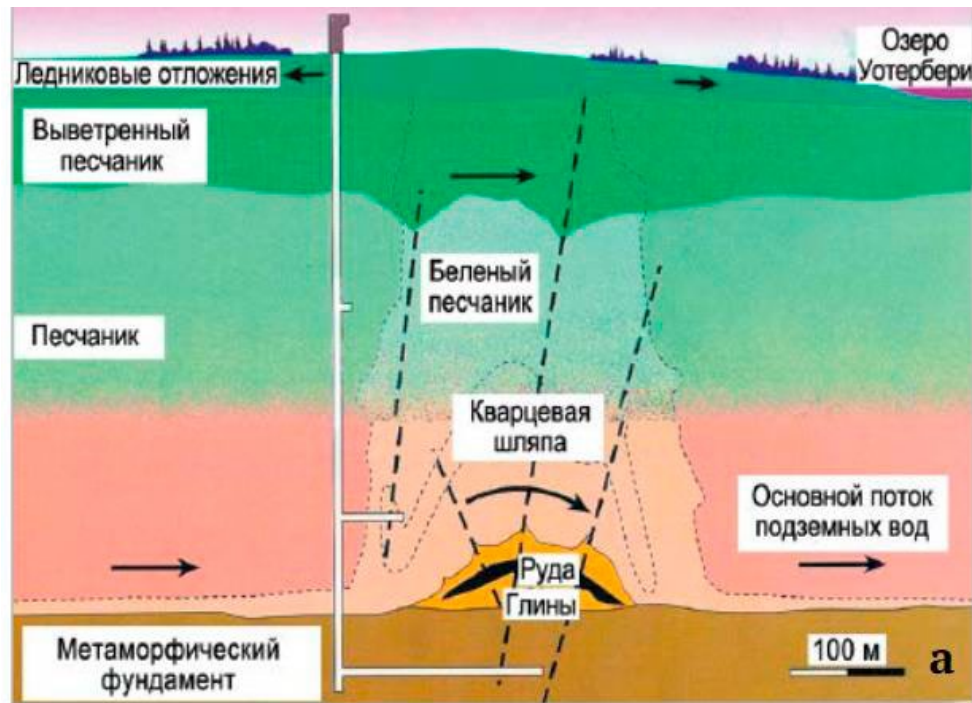
- Штатная гидрометаллургия (PUREX)
- Разрабатываемая пирохимия
- Плазменное разделение
- Новая???

