



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Разработка активной зоны РУ ВВЭР-С средней мощности для энергоблоков 1 и 2 Кольской АЭС-2

14.09.2023

Круглый стол заседания Ядерного общества

Осипов Алексей Михайлович

Спектральное регулирование...



спектральное регулирование



Найти

Поиск [Картинки](#) [Видео](#) [Карты](#) [Товары](#) [Переводчик](#) [Все](#)

Первую в мире АЭС с реактором на спектральном регулировании в Заполярье запустят в 2035 году

<https://expert.ru/>

29 июня 2023, 15:28

Преимущества нового реактора

Реактор со спектральным регулированием позволит повысить коэффициент воспроизводства. Он составит примерно 0,7-0,8 — это в 2 раза больше, чем у обычных ВВЭР.

Новая разработка позволит снизить годовое потребление урана до 130-135 тонн на гигаватт мощности, что примерно на 30-35% меньше удельного потребления действующих сегодня реакторов.

Что немаловажно, реактор со спектральным регулированием сможет работать на разных видах топлива: на диоксидном урановом, МОХ- и РЕМИКС-топливе. Причем возможна загрузка 100% МОХ-топлива. К примеру, сейчас в легководные реакторы можно загрузить активную зону, содержащую не более 50% МОКС-топлива.

<https://dzen.ru/>

10 ядерных технологий, которые изменят мир

1. Развитие технологии водо-водяных реакторов

... Уже к концу 2020-х годов «Росатом» планирует начать строительство первого водо-водяного реактора со спектральным регулированием. Подобные реакторы внесут вклад в решение одной из главных проблем ядерной энергетики: сократят расход природного урана, запасы которого на планете велики, но не бесконечны. ...

<https://www.techinsider.ru/> 06.11.2022

Как эволюционируют реакторы ВВЭР и почему ВВЭР-С – это круто?

31 декабря 2019 · 1,5К прочитали

<https://dzen.ru/>

ТЕМА НОМЕРА / #3_2021

ВВЭР: горизонты близкие и далекие

... инновационная линия развития «Супер-ВВЭР» — это ВВЭР-С,

а революционная — ВВЭР-СКД...

<https://atomicexpert.com>

... «Реактор со спектральным регулированием потребляет на 30% меньше урана, чем ВВЭР»... <https://strana-rosatom.ru>

ОТ ЯДЕРНОГО ЩИТА К ЭНЕРГЕТИКЕ БУДУЩЕГО <https://www.energovector.com>

...при равной мощности реактор ВВЭР-С, по расчетам, будет потреблять на треть меньше урана, чем современные передовые реакторы ВВЭР ... спектральное управление позволяет эксплуатировать реактор, полностью загруженный уран-плутониевым топливом ... возможно оптимизировать все конструкции реакторной установки, сделав дешевле энергоблок на ее основе.



Nucl0id 30 июн 2021 в 13:02

Новые ядерные реакторы на Кольской АЭС-2

🕒 16 мин

👁️ 22К

<https://habr.com/>



Современные требования к АЭС



Общие требования к ЯЭС IV поколения (Gen IV)

1. Повышенная надежность и безопасность

- исключение аварий, требующих эвакуации населения
- экологическая безопасность для окружающей среды и здоровья людей

3. Экономическая конкурентоспособность

2. Требования целей устойчивого развития

- отсутствие ограничений по ресурсной базе
- минимизация РАО (оптимально – с утилизацией высокоактивных долгоживущих РАО)

