РОСАТОМ

Безопасность, эффективность
и экономика атомной энергетики

МНТК

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Проект «ПРОРЫВ»

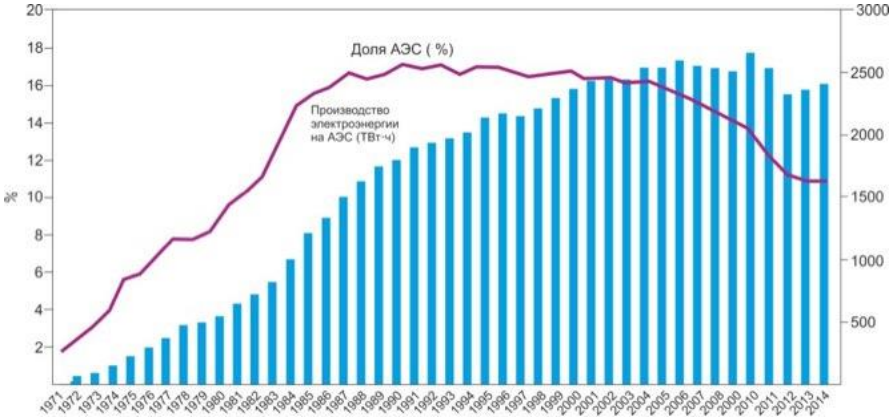
Е.О. Адамов
научный руководитель проектного направления «Прорыв»

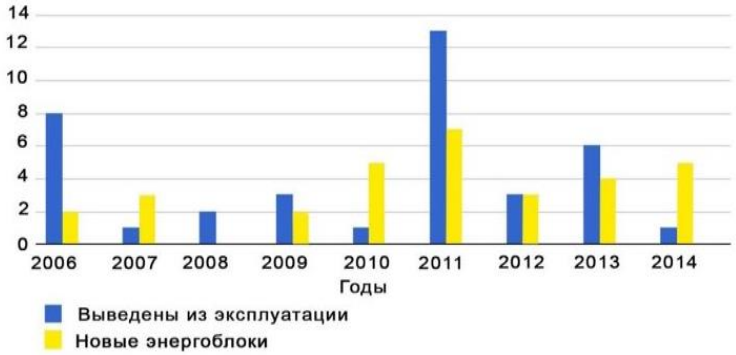
В.А Першуков
руководитель проектного направления «Прорыв»

25 мая 2016 г.

Доля традиционной ЯЭ в мире

- Активный рост производства энергии на АЭС второй половины XX века в конце 80-х сменился стагнацией, а с начала 2000-х пошёл спад (с 18% до 11%)
- Вывод блоков АЭС из эксплуатации превышает ввод АЭС, уступающий по масштабам и вводу альтернативной энергетике (около 30-50 ГВт в год по ветровым ЭС)
- 6 тяжелых аварий за 60 лет. Фукусима - ущерб >100 млрд. долл.
  Отказ ряда стран от развития ЯЭ (Германия, Швейцария, Бельгия, Италия)
- Резкий рост КВЛ в обеспечение требований безопасности





Проблема облучённого топлива (ОЯТ) из отложенной перешла в разряд насущной (рост интереса к ЗЯТЦ, заполнение бассейнов выдержки, расширение объектов переработки)

- **В мире произведено более 400 тыс. т ОЯТ, рост на 10-12 тыс.т/год, переработано около 120 тыс. т**
- **Увеличены требования по срокам и рискам к хранению ОЯТ****

***EPA требует от DOE доказать, что Yucca Mountain может безопасно хранить ОЯТ, с учетом последствий возможных землетрясений, извержений вулканов, изменения климата и коррозии контейнеров, на срок с 10 000 до 1 000 000 лет.*

Цели проекта «ПРОРЫВ»

- Исключение тяжелых аварий, требующих эвакуации населения
- Полное использование энергетического потенциала уранового сырья
- Последовательное приближение к радиационно-эквивалентному (по отношению к природному сырью) захоронению РАО
- Технологическое усиление нераспространения
- Обеспечение конкурентоспособности ЯЭ в сравнении с другими видами генерации по стоимости энергии

ЧЕРНОБЫЛЬ, ФУКУСИМА – ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ИЛИ СЛУЧАЙНОСТЬ?

РОСАТОМ

1955 г. EBR-1 расплавили 45% топлива (БР)

1957 г. Windscale, пожар графитовой кладки

1957 г. Челябинск – 70, Кыштымская авария

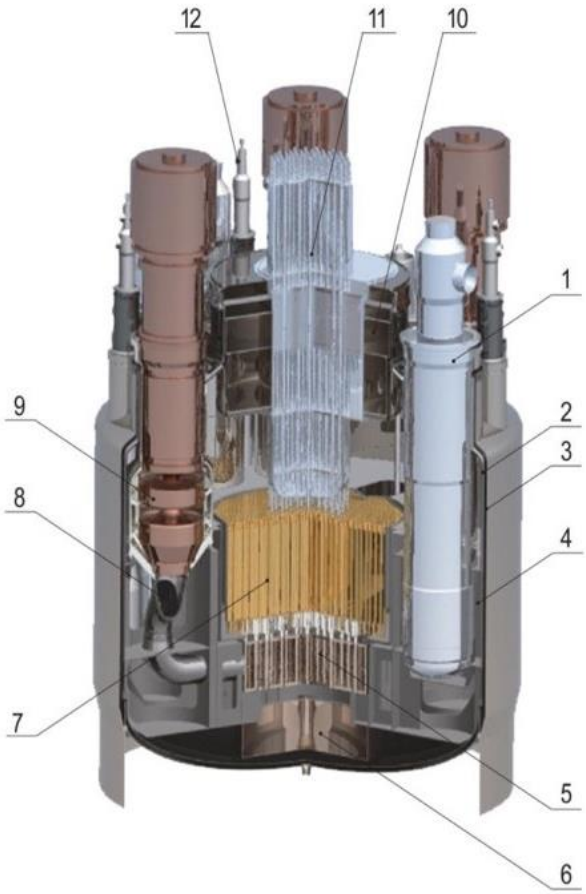
1979 г. TMI – плавление топлива на 2-м блоке

1986 г. ЧАЭС – разгон реактора на мгновенных нейтронах

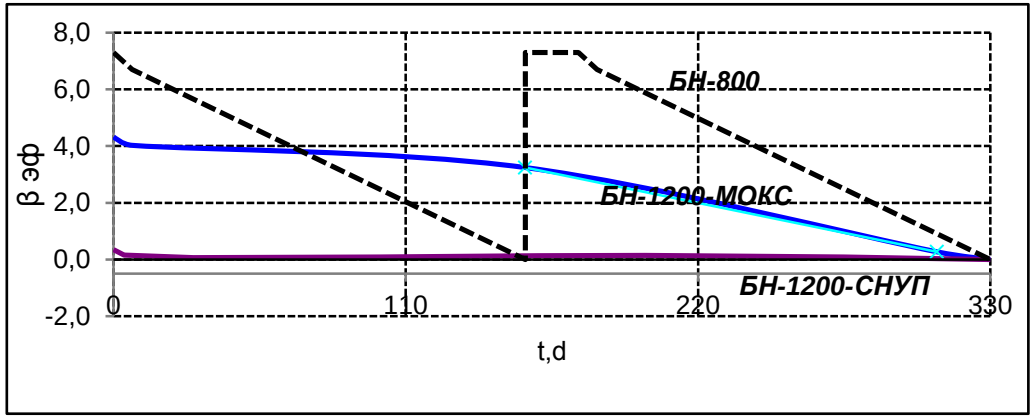
2011 г. Фукусима - плавление топлива 3-х блоков и в хранилищах ОЯТ

Проект «Прорыв»: исключение аварий с потерей охлаждения и с разгоном реактора на мгновенных нейтронах

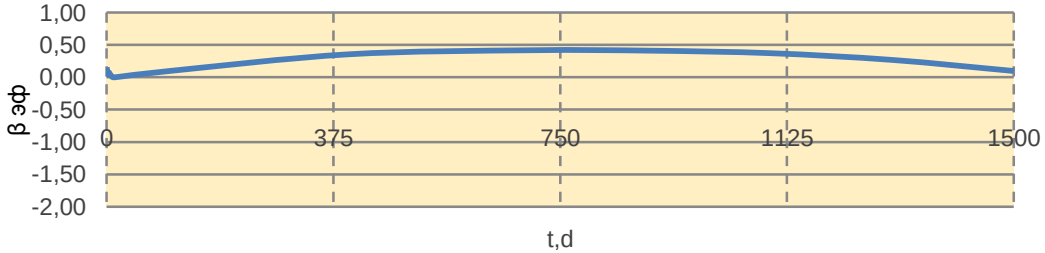
Интегральная конструкция РУ – позволяет локализовать течи теплоносителя в объёме корпуса РУ и исключить осушение активной зоны. Это исключает аварии, требующие эвакуации населения.