Идеология радиационно – миграционного захоронения ВАО

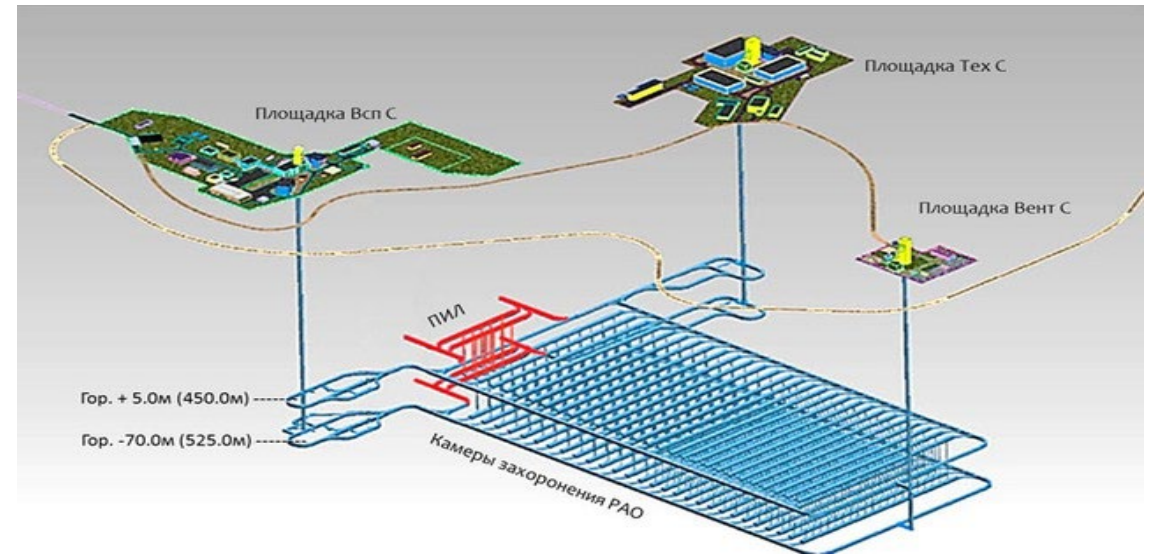
Л.А. Большов
РАН



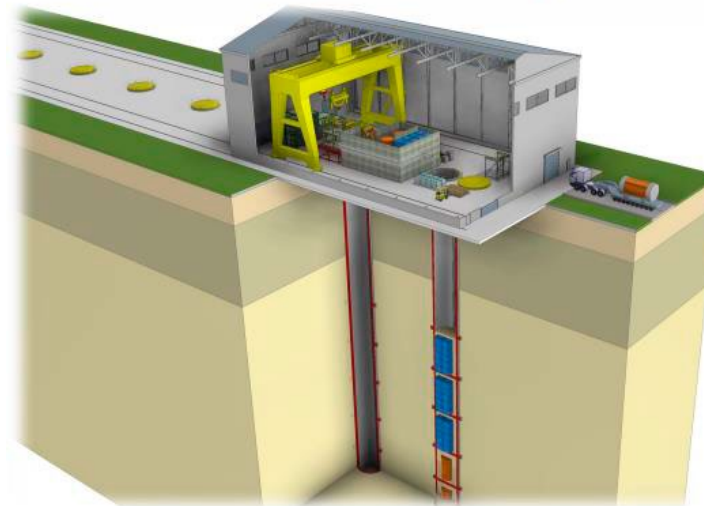
И.И. Линге
РАН



ПИЛ - Подземная Исследовательская Лаборатория



Вид на передвижное каркасное сооружение и скважины захоронения (в разрезе)



Моделирование радиационной обстановки при захоронении ВАО

Начало разрушения через 1 000 лет с нарушением всех упаковок в течение 2 000 лет
Мгновенное заполнение пустых полостей подземными водами.
Учет индивидуальных свойств растворимости соединений ВАО, растворение стекломатрицы с постоянной скоростью.
Диффузионный перенос с учетом сорбции и пределов растворимости радиоактивных соединений через бентонитовый барьер
Геосфера. Поступление радионуклидов в дальнюю зону через горизонтальную и вертикальную трещину с учетом сорбции
Биосфера. Поступление радионуклидов с питьевой водой, растительным и мясным рационом питания



Изотоп	Расчетное время выхода на поверхность (лет)	Превышение допустимых норм по годовой дозе для населения
I^{129} , Cl^{36} , Se^{79} , Tc^{99} , C^{14}	$10^3 - 10^6$	нет

Фракционирование РАО и замыкание ЯТЦ



Б.Ф.Мясоедов
РАН



С.Н.Калмыков
РАН



В.К.Иванов
РАН



А.В. Лопаткин
Росатом



ИБРАЭ РАН

- Идеология захоронения РАО, обоснование безопасности воздействия на окружающую среду



ГЕОХИ РАН

- Разработка новых технологий фракционирования
- Обоснование выбора матриц для захоронения РАО



МГУ им. М.В. Ломоносова

- Разработка экстракционных систем для процессов фракционирования
- Обоснование выбора барьерных материалов для захоронения РАО



ФГБУ «НМИЦ радиологии»

