



РОСАТОМ

МНТК-23
НИКИЭТ, 14-17 ноября 2023

Перспективы развития технологии ВВЭР в двухкомпонентной ЯЭС России



Асмолов В. Г., проф., д.т.н.

Из истории ...

1952 год – постановление СМ СССР “О проектировании и строительстве объекта № 627”

1958 год – вступила в строй АПЛ “Ленинский комсомол” с водо-водяным реактором – **прародителем технологии ВВЭР**

Научный руководитель

А.П. Александров (1903-1994)

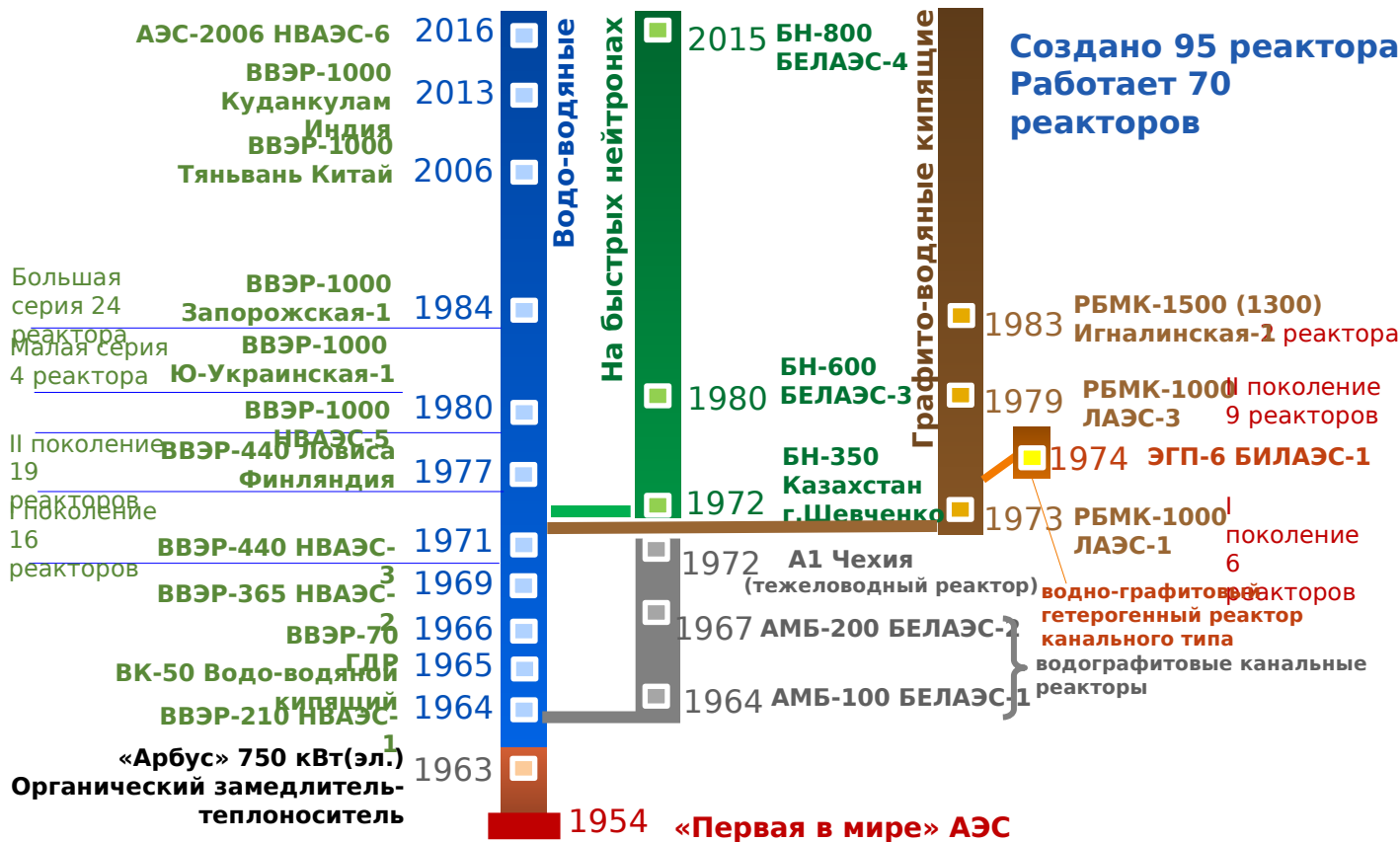


Главный конструктор РУ

Н.А. Доллежалъ (1899-2000)



Энергетические реакторы



ВВЭР в России и за рубежом



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«РОСАТОМОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



Тип реактора	Количество блоков	
	в эксплуатации	строящиеся
ВВЭР-440	22	2
ВВЭР-1000	37	6
ВВЭР-1200	5	15
ВВЭР-1300	0	4
Всего	64	27

Программа повышения уровня производства электроэнергии на АЭС

Повышение эффективности ТОиР

- Сроки ремонтов эн/бл с длительностью выше нормативной
- Сроки проведения эксплуатационного контроля металла ВВЭР-1200

Вклад в $\uparrow N_{эл.} = 200 \text{ МВт}$

Оптимизация ремонтных циклов энергоблоков ВВЭР-1000/1200

- Увеличение периода эксплуатационного контроля металла и техосвидетельствование оборудования ВВЭР-1000/ 1200
- 18-мес. топливный цикл ВВЭР-1200