4. Соблюдение режима нераспространения ЯМ

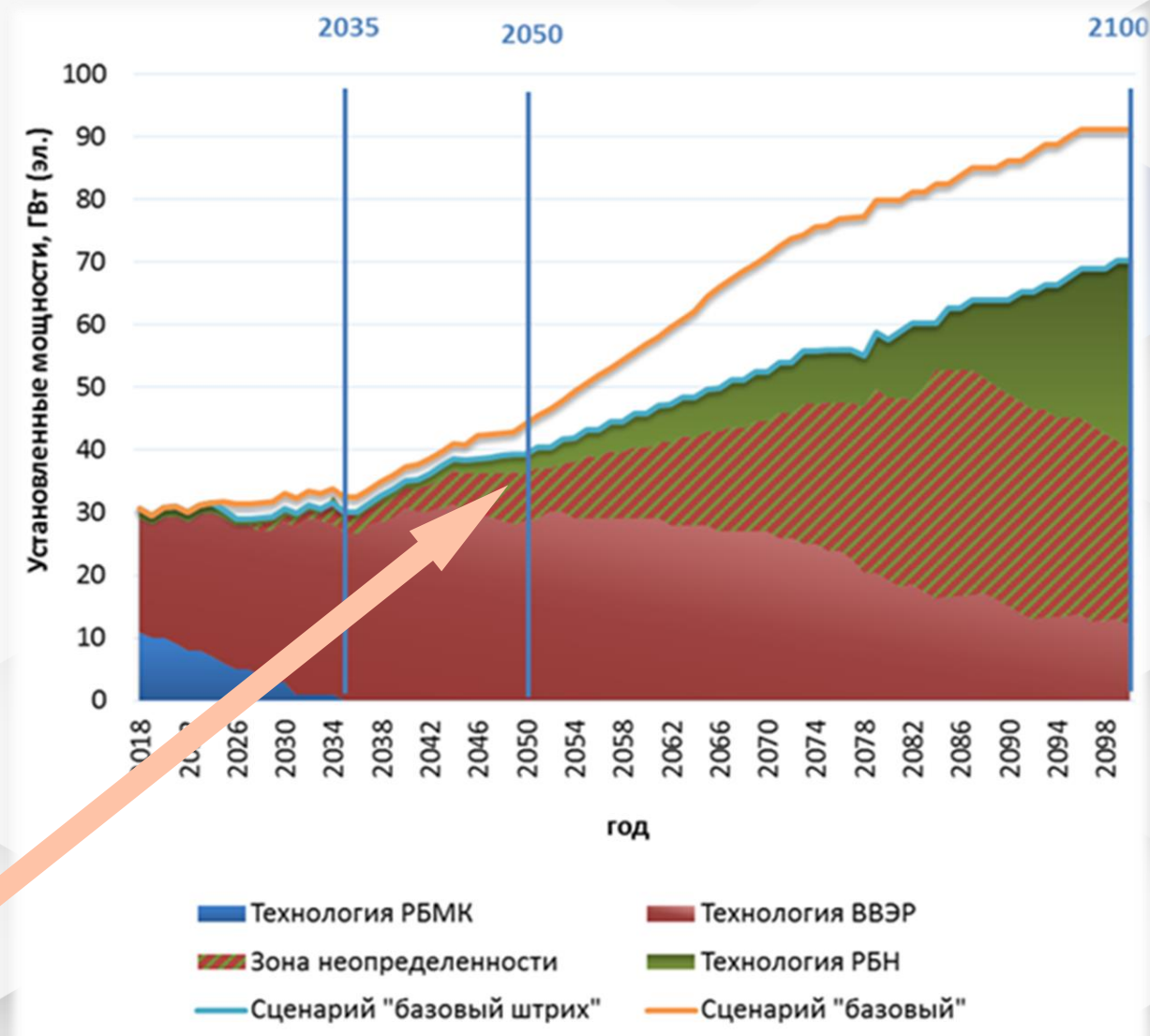
Для создания ЯЭС IV поколения в РФ необходимо:

- формирование парка реакторов на быстрых нейтронах (РБН), обеспечивающих воспроизводство плутония и дожигание минорных актинидов;
- развитие технологии ВВЭР для перехода на более высокую энергию нейтронов с увеличением воспроизводства плутония и снижения потребления урана, минимизацией эксплуатационных РАО;
- формирование единой инфраструктуры ЗЯТЦ для АЭС с реакторами на быстрых и тепловых нейтронах с фракционированием РАО при переработке ОЯТ.

Направления развития технологии ВВЭР: проекты ВВЭР-С и ВВЭР-СКД (Супер-ВВЭР)

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

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



- Снижение удельного расхода природного урана до 130 т на 1ГВт в год электроэнергии.
- Обеспечение возможности работы реактора со 100% загрузкой МОКС-топливом.
- Оптимизация тепловой схемы энергоблока, включая технические решения по конструкции турбогенератора и оборудованию машинного зала.
- Минимизация использования борной кислоты в проекте (исключение борной кислоты на мощности, не использование борной кислоты при маневрировании и пр.).