- Оценка влияния на здоровье долгосрочного радиационного воздействия



ИФХЭ РАН

- Обоснование способов обращения с отдельными видами РАО от переработки ОЯТ



Росатом

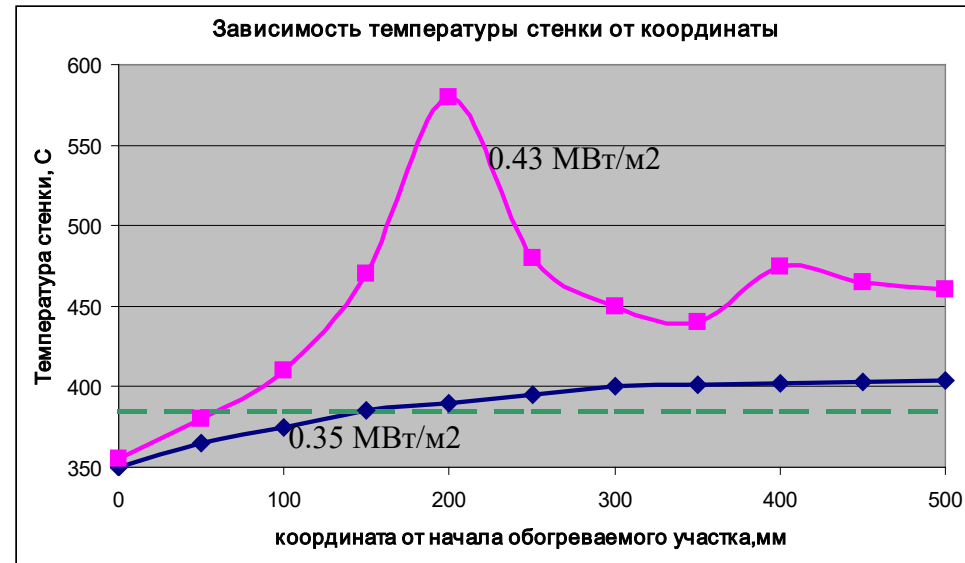
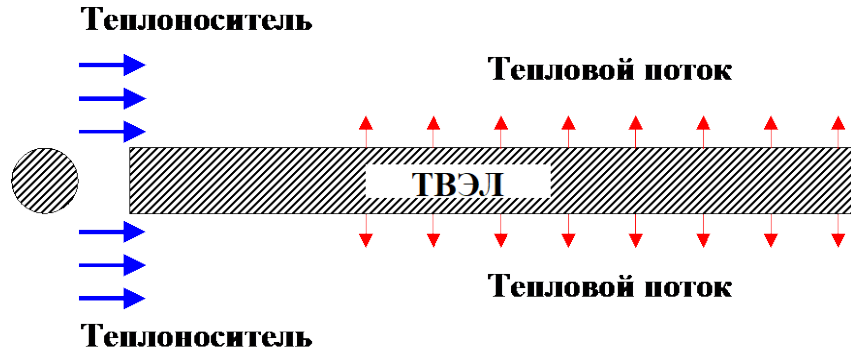
- Идеология радиологической эквивалентности РАО и природного уранового сырья;
- Отработка технологий фракционирования на реальном ОЯТ

Сценарии фракционирования РАО

Сценарий фракционирования	Состояние технологии	Преимущества
Выделение фракции трансурановых элементов (Np, Am и Cm)	Исследования	Трансмутация и дожигание МА в реакторе. Сокращение объемов ВАО для глубинного захоронения или переход к радиологически эквивалентному захоронению.
Выделение «короткоживущей фракции» ($Cs^{137} + Sr^{90}$)	Исследования	Через 150 – 300 лет контролируемого хранения ВАО переходят в разряд САО, технологии захоронения которого отработаны
Глубокое фракционирование. Выделение других групп продуктов деления	Исследования не начинались	Максимальное сокращение объемов РАО, для глубинного захоронения

Режим Сверх Критического Давления - СКД.

Проблемы перехода на СКД параметры теплоносителя в активной зоне ($T = 400+$, $P = 230+$ бар)



А.А. Ковалишин
НИЦ КИ

Режимы с ухудшенной теплоотдачей:

- Физика возникновения режимов с ухудшенной теплоотдачей не понята.
- В традиционной энергетике эти режимы удалось обойти снизив удельные тепловые потоки
- Плотность энергосвечения предопределяет работу ВВЭР СКД в режиме высоких удельных потоков

Результат:

- поддержание конкурентоспособности технологии ВВЭР на отечественном и мировом рынке;
- повышение эффективности энергоблока:
 - Повышение термического КПД;
 - Снижение капитальных затрат.

	Мощность (МВт)	P (атм)/T (°C)	КПД (%)
Угольные ТЭС	400 - 900	~ 280/~ 580	46 - 47
ВВЭР	1000 - 1200	160/330	34 - 38
БН-800	800	130/490	42