Равновесное плотное топливо – исключение реактивностных аварий в РУ



Запас реактивности в РУ БРЕСТ со СНУП-топливом



Реакторные испытания экспериментальных сборок со СНУП топливом

РОСАТОМ

Реактор БН-600

Поставлено на облучение 11 ЭТВС (более 400 ТВЭ)
В 2016 году постановка на облучение 4 ЭТВС (12-15)
Завершено облучение 4-х ЭТВС
Все сборки сохранили герметичность

Реактор БОР-60

Поставлено на облучение 10 разборных ЭТВС, из них:
Завершено облучение 1 ЭТВС (ОУ-1).
ОУ-5 выгружено из-за разрушения твэлов вследствие её перегрева

Реактор МИР

Поставлена на облучение инструментальная сборка из 7 твэлов, с датчиками внутриреакторного контроля температуры центра топлива, давления газа под оболочкой и удлинения топливного столба.

Результаты ПРИ твэлов КЭТВС-1 БН-600 (выгорание 5,5% т.а.)

- Максимальная деформация оболочки в нитридных твэлах ниже, чем в оксидных.
- Газовыделение из СНУП топлива в 3 раза ниже, чем из оксидного, при этом наблюдается повышенное содержание гелия в СНУП топливе за счет (n,α) –реакции на азоте.
- Первичные ПРИ показали отсутствие массопереноса топлива, разрывов дистанцирующей проволоки, взаимодействие твэлов в пучке, наличие локальных зазоров между оболочкой и таблетками.
- Проведено сравнение экспериментальных данных с данными послетестовых и проектных (предтестовых) расчетов:
  - по профилометрии и удлинению твэлов и топливного столба;
  - по газовыделению.

Технологии переработки ОЯТ РБН

Показатель	Коэффициент очистки фракции U-Pu (Np) от ПД		Извлечение актинидов Pu (Am)		Выдержка ОЯТ перед переработкой	
	ФАКТ	Потенциал	ФАКТ	Потенциал	ФАКТ	Потенциал
Пиро	10^3	10^6	97 % (95 %)*	99,9% (99,9 %)	1 год	1 год
ГФТ	10^{4-6}	10^7	-	99,9% (99,9 %)	-	1 год
Гидро	10^7	10^7	99,9 % (99,9 %)*	99,9% (99,9 %)	4 года	3 года
пиро + гидро	-	10^7	-	99,9% (99,9 %)	-	1 год
ГФТ + гидро	-	10^7 **	-	99,9% (99,9 %) **	-	1 год

РН-процесс – комбинированная технология переработки ОЯТ БР

Комбинированная схема:

- позволяет перерабатывать ОЯТ с низким временем выдержки и высоким выгоранием
- обеспечивает поддержку режима нераспространения
- предусматривает потери ДМ ≤ 0,1 %
- производит продукты, пригодные для фабрикации топлива
- обеспечивает низкие объемы ВАО
- предусматривает выделение Am и Cm и отделение Am от Cm

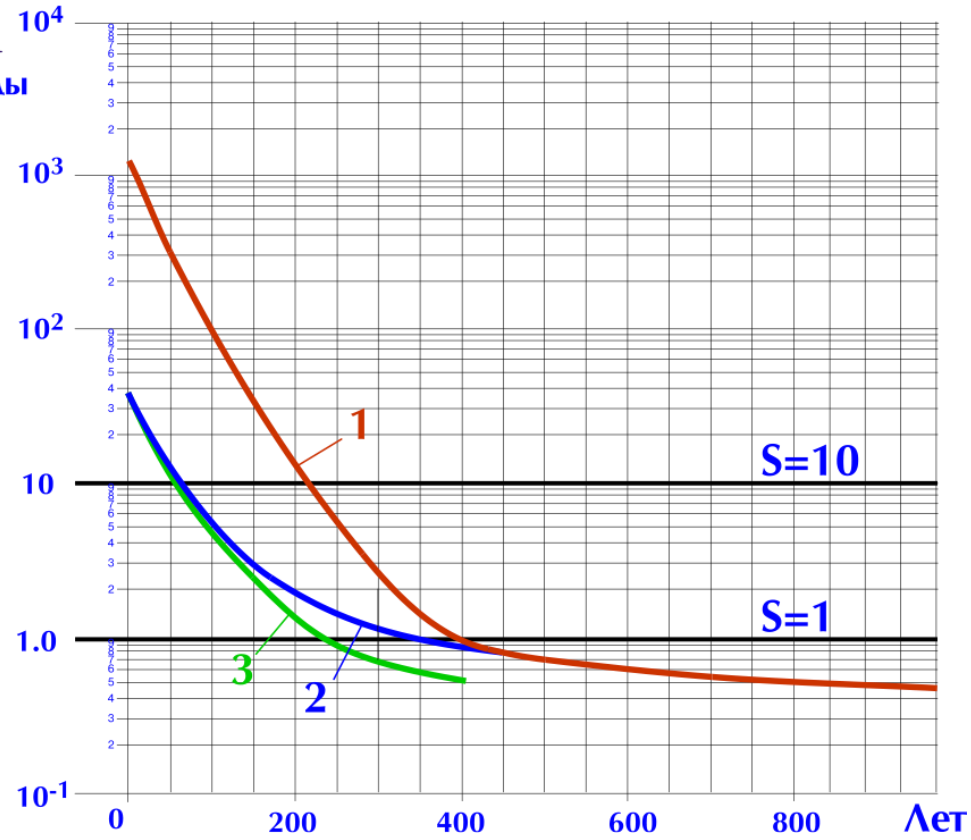
Выбор теплоносителя

- **Взаимодействие свинца с воздухом** происходит с малой интенсивностью, с образованием оксидной плёнки, блокирующей дальнейшее развитие реакции.
- **Инертность теплоносителя к воде** полностью исключает возможность образования взрывоопасных количеств водорода в реакторном контуре.
- **Высокая температура кипения и большая теплоёмкость свинца** исключают аварии, связанные с кризисом теплообмена, а также снимают проблему положительного пустотного эффекта реактивности, связанную с кипением теплоносителя.
- Меньшая **замедляющая способность** тяжёлых ядер свинцового теплоносителя по сравнению с лёгкими ядрами натрия
  - решает проблему положительного **пустотного эффекта** реактивности,
  - позволяет использовать широкую решётку твэлов в активной зоне, что
    - устраняет ограничения на интенсивность **естественной циркуляции** теплоносителя, играющей ключевую роль в исключении аварий с потерей охлаждения
    - позволяет существенно уменьшить расход **мощности на прокачку** теплоносителя.
- **Удержание продуктов деления** (йод, цезий и др., кроме инертных газов) уменьшает возможность и тяжесть утечек радиоактивных материалов в окружающую среду.
- Отсутствие висмута (по сравнению со свинцово-висмутовым теплоносителем) **исключает проблему радиоактивного полония** (Po-210).
- Большая распространённость свинца в земной коре, чем висмута, **меньшая стоимость**.