Разработка технологии спектрального регулирование ВВЭР

Этапы работ по проекту ВВЭР-С

2009-2011

- НИОКР по разработке предложений по проекту АЭС с СУПЕР-ВВЭР (эволюционное направление ВВЭР-С)

2012-2013

- Разработка технических требований к эволюционному Супер-ВВЭР (ВВЭР-С)

2019-2020

- Разработка технологии спектрального регулирования ВВЭР (ВВЭР-С-1200)

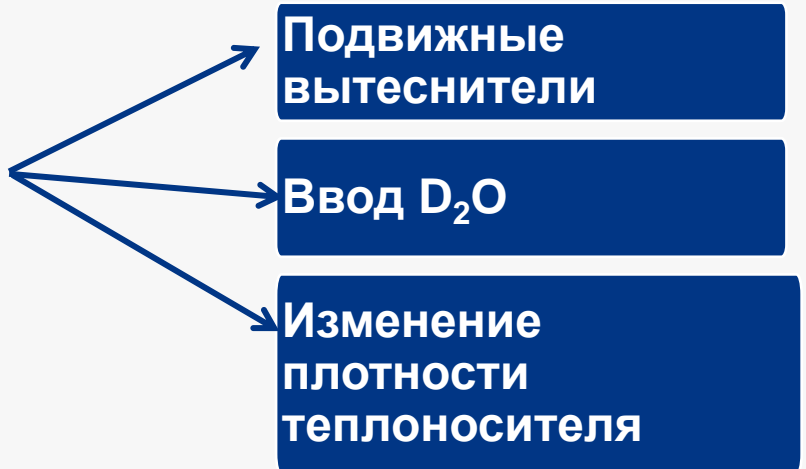
2021-...

- О реализации в 2022 - 2024 гг. НИОКР по разработке технологии спектрального регулирования для энергоблока средней мощности с РУ ВВЭР