Радиационные эффекты в конструкционных материалах

А.В. Дуб
Росатом

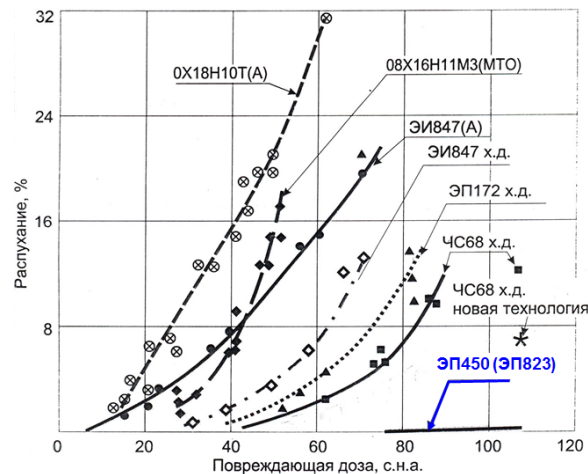


Б.З. Марголин
НИЦ КИ

	Энергия протона, иона (МэВ)	Ток (мкА)	Характерный размер (мкм)	Время достижения уровня 100 СНА
Циклотрон (КИ)	20	25	100÷150	~ 10 дней
Тандем (ФЭИ)	3 (Fe, Ni)	2 - 8	2.5	~ 10 часов
Реактор				~ 5 лет

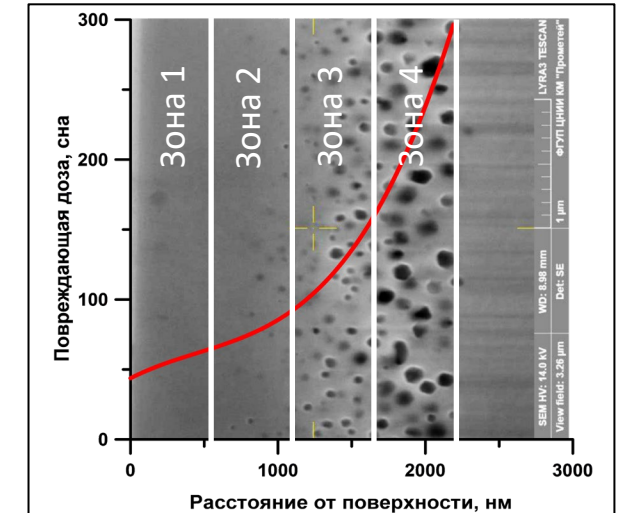
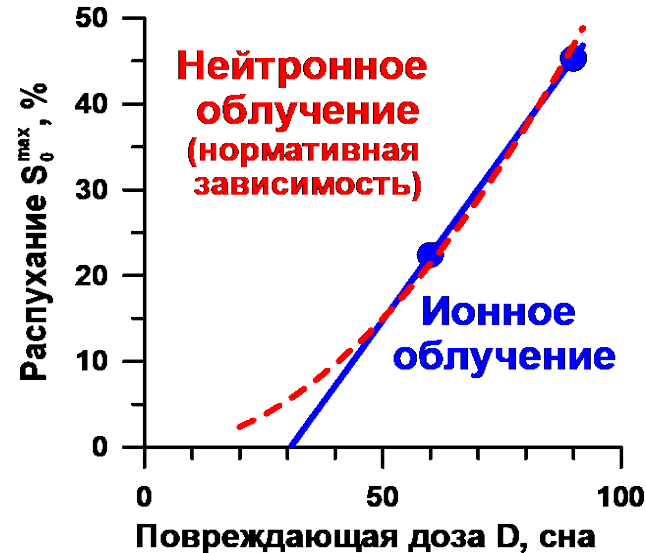


Ускоритель ионов **Тандем**
АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»



Аустенитные стали

Ферритомартенситная сталь



Цифровое материаловедение

Цепочка развития цифровых инструментов

Электронная
теория

Атомистическая
модель

Информатика
материалов

Росатом
РАН

Росатом

РАН
Росатом

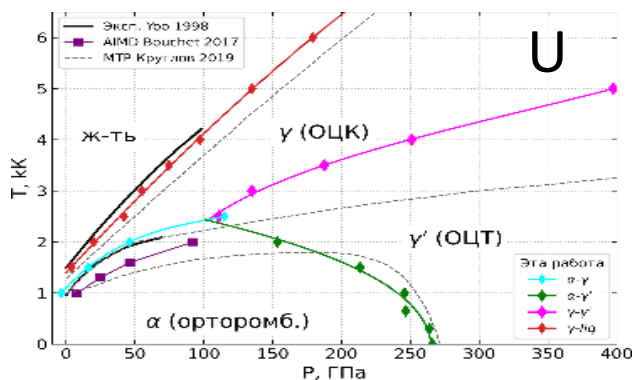


В.В. Дремов
(Росатом)