Вклад в $\uparrow N_{эл.} = 200 \text{ МВт}$

Модернизация с целью повышения располагаемой мощности эн/бл

- Модернизация генерирующего оборудования
 - 107% РУ ВВЭР-1000
- Вклад в $\uparrow N_{эл.} = 300 \text{ МВт}$

Снижение потерь в теплообменном оборудовании эн/бл, модернизация ТГ АЭС

- Вентиляторные градирни с БИГ
- Очистка поверхностей теплообмена оборудования
- Модернизация проточных частей турбоагрегатов для повышения КПД

Вклад в $\uparrow N_{эл.} = 300 \text{ МВт}_5$

ИТОГ: 1000 МВт ~ 1 энергоблок

Производство электроэнергии АЭС Концерна

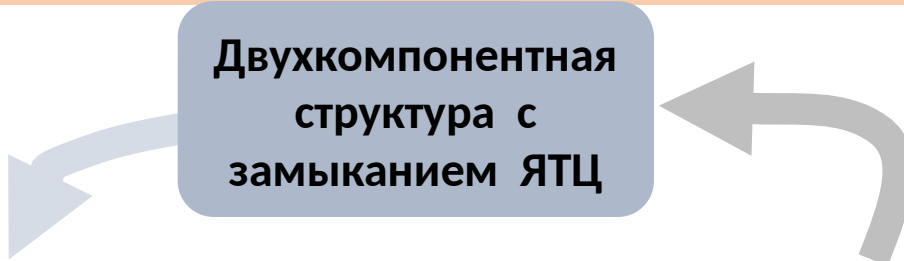
Выработка 2023 года **222,3** млрд кВт·ч



Двухкомпонентная ЯЭ с замкнутым ЯТЦ

КЛЮЧЕВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ ЯЭ

Двухкомпонентная
структура с
замыканием ЯТЦ



Позволит решить системные
проблемы нынешней ЯЭ:

Сократить накопление ОЯТ
и снизить объемы РАО

Повысить эффективность
использования урана

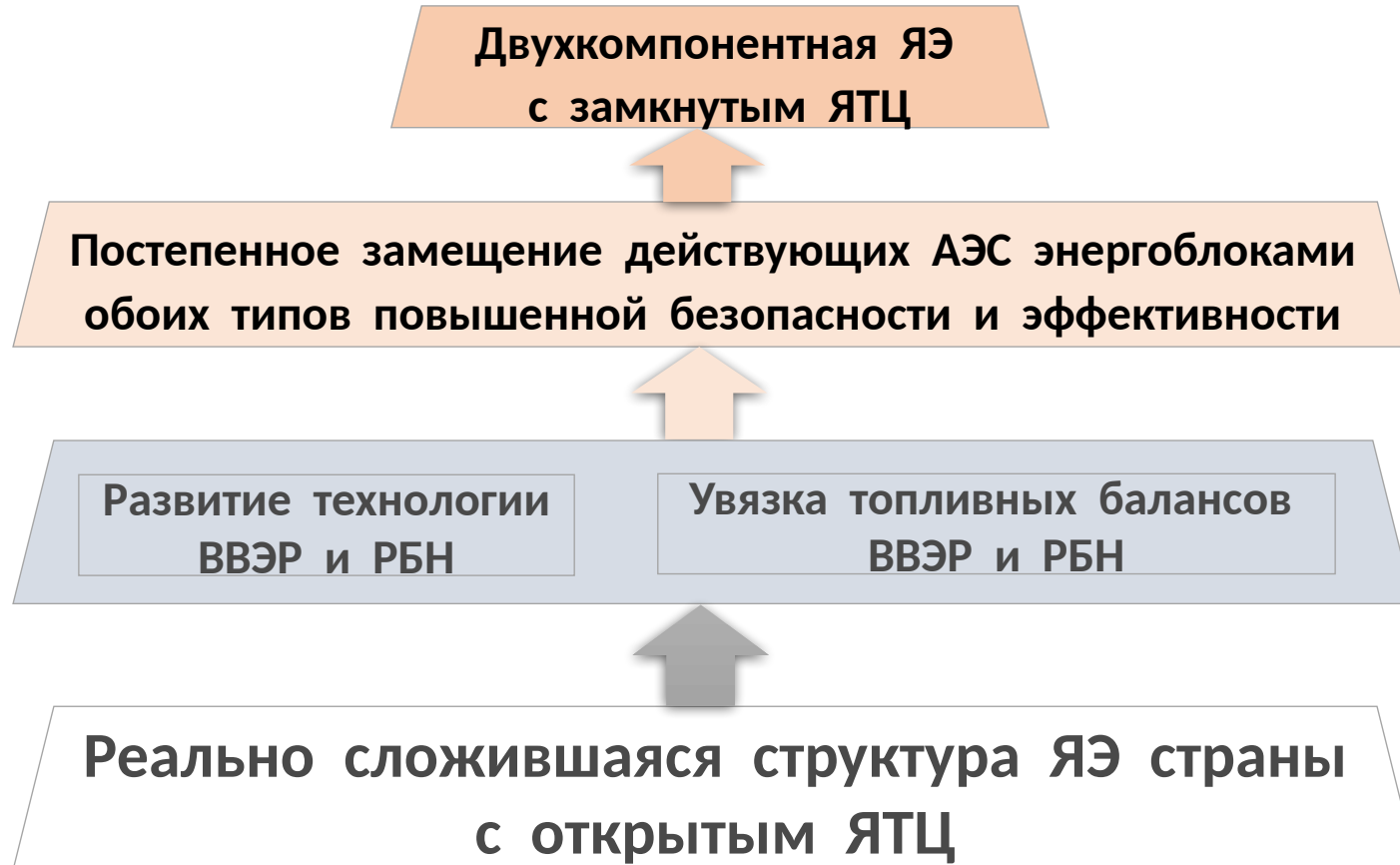
Повысить экологические показатели ЯЭ
и ее конкурентоспособность