Радэквивалентность РАО и уранового сырья

$$S=\frac{A^{р.-экв.}_{ДВАО}}{A_{U\,руды}}$$

Кривая	Доля, идущая в отходы, %				
	Sr	Cs	U	Pu	MA (Np+Am+Cm)
1	10	15	0,05	0,1	0,1
2	0,1	1	0,05	0,1	0,1
3	0,1	1	0,01	0,01	0,1



Радиационный баланс без учета (S = 1) и с учетом миграции (S = 10) нуклидов, в зависимости от времени длительной контролируемой выдержки долгоживущих высокоактивных отходов (ДВАО)

Радиационно-эквивалентное обращение ЯМ в топливном цикле

- переработка ОЯТ для передачи Pu, MA (U, Pu, Am, Np, Cm) и долгоживущих продуктов деления (Tc, I) для трансмутации в быстрых реакторах
- промежуточное хранение высокоактивных отходов перед окончательным захоронением в течение примерно 150-300 лет для снижения их биологической опасности примерно в 100 раз
- совместное извлечение из недр с природным ураном сопутствующих радия и тория для последующей трансмутации в топливе быстрых реакторов

Технологическое усиление режима нераспространения

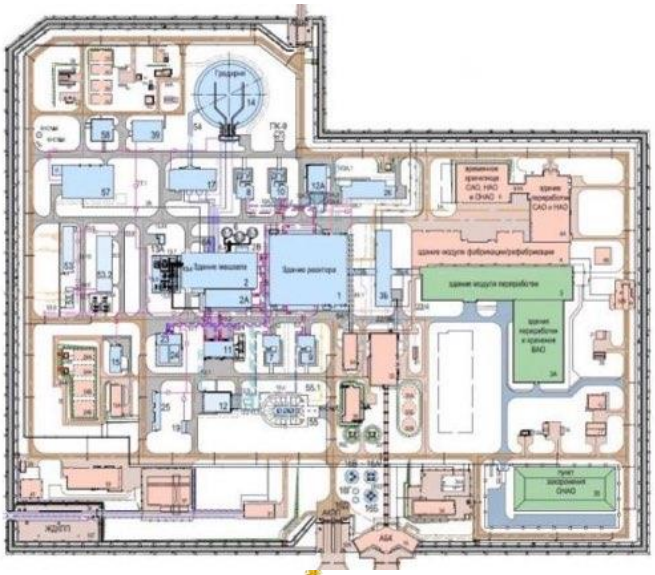
Исключение из топливного цикла ЯЭ:

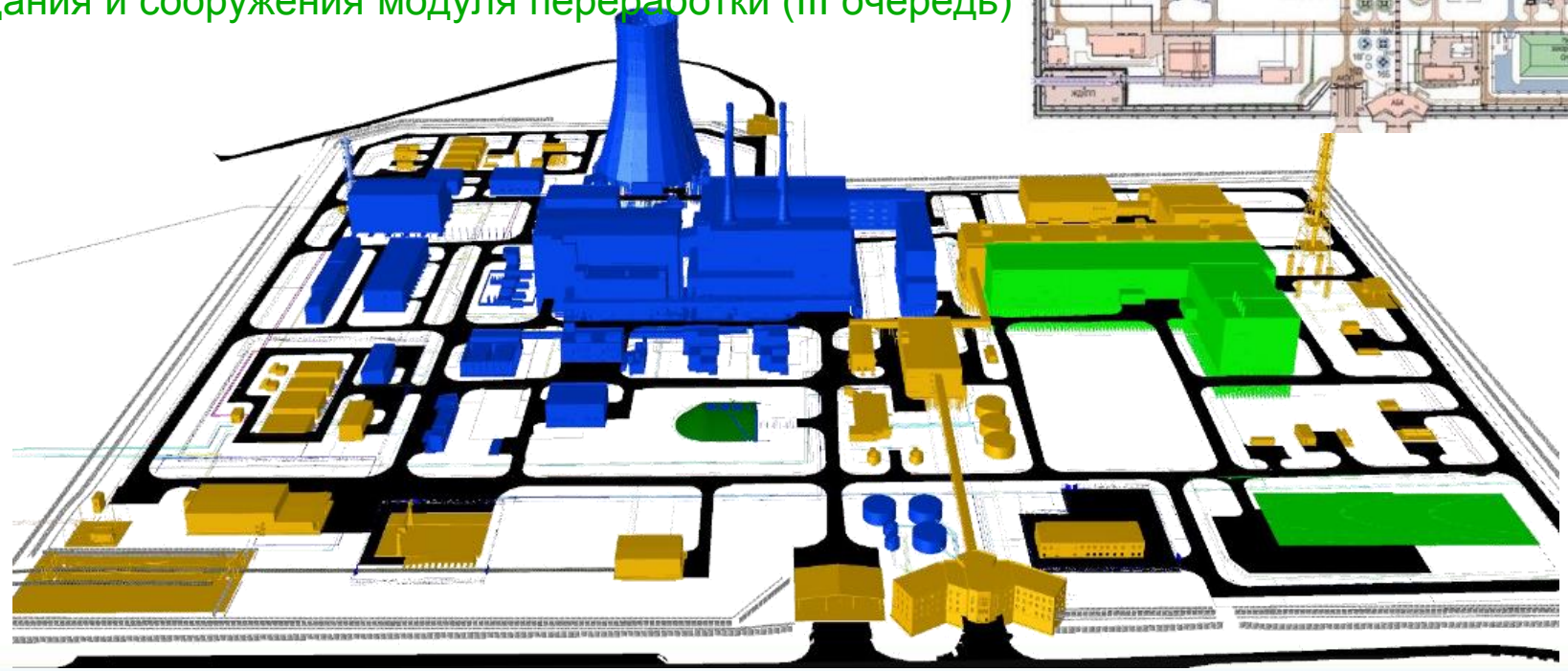
- разделения изотопов урана (обогащение)
- бланкета для наработки чистого Pu
- выделения плутония и/или 233U, 235U из облученного топлива
- долговременных хранилищ облученного топлива
- хранилищ выделенного плутония
- основных потоков транспорта ядерных материалов

Проект «ОДЭК». Общий вид площадки

Четыре очереди строительства и ввода в эксплуатацию ОДЭК:

- Здания и сооружения модуля фабрикации и пускового комплекса рефабрикации (I и IV очереди)
- Здания и сооружения энергоблока с РУ БРЕСТ-ОД-300 (II очередь)
- Здания и сооружения модуля переработки (III очередь)