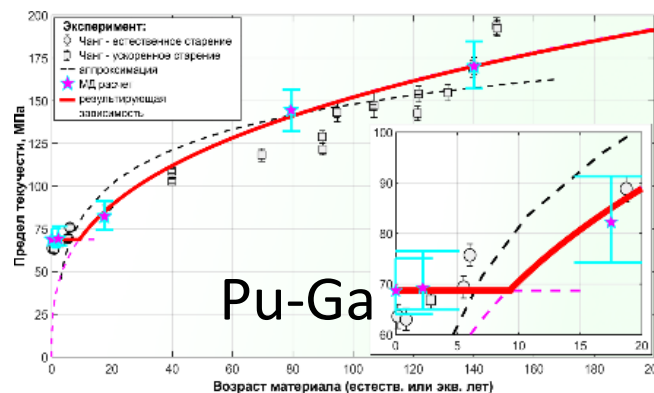


С.В. Стрельцов
(РАН)

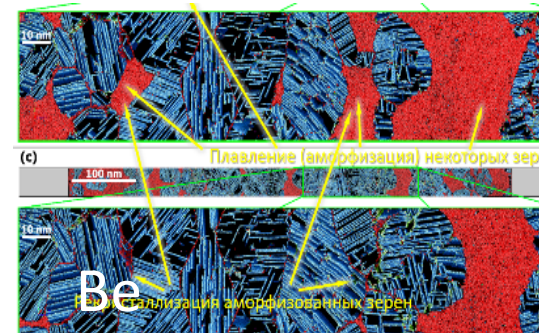
Решенные задачи: Уравнения состояния



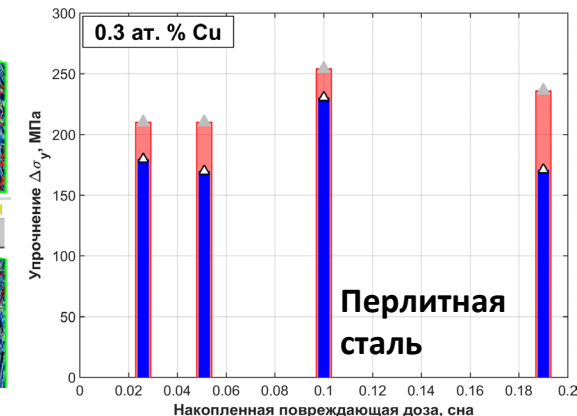
Старение ядерно-активных материалов



Моделирование упругопластики и разрушения



Радиационное упрочнение



Основные проблемы:

Недостатки современной
квантовой теории
конденсированного
состояния

Пути решения:

Развитие методов учета
корреляций и
нелокальности

Необходимые вычислительные средства и результаты:

Комп	1 Пфлопс	5 Пфлопс
Материал	Электронная структура	Электронная структура + данные для атомистической модели
Многокомпонентные материалы на основе железа Fe (3d):		

ПРИМЕНЕНИЕ ВТГР ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА И ХИМИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

ПОТРЕБНОСТЬ В ВОДОРОДЕ



	МИР	РОССИЯ
	98 млн. т.	5.5 млн. т.
АММИАК	43%	54%
НЕФТЕПЕРЕРАБОТКА	36%	25%
МЕТАНОЛ	16%	11%
МЕТАЛЛУРГИЯ	5 %	7%

98% водорода производится в месте употребления

Технология ВТГР позволяет выйти на уровень температур в третьем контуре $T = 750-1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и полностью отказаться от использования метана на нагрев.

Существующие в настоящий момент в РФ технологии и оборудование для получения водорода являются зарубежными

ПРОИЗВОДСТВО ВОДОРОДА

$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}_2 + \text{CO}_2 - \text{E}$	
МЕТАН НА СИНТЕЗ	2 -2.3 т на 1 т H_2
МЕТАН НА НАГРЕВ	1.5-1.8 т на 1т H_2
ВСЕГО	3.5- 4.1 т на 1т H_2



Интеграция ВТГР (200 МВт)

	2 КОНТУР	3 КОНТУР
Теплоноситель	Гелий	вода /пар
Температура $^{\circ}\text{C}$	800	750
Давление (абс.), МПа	4,2	7,0 / 4,7



МЕТАН НА СИНТЕЗ		2 -2.3 т на 1 т H_2
МЕТАН НА НАГРЕВ		0.3 т на 1т H_2
ВСЕГО		2.3 - 2.6 т на 1т H_2