Синергетический
принцип развития обоих
компонентов (базовый):

Технология ВВЭР

Технологии РБН

Сценарий формирования двухкомпонентной ядерной энергетики России



Общие требования к ЯЭС 21 века

1. Повышенная надежность и безопасность

- исключение аварий, требующих эвакуации населения
- экологическая безопасность

3. Экономическая конкурентоспособность

2. Требования целей устойчивого развития

- отсутствие ограничений по ресурсной базе
- минимизация РАО

4. Соблюдение режима нераспространения ЯМ

Для создания ЯЭС 21 века в РФ необходимо сформировать:

- Парк реакторов на быстрых нейтронах (РБН) - воспроизводство плутония и дожигание минорных актинидов;
- Единую инфраструктуру ЗЯТЦ для АЭС с реакторами на быстрых и тепловых нейтронах.

АЭС с реакторами ВВЭР в двухкомпонентной ЯЭС РФ в период до 2100 года обеспечат:

- Утилизацию регенерированного урана от переработки ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах (АЭС-2006, ВВЭР-ТОИ);
- Устойчивость генерации, снижение потребления урана и минимизацию эксплуатационных РАО (ВВЭР со спектральным регулированием);
- Переход к сверхкритическим параметрам (ВВЭР-СКД) с повышенными КПД и КВ.

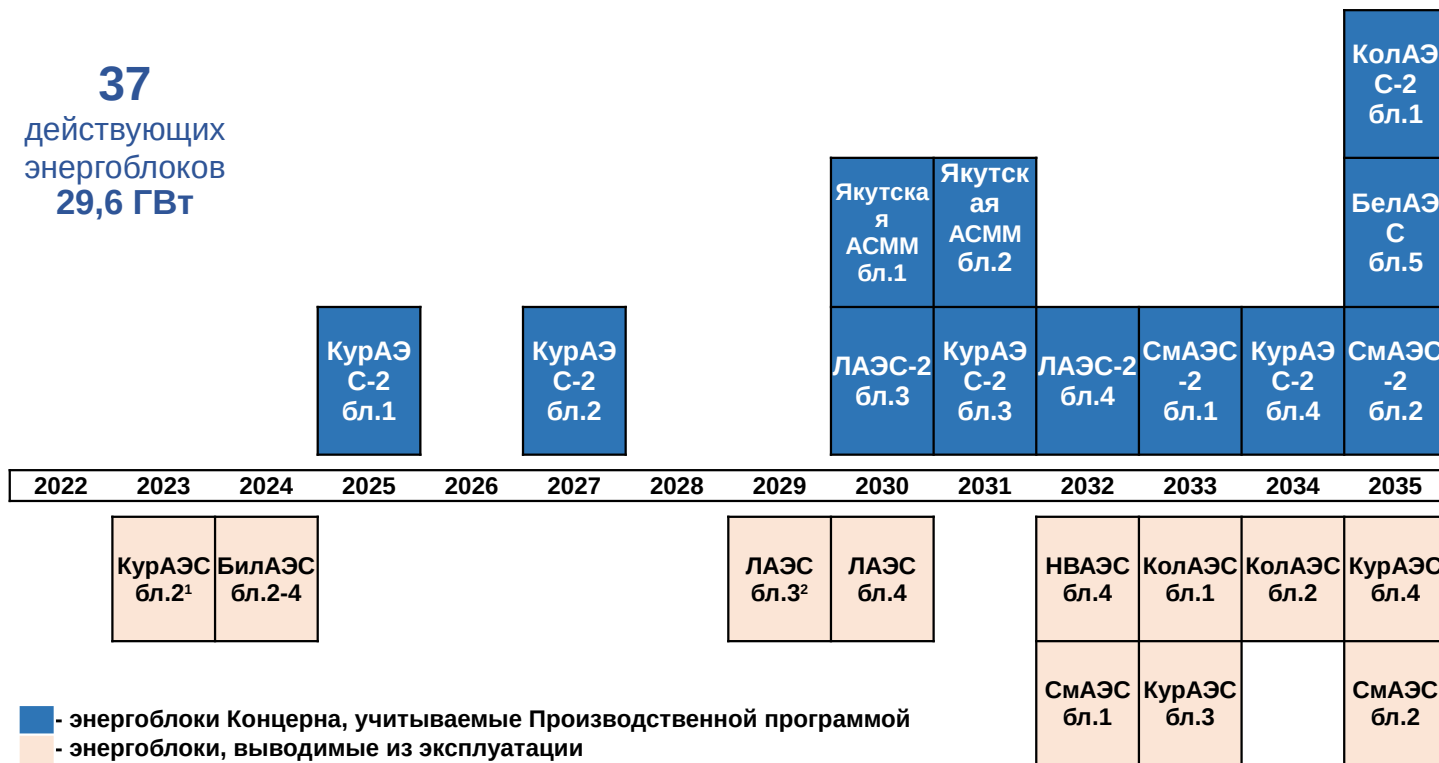
Дорожная карта ввода - вывода энергоблоков Концерна по Генсхеме-2035