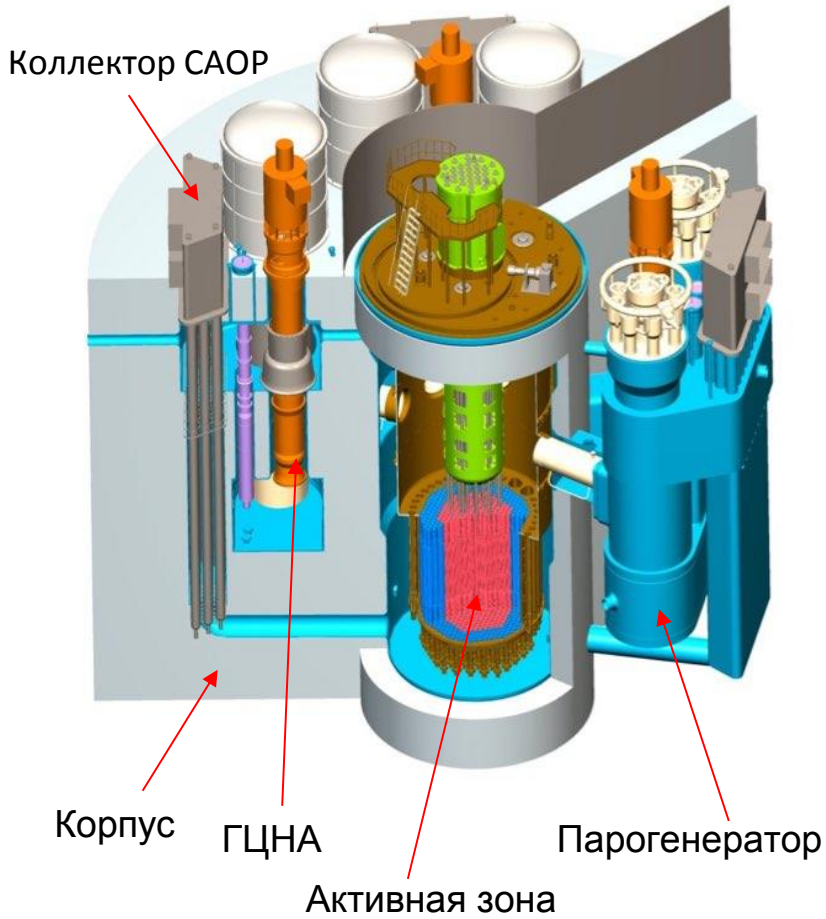




Основные характеристики ОДЭК

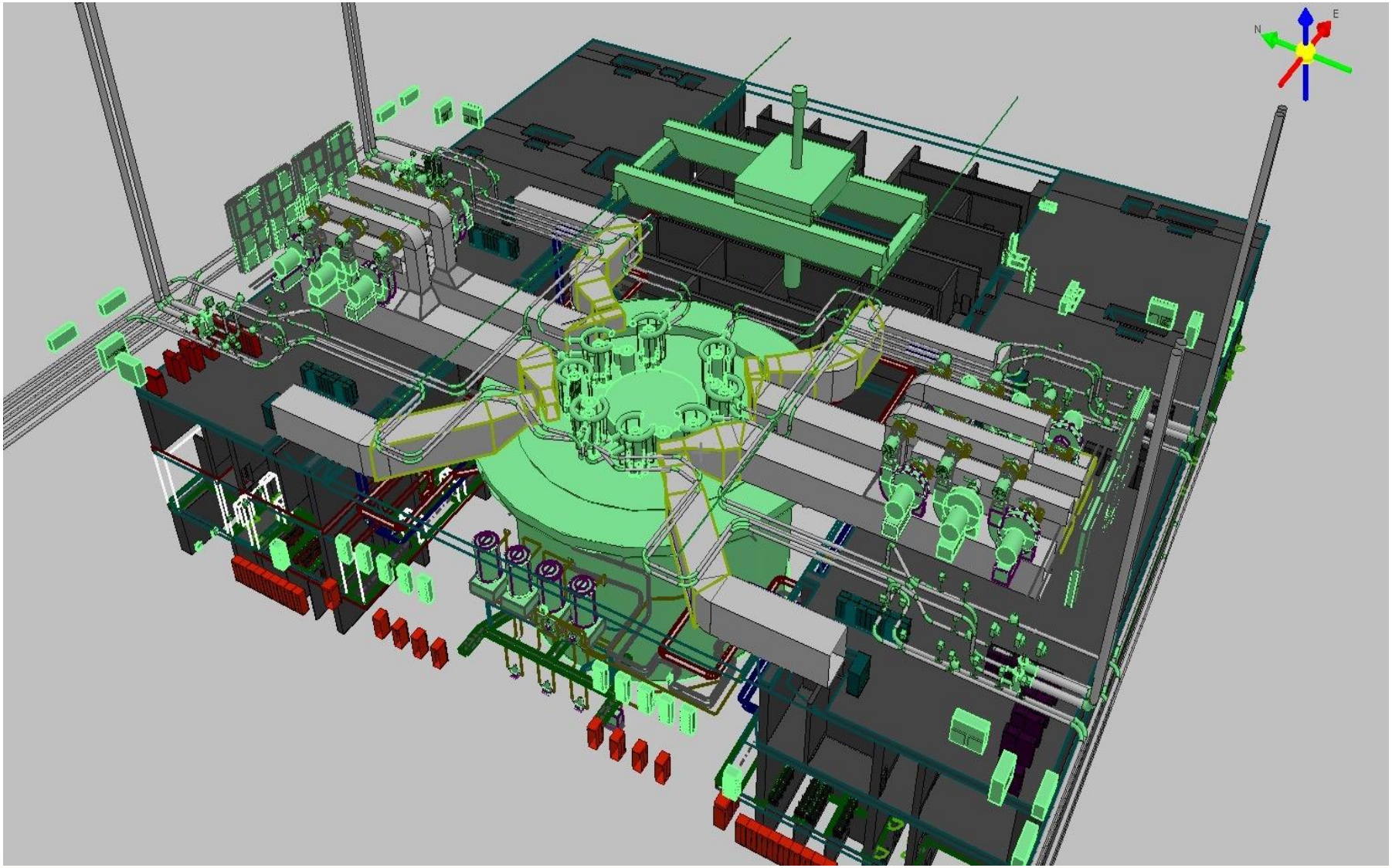
Установленная электрическая мощность энергоблока	300 МВт
Вид топлива	СНУП
Производительность производства фабрикации и рефабрикации СНУП-топлива	14 т/год
Производительность производства переработки отработанного ядерного топлива РУ БРЕСТ-ОД-300	5 т/год

Основные элементы и технические характеристики РУ БРЕСТ-ОД-300



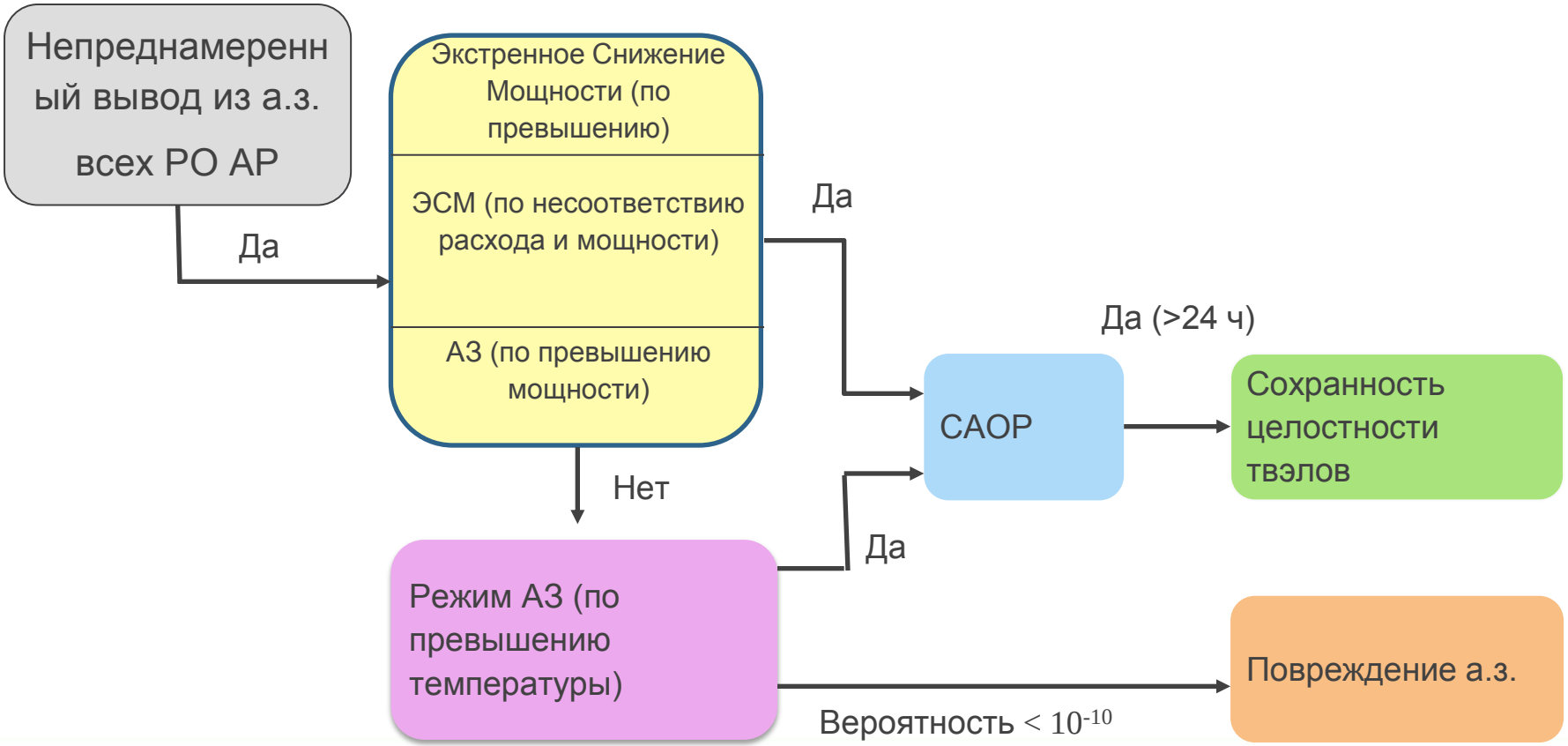
Тепловая мощность, МВт	**700**
Количество петель	**4**
Теплоноситель первого контура	**свинец**
Максимальное (гидростатическое) давление теплоносителя в первом контуре, МПа	**1,17**
Средняя температура Pb на входе/выходе из активной зоны, °С	**420/535**
Число ТВС в активной зоне	**169**
Загрузка топлива, т	**20,6**
Электрическая мощность ЭБ, МВт	**300**
Средняя температура рабочего тела на входе/выходе из парогенератора, °С	**340/505**
Давление на выходе из парогенератора, МПа	**17**
Паропроизводительность, т/ч	**1500**
КПД, %	**43**