АЭТС с РУ ВТГР и ХТЧ для производства водорода в интересах РФ



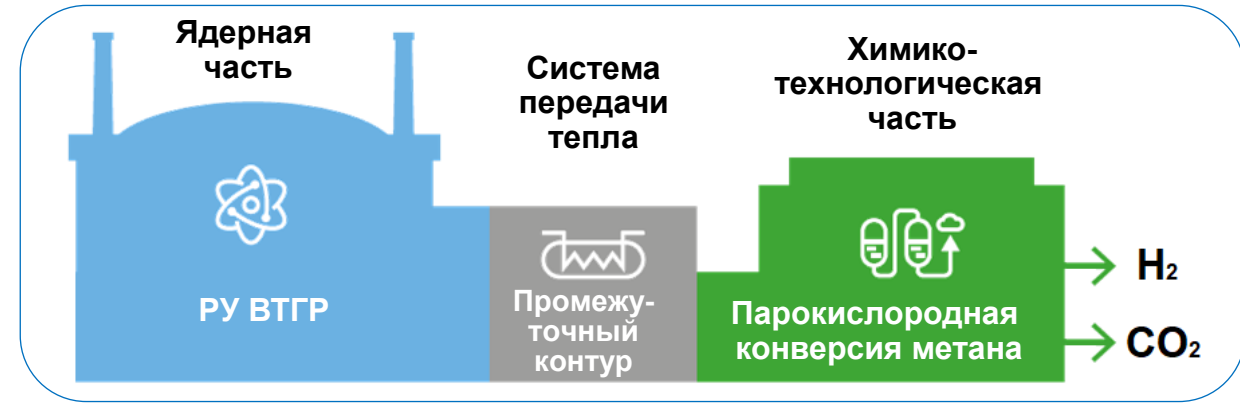
В.В. Петрунин
Росатом



Н.Н. Пономарев-Степной
Росатом



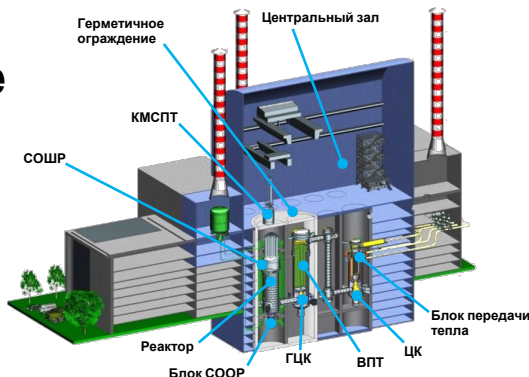
А.Л. Максимов
РАН



Текущий статус работ по ВТГР:

1. Разработан технический проект РУ ВТГР
2. Выполняются НИОКР по топливу, элементам активной зоны, ключевому оборудованию, материалам для подтверждения работоспособности и проектных характеристик

**Завершение
НИОКР –
2028 г.**



ОПЫТНО-ДЕМОНСТРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА (ОДУ)

150 нм³ H₂ в час (110 т в год) – 2025 г. (запуск)

Назначение ОДУ:

Отработка всех технологических стадий:

- сероочистка
- паровой и парокислородный риформинг
- конверсия СО
- аминовая очистка
- выделение водорода на установке КЦА
- подтверждение работоспособности катализаторов
- адсорбентов и хемосорбентов



Текущий статус работ по ХТЧ:

Ведется разработка технологий и оборудования:

- Высокотемпературные теплообменники
- Реакторы паровой конверсии метана
- Реактор и горелки для автотермической (парокислородной) конверсии
- Системы для очистки водорода (короткоцикловая адсорбция) и выделения CO₂

Структура установленной мощности ЕЭС РФ

Доля АЭС в генерации



Центр, Средняя Волга,
Юг, Северо-Запад



Дальний Восток



Урал и Сибирь

ИНЭИ РАН:

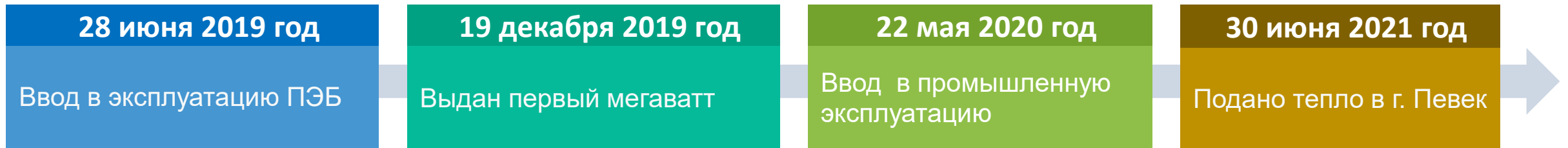
Электрогенерация на Дальнем востоке (Якутия, Чукотка, Хабаровский край, Магаданская обл.):

- 89 % - установки мощностью 0,5 МВт(э);
- 8 % - установки мощностью 2-3 МВт(э);
- 2,2 % - установки 5 - 20 МВт(э);
- 0,6 % - установки 35 - 90 МВт(э);
- 0,2% - установки 200 МВт - 400 МВт(э).

Развитие АЭС малой мощности связано с реализацией промышленных проектов.

АЭС малой мощности (АСММ). Плавучая Атомная Тепло-Электро Станция (ПАТЭС).

Местоположение	г. Певек
Тип реактора	2хКЛТ-40С
Электрическая мощность, МВт	70 (2х35)
Тепловая мощность, Гкал/ч	50
Назначенный срок эксплуатации, лет	40



Положительный опыт эксплуатации определили применение реакторов типа «Ритм» (55 МВт по электроэнергии) в последующих ПАТЭС и наземных АЭС.

АСММ. Реакторная установка «ШЕЛЬФ-М»

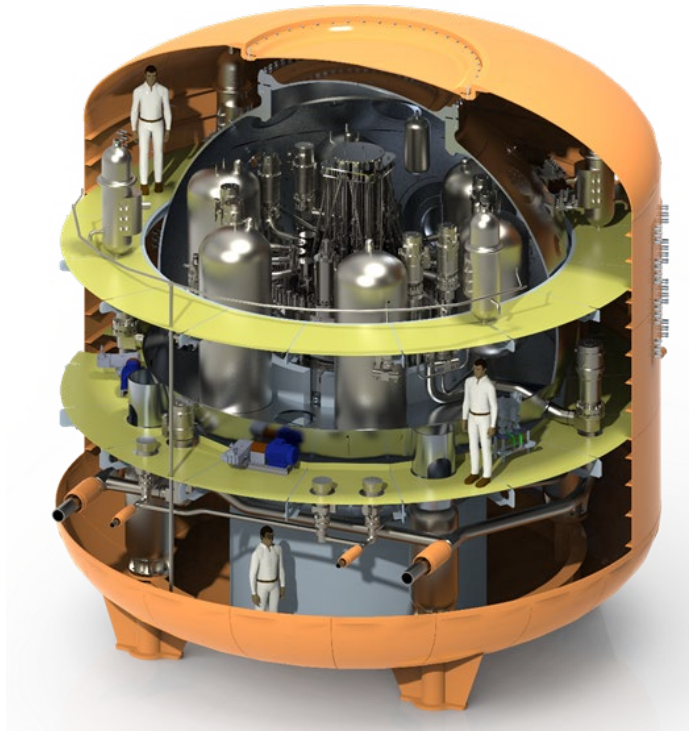
Предназначена для работы в составе АСММ для энергообеспечения объектов различного назначения в удаленных и труднодоступных районах с децентрализованным энергоснабжением



А.В. Каплиенко
Росатом



Д.Г. Куликов
Росатом



Тип реактора	Реактор водо-водяной под давлением
Мощность тепловая	28 - 35 МВт
Мощность электрическая	до 10 МВт
Кампания а.з.	до 80 000 эффективных часов.
Периодичность перегрузки	8 -10 лет
Срок службы РУ	60 лет
Габарит	Диаметр - 8 м, длина - 10 м (исп. «РУ»)
Масса энергокапсулы	350 - 400 т.

Завершение разработки технического проекта реакторной установки в 2024 г.

Пуск энергоблока на месторождении Совиное (Чукотка) запланирован на 2030 г.

Атомная Термoeлектрическая Станция Теплоснабжения «Елена»

АТСТ предназначена для теплоснабжения объектов различного назначения в удаленных и труднодоступных районах.



М.В. Ковальчук
НИЦ КИ



Е.П. Каплар
НИЦ КИ



- Тепловая мощность реактора 7 МВт
- Продолжительность работы на первоначальной загрузке $T=40$ лет;
- Теплоотводные аварии, включая потерю теплоносителя, не представляют опасности и не требуют специальных систем расхолаживания.