Развилки проекта ВВЭР-С

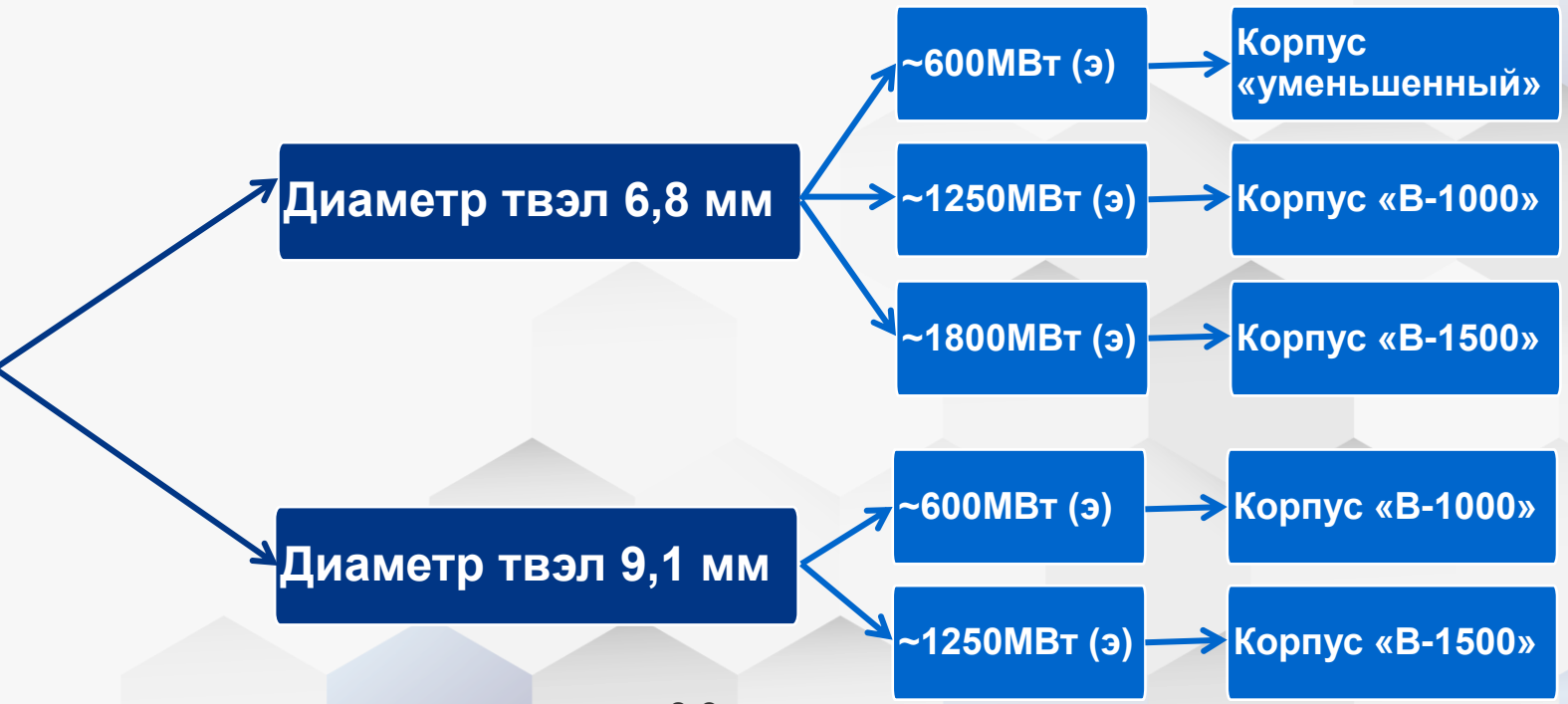
1. Спектральное регулирование



Выбор специалистов НИЦ КИ и ОКБ ГП (2016 г.):

- **Подвижные вытеснители** (как наиболее технологичное решение)
- **Диаметр твэл 9.1 мм*** (как референтное значение)