Вид (разрез) центрального зала РО и основного оборудования РУ БРЕСТ-ОД-300



Сценарий для ННЭ с ИС: ввод полного запаса реактивности

Группа инициирующих событий	Функции безопасности и ожидаемые последствия		
	Аварийный останов реактора и поддержание его в подкритическом состоянии	Аварийный отвод остаточного тепла от ТВЭ в Pb и атмосферу	Ожидаемые последствия



Безопасность РУ БР

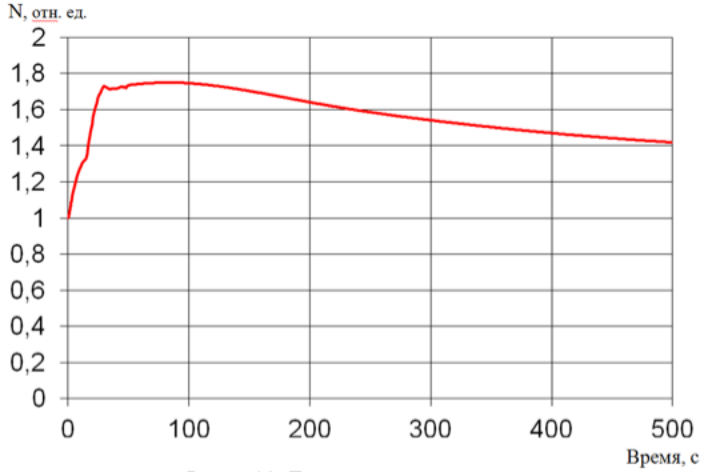


Рисунок 4.1 - Поведение мощности реактора

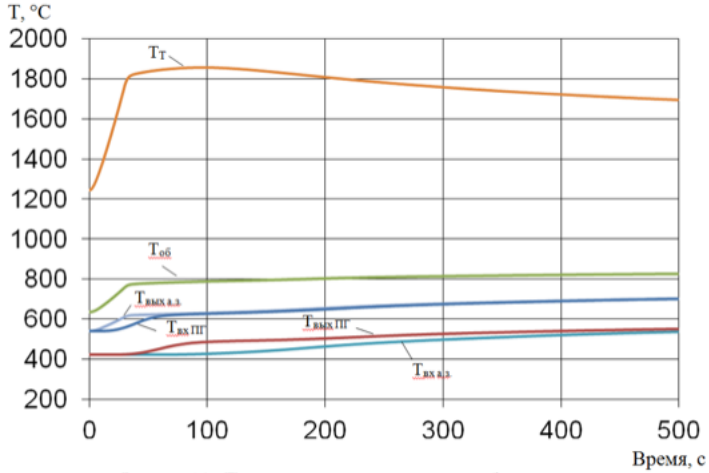


Рисунок 4.2 - Поведение температуры топлива, оболочки твэл, свинцового теплоносителя на входе и выходе а.з. и ПГ

Быстрые реакторы по своим фундаментальным свойствам обладают наиболее высоким потенциалом обеспечения ядерной безопасности за счет минимальных эффектов реактивности при переходных процессах и изменении состава топлива (отсутствие сильных поглотителей, йодных ям и т.п.)

Полное воспроизводство топлива позволяет исключить саму потенциальную опасность возникновения неуправляемого разгона на мгновенных нейтронах – требуемый для этого запас реактивности

Проектные проработки этой идеи показали возможность ее практической реализации.

На примере РУ БРЕСТ-ОД-300 расчеты показывают, что неуправляемый рост мощности при введении полного проектного запаса реактивности блокируется на уровне 1.4Nном

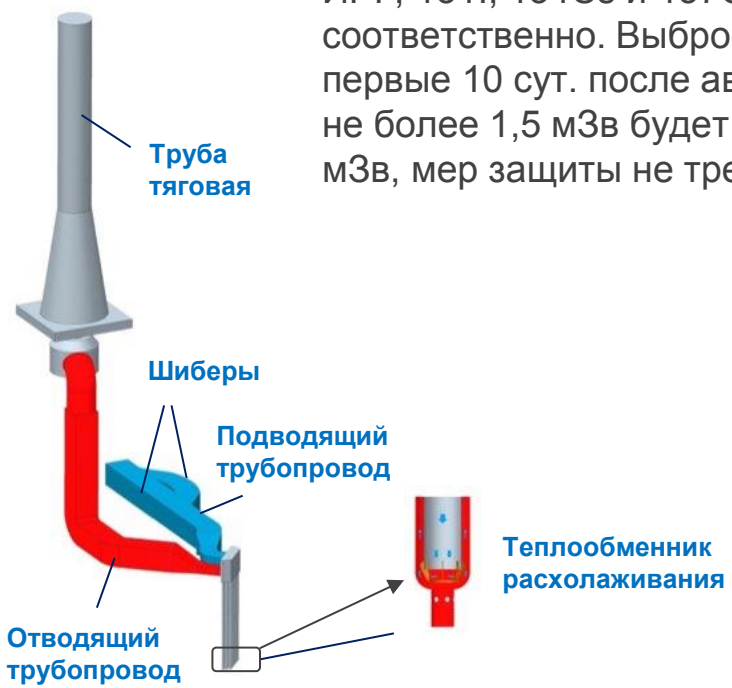
При этом температура оболочек твэл не превышает 815°С, плавление твэл исключено.