37

действующих
энергоблоков
29,6 ГВт

36

действующих
энергоблоков
32,8 ГВт



Ввод 12
блоков
(+11,5 ГВт)

Вывод 13
блоков
(-8,3 ГВт)

■ - энергоблоки Концерна, учитываемые Производственной программой

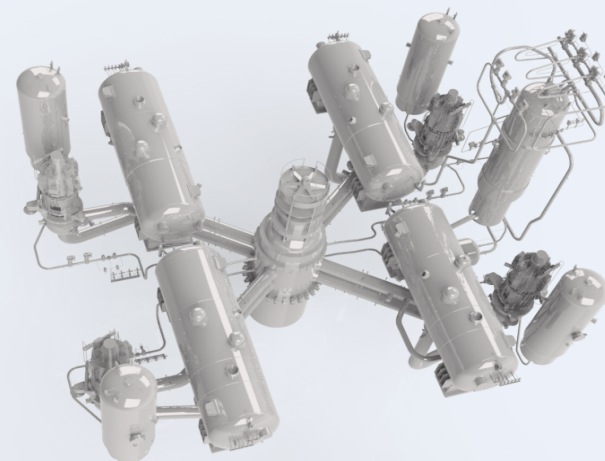
■ - энергоблоки, выводимые из эксплуатации

¹ - дата вывода энергоблока №2 КурАЭС - 31.01.2024

² - дата вывода энергоблока №3 ЛАЭС - 31.01.2030

Стратегические цели развития технологии ВВЭР

- Встраивание в двухкомпонентную ЯЭС;
- Обеспечение высокой безопасности;
- Повышение КПД и КВ, возможность работы на 100% загрузке МОКС-топлива;
- Конкурентоспособность экспортных продуктов в долгосрочном горизонте

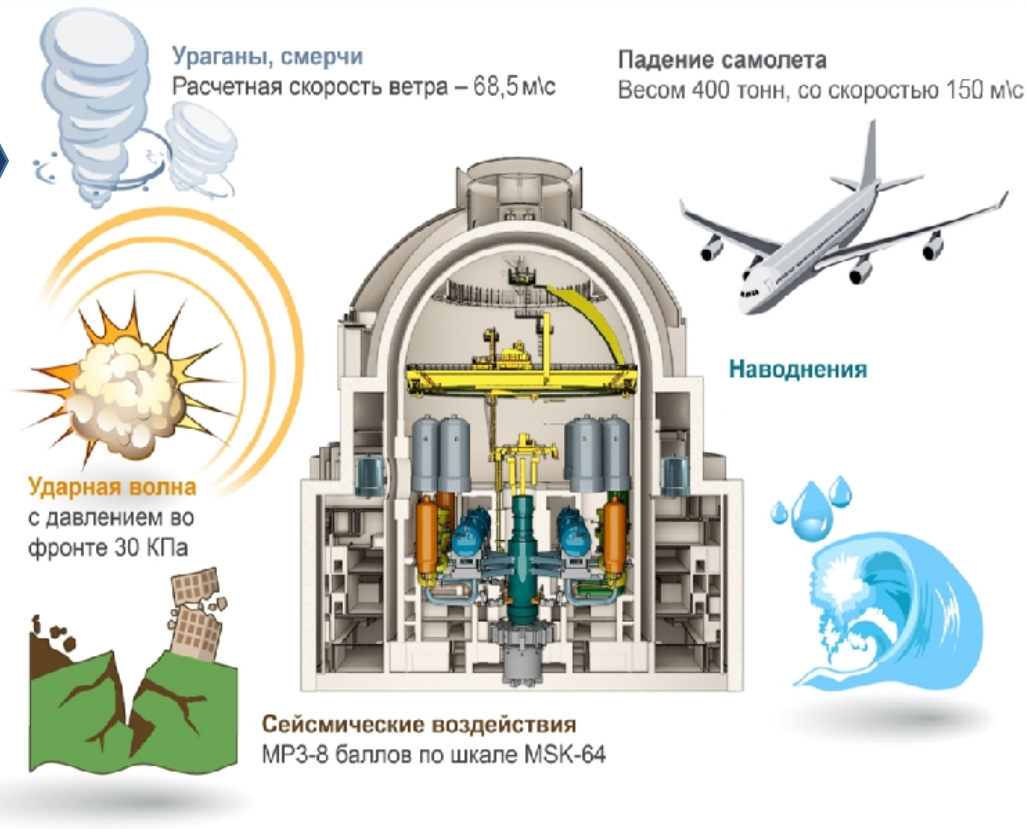
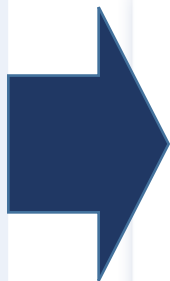


Целевые показатели	ВВЭР-1200	ВВЭР-ТОИ	ВВЭР-С-СМ	ВВЭР-СКД
мощность эл./тепл.	1170 / 3200	1255 / 3300	600 / 1600	550 / 1250
удельный CAPEX, %	118%	100%	120%*	-
время сооружения, лет	6	6	5	<5
внедрение, год	2017	2025	2035	>2045