2. Мощность



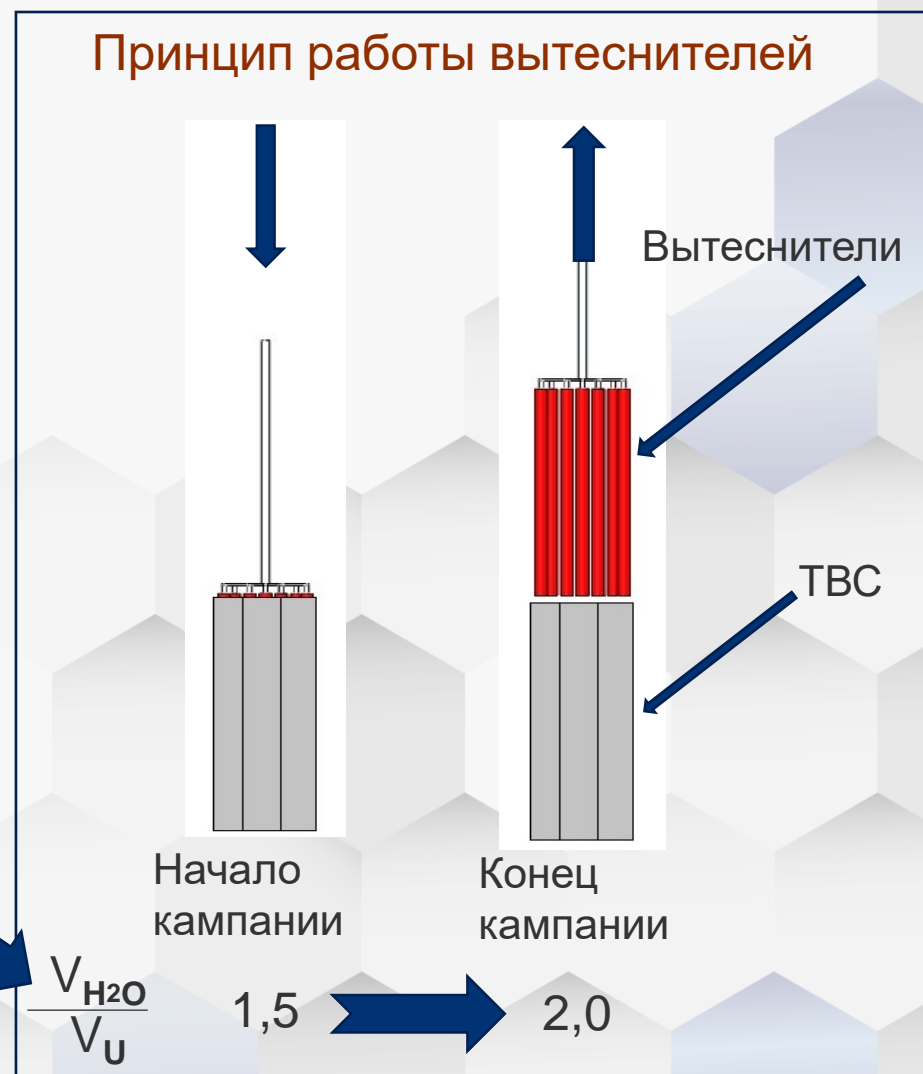
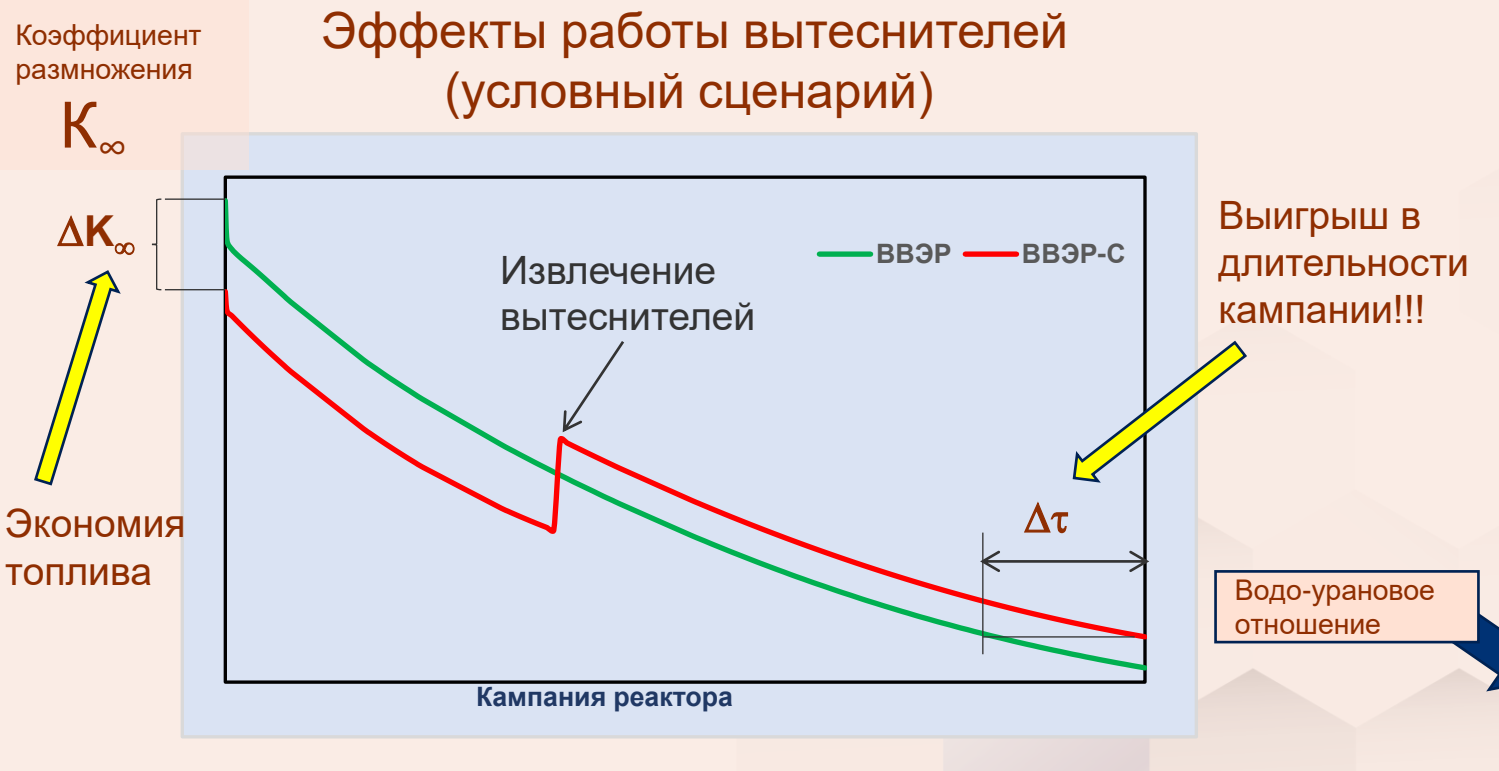
* - возможно рассмотрение варианта с диаметром твэл 8,9 мм