Радиационные последствия

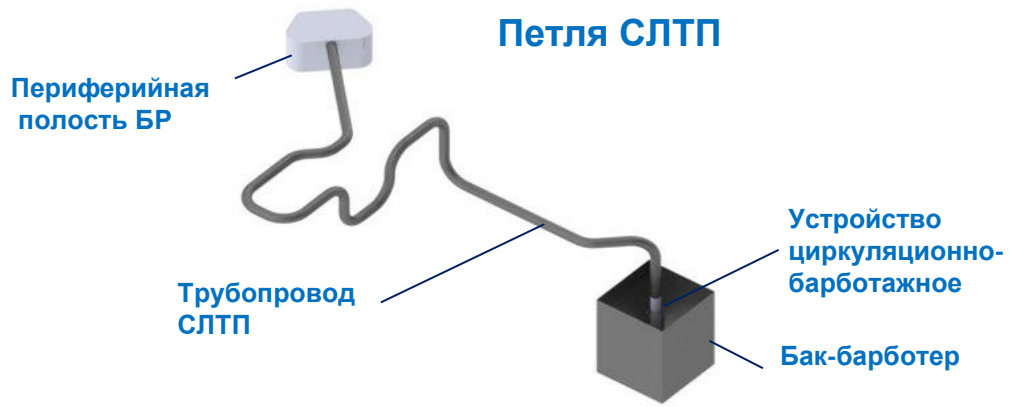
При сценарии с вводом оперативного запаса реактивности выход ПД из РУ за первые сутки не более 4,3*

При **дополнительном наложении** разгерметизации парогенератора и разгерметизации системы локализации течи парогенератора суточный выбросы ИРГ, 131I, 134Cs и 137Cs составят 3,4·1015 Бк, 5,7·108 Бк, 2,8·108 Бк и 3,7·108 Бк соответственно. Выброс трития составит 5·1014 Бк, а 210Po – 5,8·107 Бк. За первые 10 сут. после аварии максимальная внешняя доза облучения населения не более 1,5 мЗв будет наблюдаться на границе промплощадки (не превышает 5 мЗв, мер защиты не требуется).

Петля САОР



Петля СЛТП



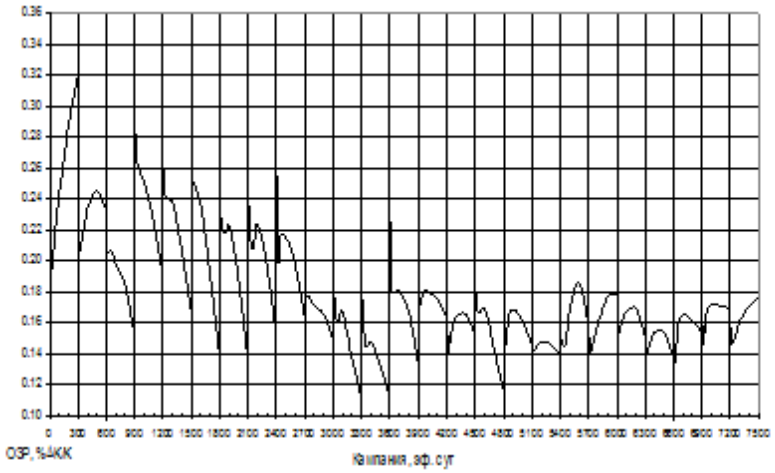
Благодаря конструктивным решениям по РУ, применению свинцового теплоносителя, обеспечению малого запаса реактивности, пассивным системам безопасности, **суммарная вероятность повреждения а.з. от всех ИС** на базе 24 ч **не более 9·10-9 1/год.**

Активная зона

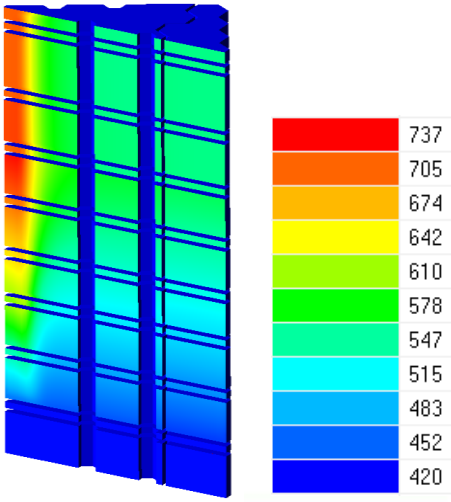
Подтверждены базовые принципы равновесной активной зоны:

- максимальный запас реактивности на номинальной мощности - **0,4$\beta_{эф}$ (0,65 $\beta_{эф}$)** с учётом эксплуатационных измерений и возможностей компенсации погрешностей на начальном этапе;
- выход в равновесный режим в условиях замкнутого топливного цикла с трансмутацией МА;
- стабильность нейтронного поля: отн. изменение по микрокампании мощности **ТВС ЦЗ < 1 % и ТВС ПЗ < 3 %**, максимальная линейная мощность твэл **ТВС ЦЗ - 420 Вт/см и ТВС ПЗ - 340 Вт/см;**

Экспериментальное подтверждение физической концепции равновесного режима будет выполнено при опытно-промышленной эксплуатации в ЗЯТЦ.

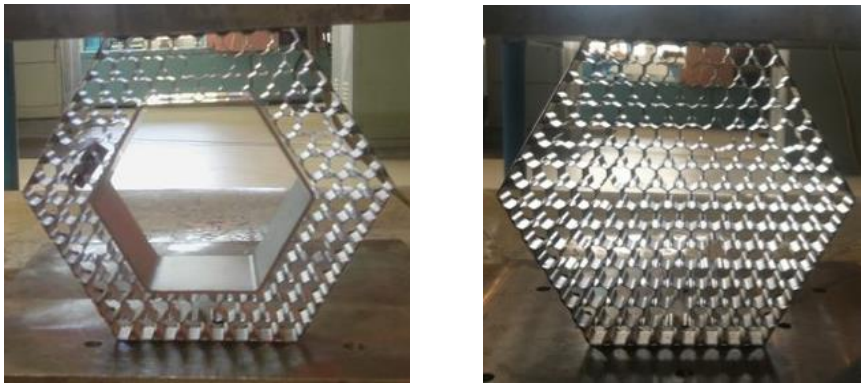


Для а.з. с бесчехловыми ТВС перекрытие проходного сечения 7 центральных ТВС не приводит к превышению пределов безопасной эксплуатации по температуре оболочки твэл



Обоснование изделий активной зоны

- в промышленных условиях изготовлены макеты всех типов ТВС
- получены прочностные характеристики элементов ТВС и макетов в сборе
- получены виброметрические и вибропрочностные характеристики макета ТВС ЦЗ
- получены гидравлические характеристики макета ТВС ЦЗ и ТВС с РО СУЗ (на воде)
- идут реакторные испытания ЭТВС в БН-600 (11 ЭТВС)
- идут реакторные испытания в БОР-60 (10 ТВС)

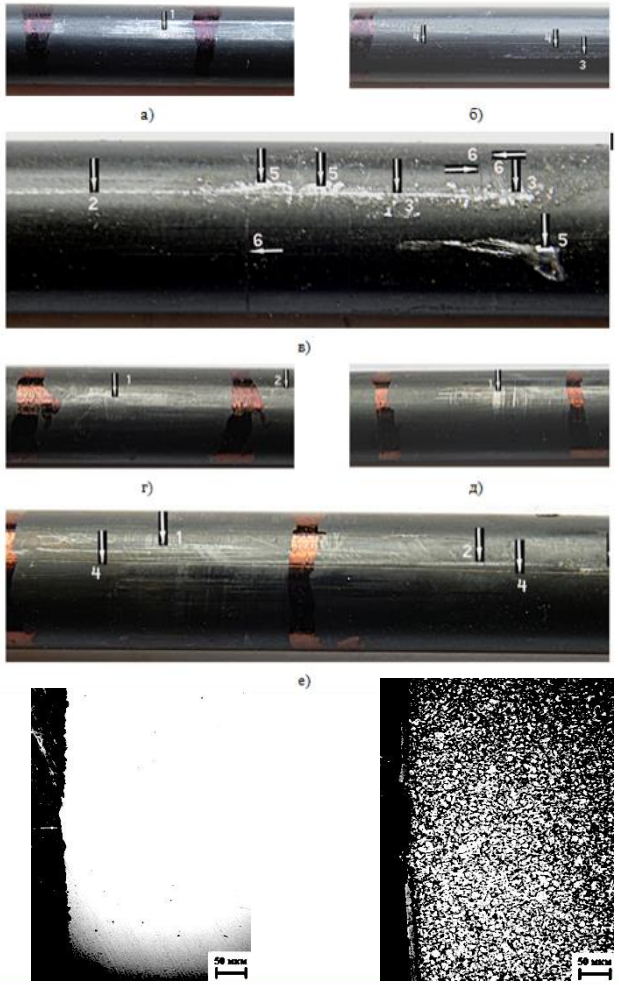


Испытания сейсмостойкости ДР ТВС с РО СУЗ и ДР ТВС ПЗ

Механические испытания макетов и каркасов ТВС ПЗ и ТВС с РО СУЗ

Обоснование изделий активной зоны

Коррозионные испытания двух макетов 540С и 450С по 2500 ч
Следы контакта под ДР сравнимы с толщиной оксидного слоя (менее 20 мкм)