*** Более высокий удельный CAPEX обусловлен более низкой мощностью, при равной мощности удельный CAPEX был бы в диапазоне 80-85%.**

Направления совершенствования Проекта АЭС ВВЭР-ТОИ

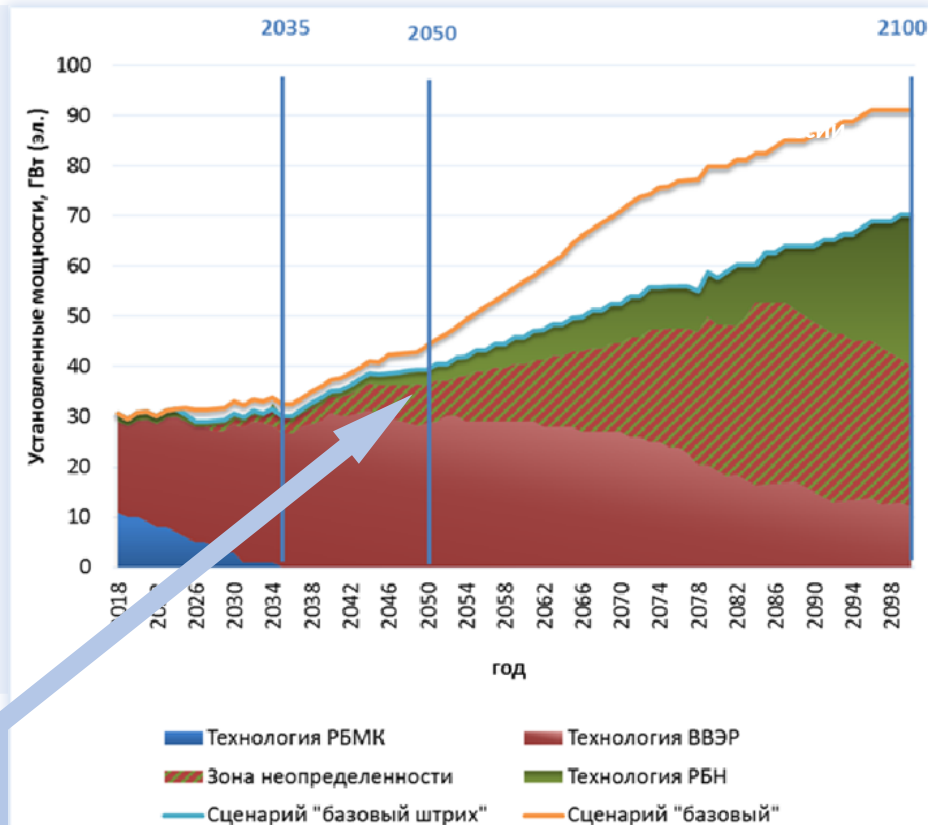
- Повышение параметров безопасности;
- Повышение КПД и маневренности;
- Снижение капитальных и эксплуатационных затрат;
- Сокращение сроков сооружения



Направления развития технологии ВВЭР: проекты ВВЭР-С и ВВЭР-СКД

- Повышение коэффициента воспроизводства топлива;
- Снижение расхода природного урана;
- Отказ от борного регулирования (как минимум при работе на мощности);
- Повышение КПД

Развитие технологии ВВЭР хеджирует
возможные отставания темпов/масштаба
ввода АЭС с РБН



Проектные решения для ВВЭР-С

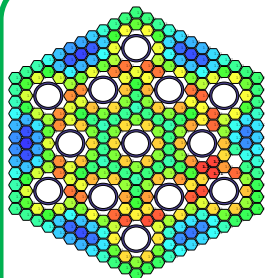
ВВЭР-С БМ

Корпус ВВЭР-1500 (активная зона - 241 ТВС)

Технические решения РУ ВВЭР-ТОИ



В период 2019-2021 гг разработана концепция АЭС с РУ ВВЭР-С-1200 (проектные материалы могут быть уточнены по результатам реализации проекта ВВЭР-С-600)



- ❑ Конструкция ТВС с более тесной решеткой твэл с 13 каналами
- ❑ Диапазон изменения водо-уранового отношения в ТВС от 1,5 до 2,0
- ❑ Штатный твэл $d=9,1$ мм

План реализации проекта ВВЭР-С средней мощности:

2021 – 2024 гг. - Реализация НИОКР в обоснование разработки проекта для размещения на площадке Кольской АЭС-2

2024 – 2028 гг. - Разработка технического проекта двухблочной АЭС с энергоблоками ВВЭР-С на площадке Кольской АЭС-2

2028 – 2034 гг. - Сооружение первого энергоблока ВВЭР-С на площадке Кольской АЭС-2

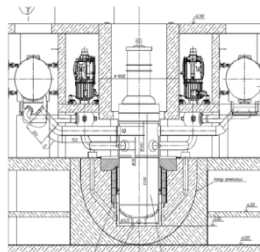
ВВЭР-С СМ

Корпус ВВЭР-1000 (активная зона – 163 ТВС)

Технические решения РУ ВВЭР-600



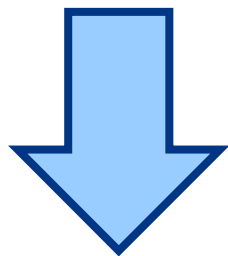
Решение приоритетной задачи по разработке конкурентоспособного предложения АЭС с РУ средней мощности для российского и международного рынка