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:

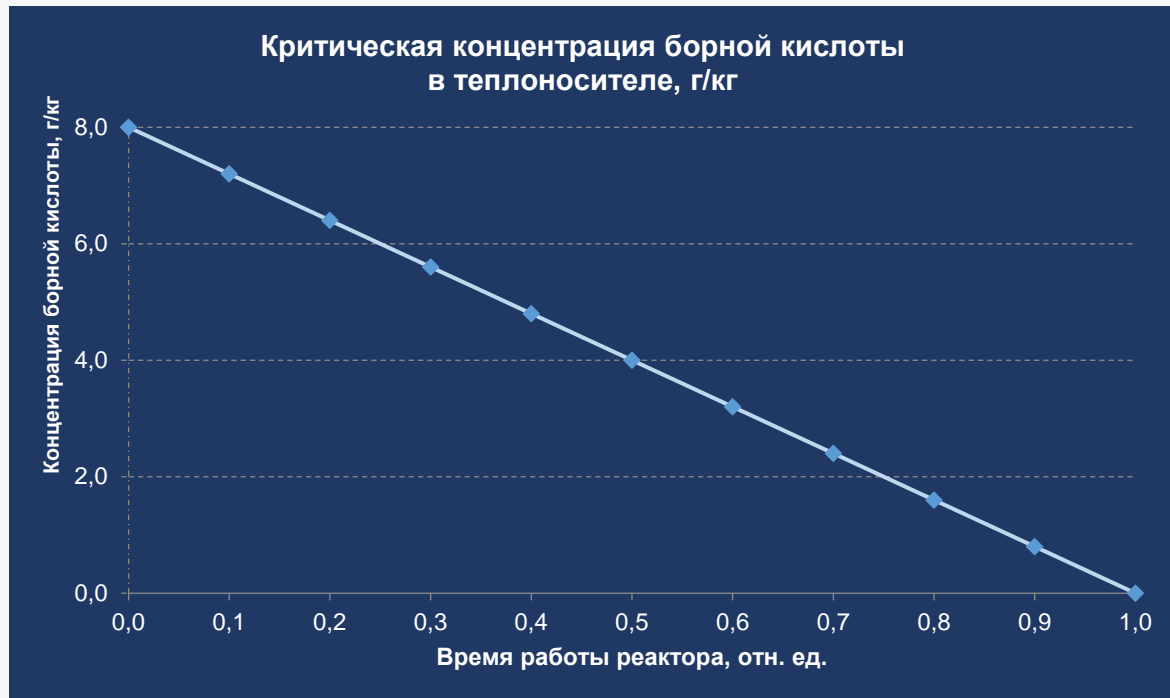


Топливо реакторов ВВЭР: ^{235}U ;
 ВВЭР-С: $^{235}\text{U} + ^{239}\text{Pu}$ (из $^{238}\text{U}(n,\gamma)$).