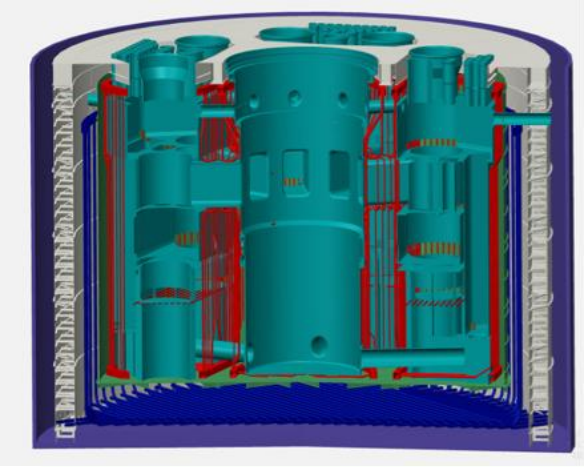


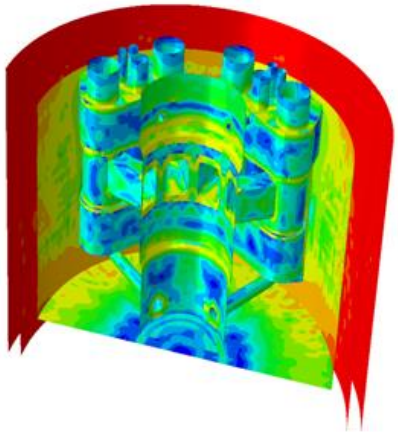
Внешний вид макета и поверхности имитатора твэла после испытаний в потоке свинцового теплоносителя (1 - светлая полоса, 2 - светлая полоска, 3 - полоска серого цвета, 4 - риска-царапина, 5 - фрагменты Pb, 6 - поперечная риска-царапина) а,б,в) в зоне нижней ДР; г,д) в зоне средней ДР; е) в зоне верхней ДР

Микроструктура оболочки до и после травления

Корпус

- Интегральная компоновка обеспечивает вероятность потери теплоносителя не более 9,7Е-10 1/год.
- Корпус выполняет локализующую функцию.
- Показано отсутствие химического взаимодействия свинца с бетоном, глубина проникновения не более 0,5 мм.
- На созданном полномасштабном макете центральной части корпуса отработаны режимы разогрева, завершены эксперименты по технологии сушки, определению газовыделения;
- Разработаны ТУ на биметалл оболочки (границы первого контура) ЭП302-09Г2С, изготовлено 5 листов;
- Разработаны ТУ на бетоны жаростойкие, получены их физические характеристики в рабочем диапазоне
- Завершены исследования радиационной стойкости на полный ресурс металла оболочек (0,12 сна) и бетона (увеличение прочности на сжатие 24%, уменьшение теплопроводности на 8%, уменьшение коэффициента линейного расширения на 10%), показана достаточность характеристик





Парогенератор

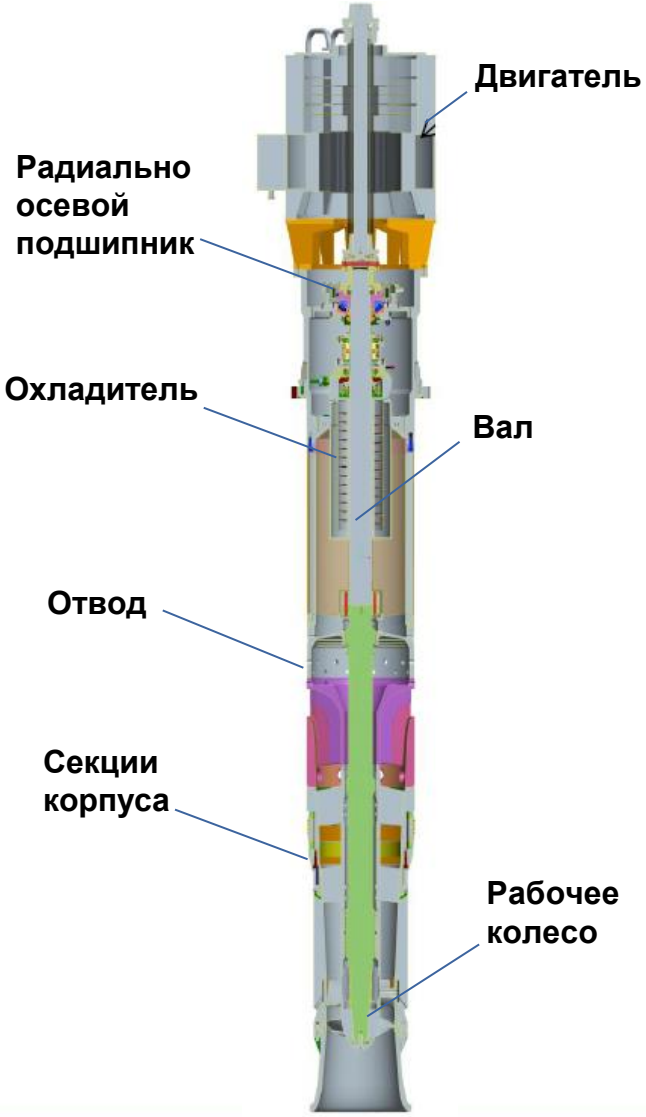
- Трубки из монометалла коррозионностойкого в воде и свинце, без сварных соединений по всей длине
- Витая теплообменная часть
- Внутренние протяжённые дроссели, обеспечивающие гидродинамическую устойчивость и ограничивающие расход в случае разгерметизации трубок

Тепловая мощность модуля, МВт	90
Высота, м	12,1
Диаметр погруженной части, м	2,0
Масса, т	69
Паропроизводительность модуля, кг/с	52,40
Назначенный срок службы, лет	30

Парогенератор

- На 18-трубной модели со свинцовым теплоносителем определены коэффициенты теплопередачи
- Определены границы теплогидравлической устойчивости в пусковых режимах при наличии и без дросселирования (пуск с ~18% от номинального расхода)
- Экспериментально обоснована невозможность перерастания одиночного разрыва трубок во множественный
- Разработана и экспериментально проверена методика высокотемпературной отмывки
- Разработан новый материал для трубок парогенератора, впервые в России получены трубки длиной более 35 м