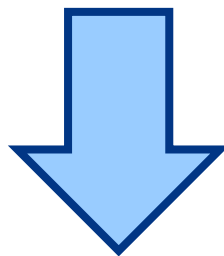
- ❑ Акцент на пассивные СБ
- ❑ Удержание расплава в корпусе
- ❑ Выделение 2-х независимых механических групп ОР СУЗ (при отказе от системы борного регулирования)
- ❑ Использование жидкого борного поглотителя в запроектных авариях

Основной эффект спектрального регулирования

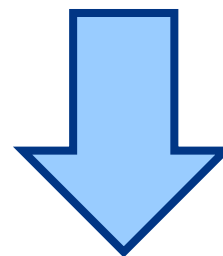
Увеличение захвата ^{238}U в начале кампании $\geq 10\%$
(в сравнении с захватом в штатной активной зоне)



Отказ от компенсации
запаса реактивности
за счет борной
кислоты



Отказ
от циркониевых
сплавов в
активной зоне



Уменьшение начальной
загрузки ^{235}U – снижение
запаса реактивности

Принцип и эффекты спектрального регулирования (использование вытеснителей)

- 1) Снижение сечения деления нечетных делящихся изотопов в начале кампании;
- 2) Увеличение захвата ^{238}U в начале кампании:



Топливо реакторов

ВВЭР: ^{235}U ;

ВВЭР-С: $^{235}\text{U} + ^{239}\text{Pu}$ (из $^{238}\text{U}(n,\gamma)$).

Коэффициент размножения

K_{∞}

Эффекты работы вытеснителей (условный сценарий)

Извлечение вытеснителей

— ВВЭР
— ВВЭР-С

Выигрыш в длительность и кампании!!!

Уран-водное соотношение

Кампания реактора

$\Delta\tau$

ΔK_{∞}

Экономия топлива

Принцип работы вытеснителей



Вытеснители

ТВС

Начало кампании

Конец кампании

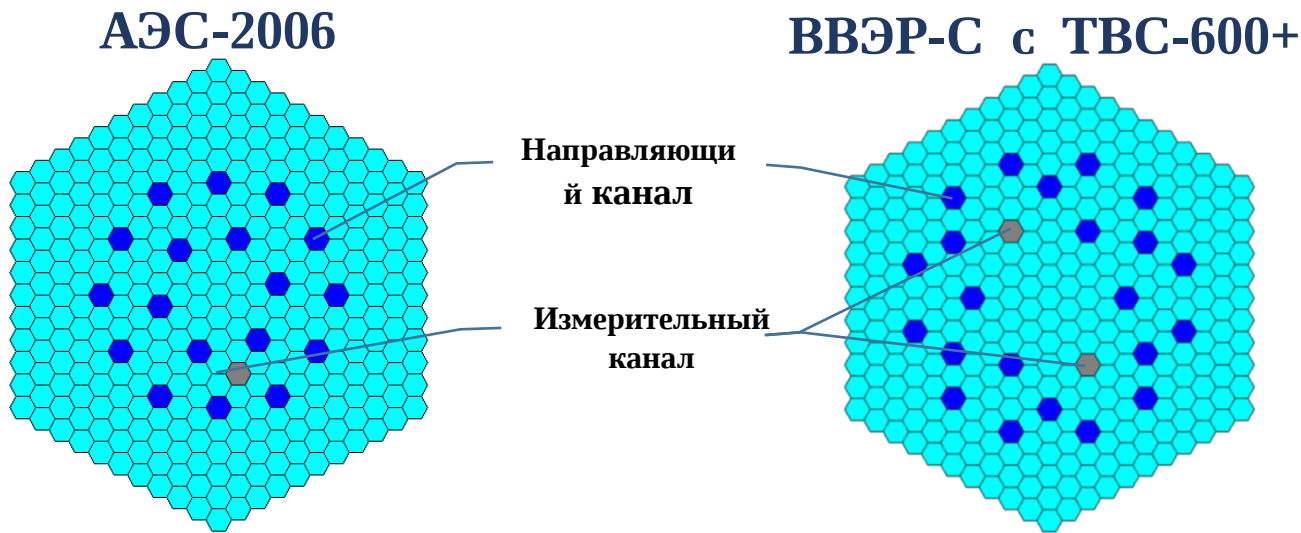
$\frac{\gamma_{\text{H}_2\text{O}}}{\gamma_{\text{U}}}$

1,5



2,0 (как у ВВЭР)

Спектральное регулирование с использованием увеличения количества поглощающих стержней ТВС

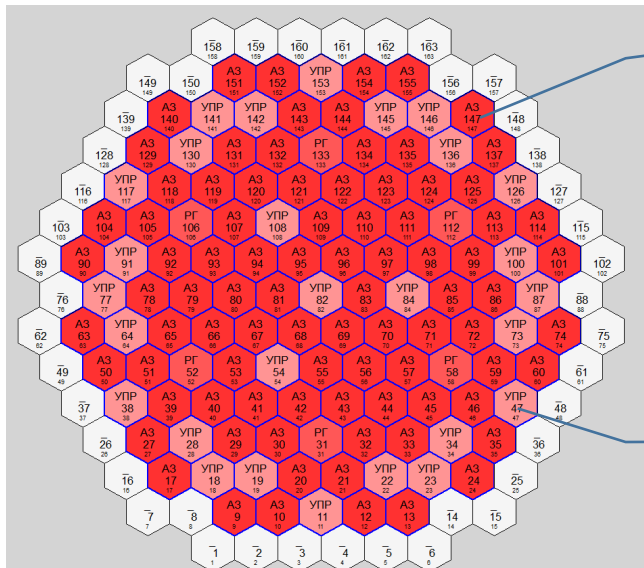


По сравнению с АЭС-2006 в ВВЭР-С с ТВС-600+:

- эффективность каждого поглощающего стержня системы управления защитой (СУЗ) на 25 % выше, количество поглощающих стержней увеличено с 17 до 22;
- при равной мощности ТВС максимальная мощность твэла в ТВС-600+ на 3% ниже;
- добавлен второй (симметричный) измерительный канал.