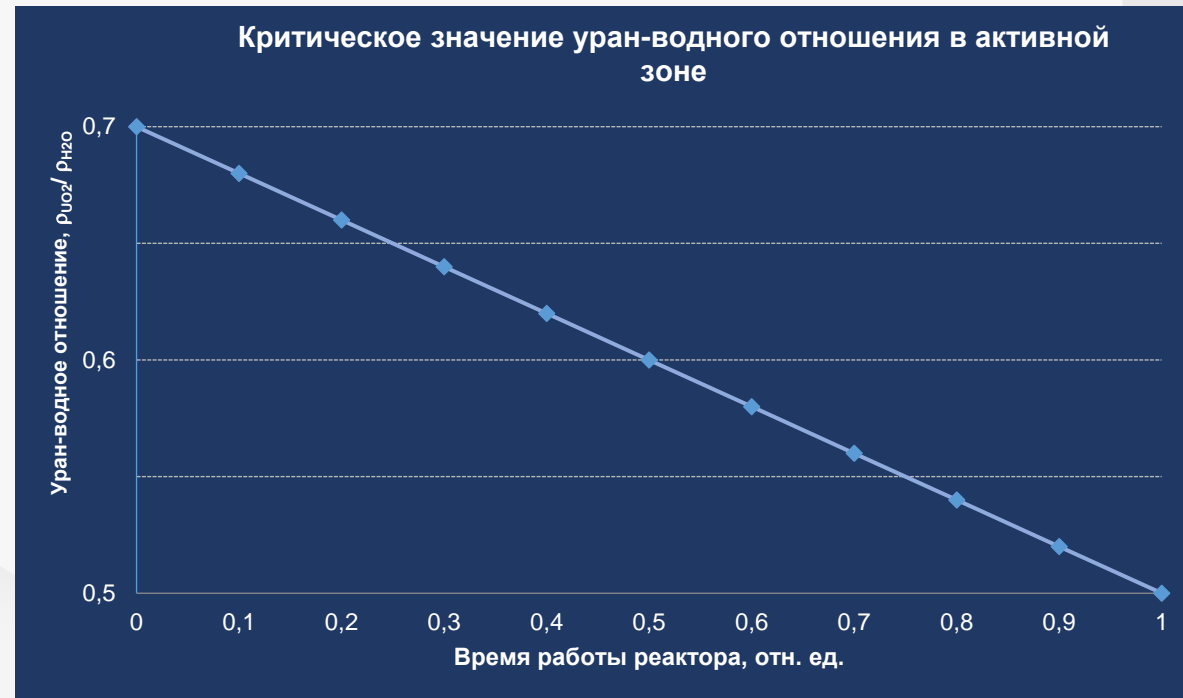
Управление критичностью реактора

ВВЭР-1200



ВВЭР-1200: критичность реактора поддерживается уменьшением концентрации бора в теплоносителе

ВВЭР-С



ВВЭР-С: критичность реактора поддерживается уменьшением уран-водного отношения (вытеснители)

Критерии выбора конструкции активной зоны



При выборе конструкции активной зоны необходимо оценить следующие основные показатели:

- эффективность применения **уран-плутониевого топлива**;
- использование топливных загрузок с различной длительностью кампании (**12–24–36 месяцев**);
- возможность работы на номинальной мощности при **нулевой концентрации борной кислоты**;
- выполнение требований **по маневренности** энергоблока;
- **референтность** используемых конструктивных решений.