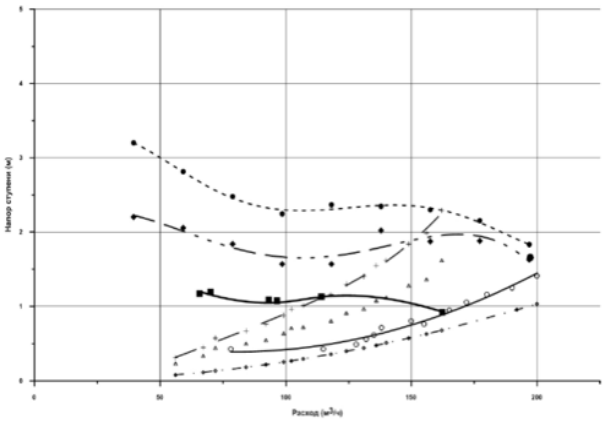
ГЦНА

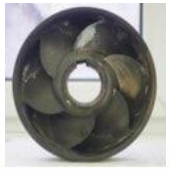


Высота без/с приводом, м	9,4/12,7
Диаметр внутри корпуса БР, м	1,2
Масса выемной части, т	32,3
Номинальная подача (расход при номинальной температуре перекачиваемой среды), м3/ч, (кг/с)	3850 (11300)
Номинальный напор, м	2,8
Мощность ГЦНА, кВт, не более	650
Располагаемый кавитационный запас, м	2
Назначенный срок службы (с заменой узлов и деталей), лет	30

ГЦНА

- Создан среднемасштабный рабочий участок и макет ГЦНА (свинец)
- Получены энергетические характеристики проточной части на свинце на уровне 80% от требуемых (ограничение стенда)
- Подтверждена работоспособность гидростатического подшипника в условиях среднемасштабного стенда (более 300 циклов пуск – останов)
- Оптимизирована энергетическая характеристика проточной части на воде, получены требуемые расход, напор, кавитационный запас
- Изготовлен модельный блок для испытаний натурного нижнего радиального подшипника, ведётся подготовка к испытаниям на свинце





Конструкционные материалы

РОСАТОМ

ЭП302-Ш (внутрикорпусное оборудование)

- мехсвойства получены в рабочем диапазоне с учётом повреждающих факторов для подавляющего большинства полуфабрикатов.
- прибавка на коррозию в свинце определена по результатам экспериментов на базе от 10000 до 50000 ч.
- получены мехсвойства при повреждающей дозе в 2 раза выше проектной.

ЭП302М-Ш (парогенератор, новый материал)

- мехсвойства получены в рабочем диапазоне с учётом подавляющего большинства повреждающих факторов.
- Прибавка на коррозию в свинце определена по результатам экспериментов на базе от 7000 до 15000 ч. Эксперименты продолжаются.

ЭП823-Ш (изделия активной зоны)

- Проведены эксперименты для определения характерных времён работы в кислородных режимах с отклонениями от базового.

Общий вид ОДЭК

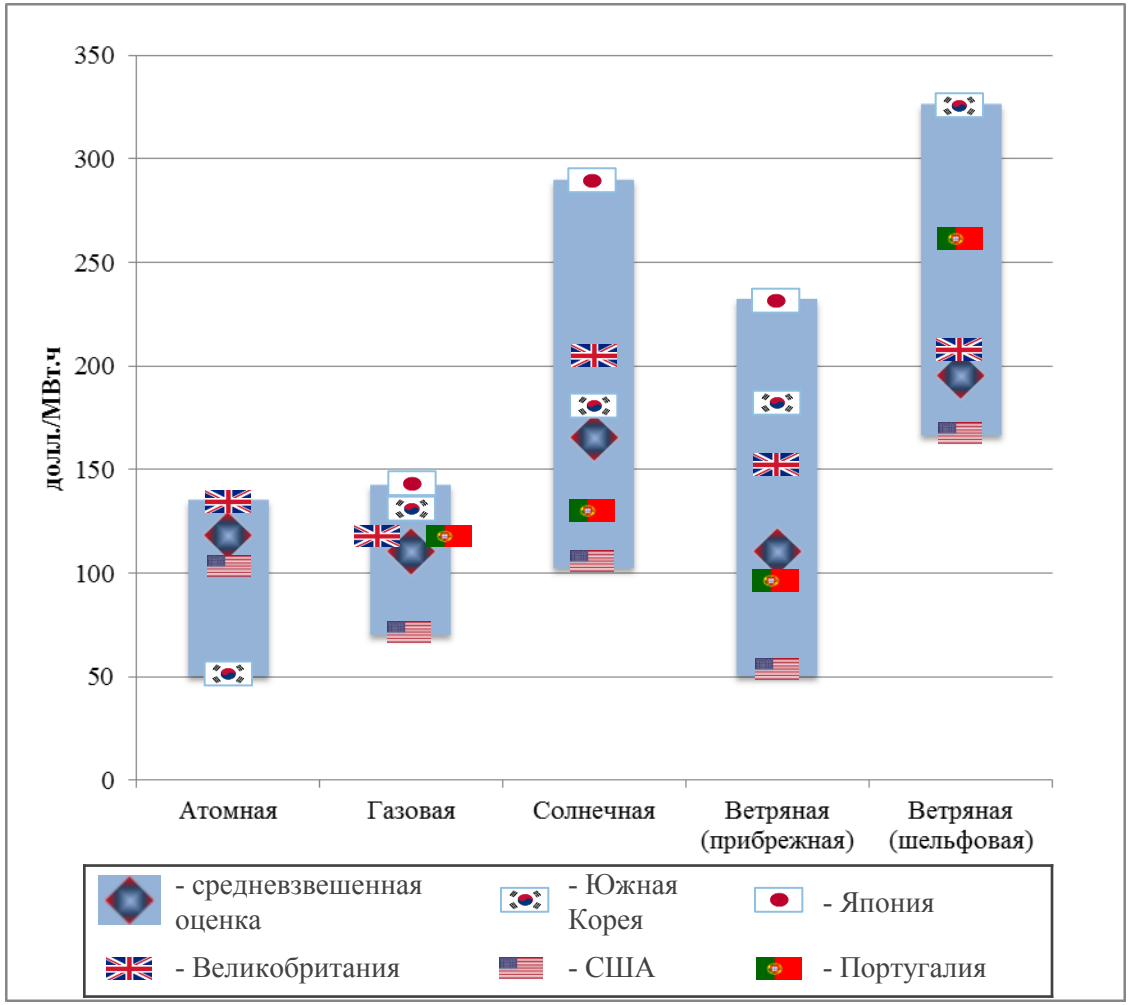
Строительство МФР

СТРОИТЕЛЬСТВО ОДЭК

РОСАТОМ

Конкурентоспособность современных электростанций

LCOE для проектов электростанций (при условии ввода в 2020 г.)



- Конкурентоспособность ВИЭ сильно зависит от региона размещения
- В России в настоящее время дан старт нескольким проектам в сфере ВИЭ
- Электростанции с ПГУ будут в обозримой перспективе оставаться основными конкурентами атомной энергетики, наряду с усиливающими свои позиции ВИЭ

Источник: Projected Costs of Generating Electricity – 2015 Edition. International Energy Agency (IEA), Nuclear Energy Agency (NEA), 2015, ставка дисконтирования 10%

Westinghouse proposes LFR project

- According to Pezze (Vice President, Global Technology Development and Chief Technology Officer today) all types of reactor were considered, whether cooled by gas, various metals, and even molten salts. Safety of each design was the key consideration, but economic viability (without which none could be built) was also a guiding consideration. (She noted that "the team did even look at LWR or Light Water Reactor designs for this study as well.")
  The study, including some 15 or 16 criteria appropriately weighted, resulted in a rather clear winner - the lead cooled fast reactor or LFR

- It also said the reactor's load-following capabilities "would further support the increased use of renewable energy sources"

- Westinghouse president and CEO Danny Roderick said, "Westinghouse's vision is to be the first to innovate the next technology, and we believe an LFR plant will be the next advanced reactor technology to be deployed

- Westinghouse submitted its project proposal for advanced reactor concepts that can be demonstrated in the 2035 timeframe

- Источник http://www.world-nuclear-news.org

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Руководитель проектного направления «Прорыв»
В.А. Першуков

Е.О. Адамов
Научный руководитель проектного направления «Прорыв»

Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики

2016 г.