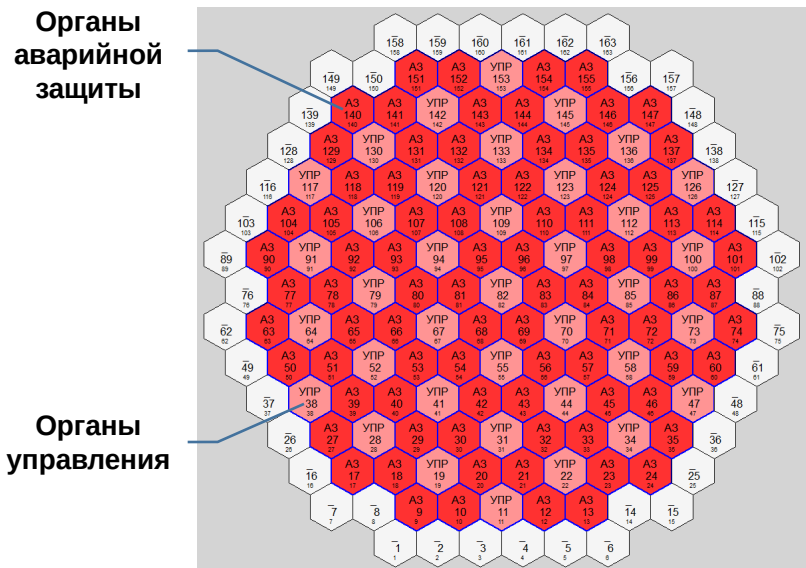
Расположение органов регулирования СУЗ

АЭС-2006



Количество органов системы управления и аварийной защиты реактора - 121, из них 34 - орган управления

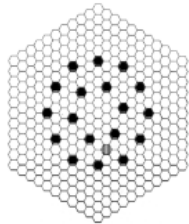
ВВЭР-С с ТВС-600+



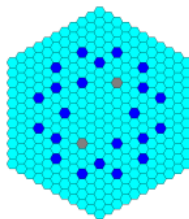
Количество органов системы управления и аварийной защиты реактора - 121, из них 37 - органы управления (+6 поглотителей и +1 измерительный канал)

Повышение топливной эффективности при спектральном регулировании

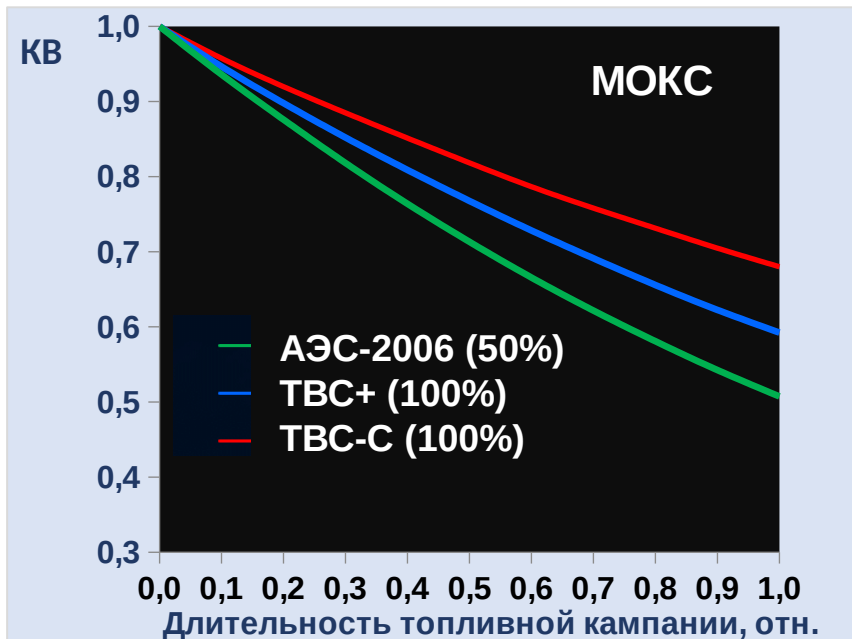
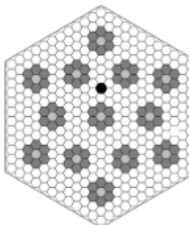
АЭС-2006



TVC+



TVC-C



КВ – коэффициент воспроизводства

КВ =

TVC+ – активная зона с увеличенным количеством поглощающих элементов

TVC-C – активная зона с подвижными вытеснителями

Преимущества спектрального регулирования:

- более гибкий топливный цикл (12, 24 и 36 месяцев);
- возможность 100% загрузки МОКС-топлива;
- повышение коэффициента воспроизводства топлива.