Эти особенности АТСТ «Елена-АМ» позволяют без участия персонала обеспечивать:

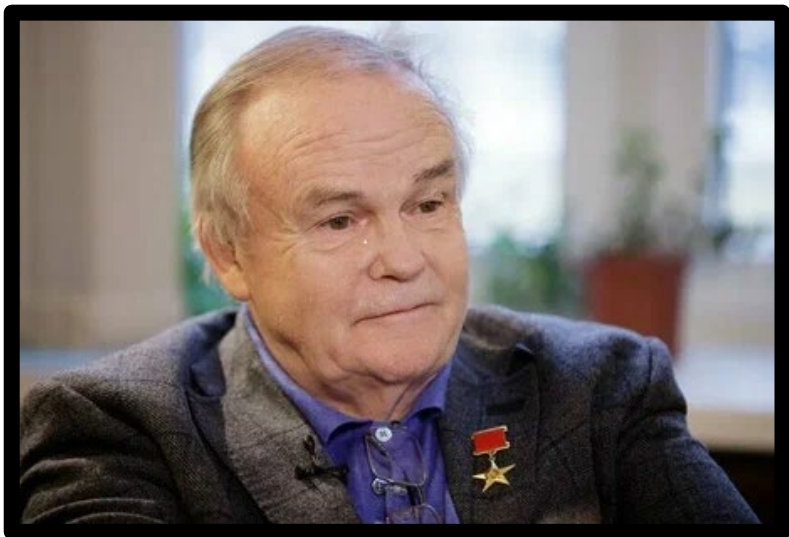
- тепловой энергией до 6 Гкал/ч (~ 1000 жителей)
- электроэнергией до 400 кВт

Выпуск КД на энергоустановку 2030 г.

Токамак с реакторными технологиями (ТРТ) – – инновационный шаг России к термоядерной энергетике

На базе и в развитие ИТЭРа

Инновации ТРТ - рывок к технологиям будущего и развитию высокотехнологичного производства сегодня



Е.П. Велихов
2.02.1935 – 5.12.24

2021 – 2022 разработан концептуальный проект (опубликован в специальных номерах журнала «Физика плазмы»: № 11, 12 в 2021 г. и № 8, 12 в 2022 г.)

2023 – 2024 разработан эскизный проект; созданы элементы инфраструктуры и базовых технологических систем

2025 – 2026 выполнен технический проект

2026 – 2034 разработка и изготовление основных систем

2035 – физический пуск

Инновационная электромагнитная система из ВТСП

Уникальная литиевая защита первой стенки

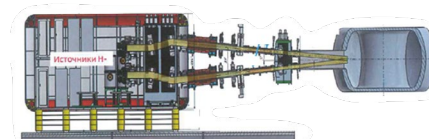
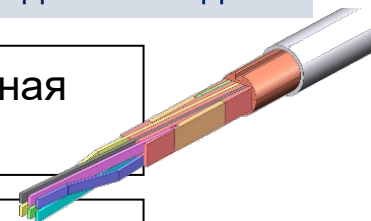
Инновационная система мегаваттных инжекторов

Качающаяся сепаратриса дивертора

Мегаваттные гиротроны с параметрами выше мировых

Инновационные системы ионноциклотронного нагрева и геликонной генерации тока

Технологии гибридного blankets



Сооружение ТРТ это восстановление идеологического и технологического лидерства России в области УТС

Росатом – НИЦ КИ – РАН – Минобрнауки – Hi Tech

Заключение

- Ядерная энергетика России является и будет локомотивом развития науки и широкого спектра индустриальных и технологических сегментов экономики страны;
- В результате выполнения представленных работ будут обеспечены лидирующие позиции России в технологиях:
 - ✓ атомных реакторов большой и малой мощности;
 - ✓ замыкания топливного цикла;
 - ✓ переработки и захоронения ОЯТ;
 - ✓ исследования свойств материалов при радиационном воздействии;
 - ✓ термоядерных исследованиях.
- Перечисленные направления научно-технологического развития предполагается реализовать в рамках национального проекта «Новые атомные и энергетические технологии»;
- Расширение участия РАН в исследованиях по направлениям национального проекта – необходимое условие его успешной реализации.

Спасибо за внимание