Сравнение целевых показателей ВВЭР-ТОИ и ВВЭР-С

Целевые показатели	ВВЭР-ТОИ	ВВЭР-С *
КПД энергоблока (брутто), не менее, %	37,5	38
Длительность топливного цикла (работы топливной загрузки), мес.	12, 18	12, 24, 36
Тип топлива и активная зона	100%-ная загрузка уран-оксидным топливом	-100%-ная загрузка уран-оксидным топливом; -загрузка с использованием уран-оксидного топлива и МОКС-топлива; -100%-ная загрузка МОКС-топливом
Возможность работы энергоблока в режиме суточного регулирования в диапазоне изменения мощности, %	100-50-100	100-40-100
Назначенный срок службы корпуса, крышки и ВКУ, лет реактора	60	80
Срок сооружения энергоблока АЭС (от первого бетона до физического пуска), мес. - головного энергоблока; - серийного блока	65** 60**	56 48
Исключение борного регулирования во всех режимах нормальной эксплуатации при работе на мощности	нет	да
Сокращение выбросов трития по сравнению с ВВЭР-ТОИ	-	На порядок

* Определены распоряжением № 1-1/875-р от 29.12.2022

** Согласно типовому графику сооружения АЭС

Временные рамки развития эволюционного варианта ВВЭР-С средней мощности на площадке Кольской АЭС-2



2022–
2024 гг.

Разработка ТЗ, эскизного и концептуального проектов, выполнение предпроектных и базовых НИОКР (материалы, коды, базы данных, бенчмарки, стендовая база)

2025–
2030 гг.

Проектирование АЭС, включая разработку технического проекта РУ. Завершение НИОКР в обоснование проектных решений

2030–
2035 гг.

Сооружение головной АЭС, ПНР, физический пуск, включение в сеть

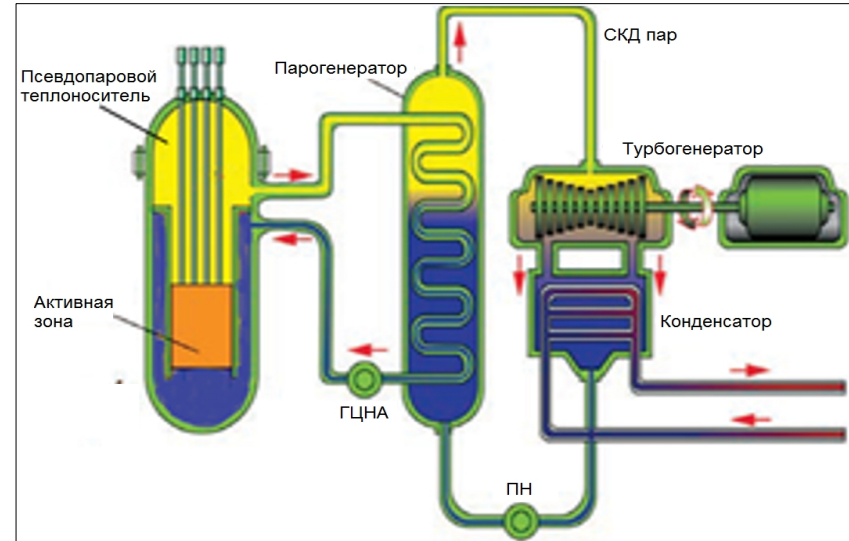
Основные целевые установки инновационного ВВЭР-СКД

Создание коммерческого энергоблока с высоким КПД для работы в ЗЯТЦ с самообеспечением топливом:

- Эффективное использование делящихся материалов
КВ ~ 1.0–1,02;
- Повышение термодинамической эффективности
КПД ~ (40–45)%;
- Приемлемые требования безопасности –
уровень требований Gen IV (The
Generation IV International Forum (GIF)).

БАЗИСНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ:

- Опыт технологии ВВЭР;
- Опыт тепловой энергетики в работе со сверхкритическими параметрами теплоносителя;
- Повышение КПД при увеличении перепада температур теплоносителя в активной зоне (вход/выход), снижение замедления нейтронов в сверхкритическом диапазоне;
- Инновационное ядерное топливо и конструкционные материалы.



Основные характеристики	Значение
Тепловая мощность, МВт(т)	1250
Электрическая мощность на клеммах генератора, МВт(эл.)	580
КПД ЯЭУ, %	46,4
Схема реакторной установки	двухпетлевая
Количество ГЦНА на петлю, шт.	2
Схема паротурбинной установки	1 ЦВСД + 2 ЦНД

Основные направления дальнейших НИОКР с учетом сотрудничества с Gen IV

- Создание новых **конструкционных материалов** для корпуса реактора, ВКУ, активной зоны;
- Разработка **водно-химических режимов**;
- Решение проблем **массопереноса, активации и отложения продуктов коррозии и эрозии**;
- Создание и верификация **моделей по расчету гидродинамики и теплообмена в ТВС и теплообменниках в широком спектре режимов теплоносителя, разработка систем безопасности**;
- Создание и верификация **моделей по расчету нейтронной физики активных зон со сложным пространственным распределением спектра нейтронов в реакторе**;
- Обоснование **устойчивости работы РУ и ядерной энергетической установки в целом в различных режимах эксплуатации (пуск, набор мощности, частичные режимы, номинал, переходные процессы ...)**

***Спасибо за
внимание !***