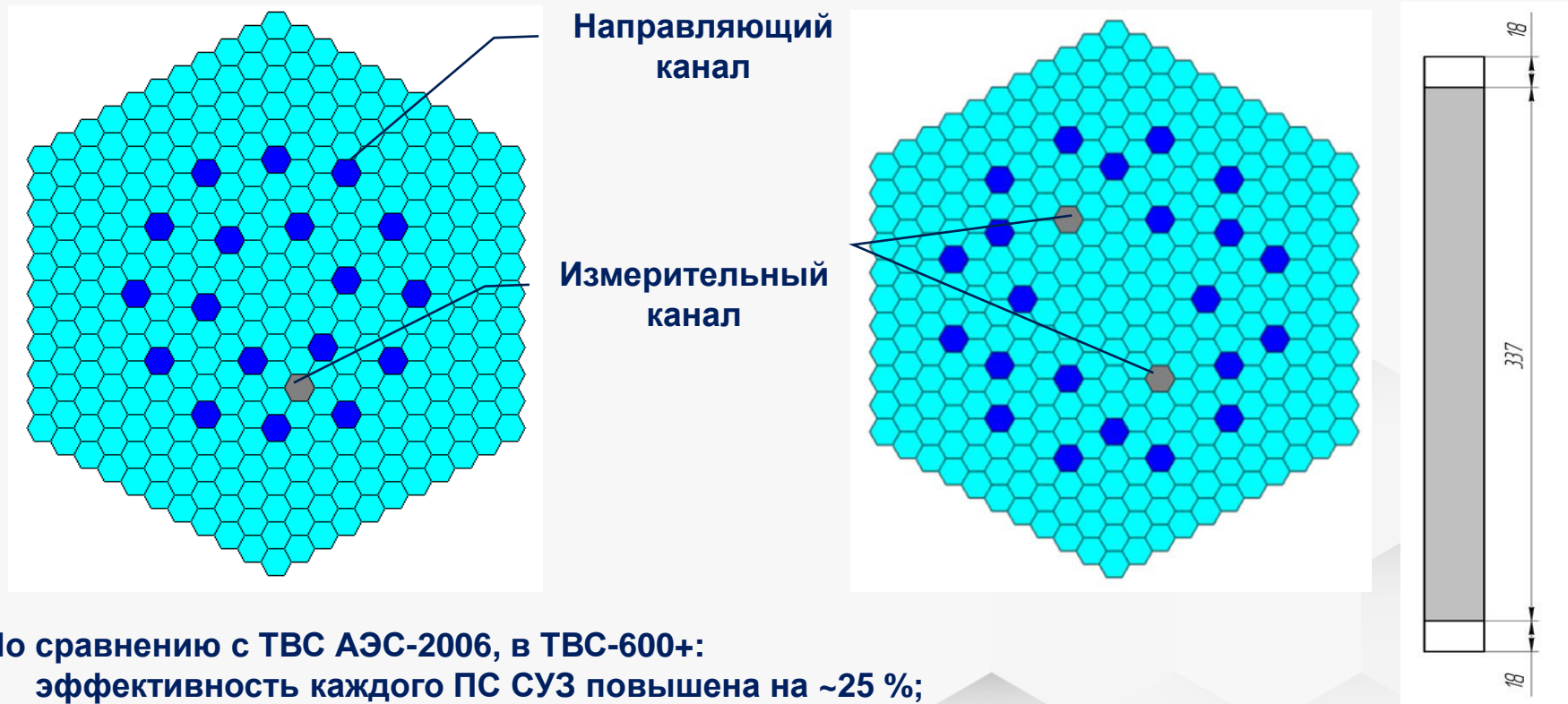




PU ВВЭР-С с ТВС-600+

Спектральное регулирование с использованием поглощающих стержней

В основу конструкции ТВС-600+ легла конструкция ТВС для реактора ВВЭР-1200. Геометрия размеры и материальный состав выгородки соответствует ВВЭР-1200. Для минимизации утечки нейтронов используются аксиальные бланкеты из природного урана.



По сравнению с ТВС АЭС-2006, в ТВС-600+:

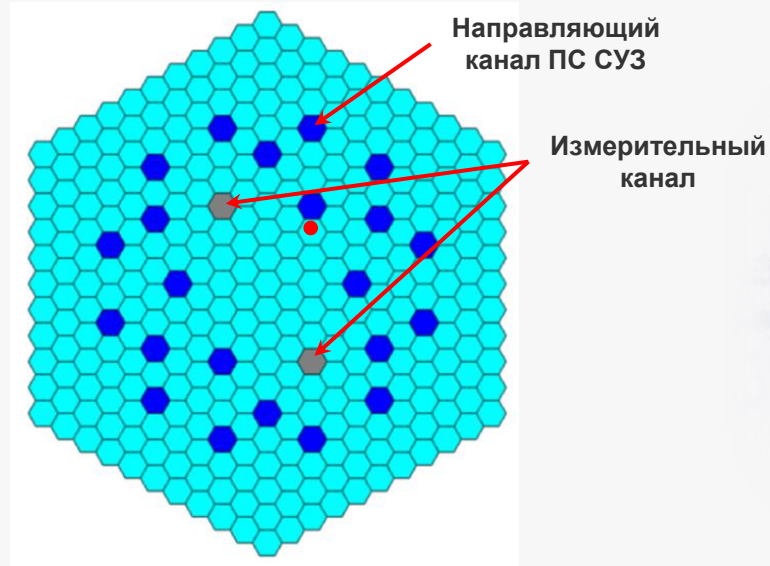
- эффективность каждого ПС СУЗ повышена на ~25 %;
- при равной мощности ТВС максимальная мощность твэла в ТВС-600+ на 3% ниже;
- экономия природного урана ~1%;
- мощность 6-ти окружающих КНИ твэлов в ТВС-600 и ТВС-600+ равна 1.08 и 1.0 (повышается представительность измерения).

При использовании торцевых бланкетов из природного урана высотой 18 см удельный расход природного урана уменьшается на ~ 2 %

Два варианта разработки проекта ВВЭР-С средней мощности



ТВС+ (базовая)



Технические особенности ТВС+

- Технические решения ТВС-2006
- Увеличение количества поглощающих стержней до 22 шт.

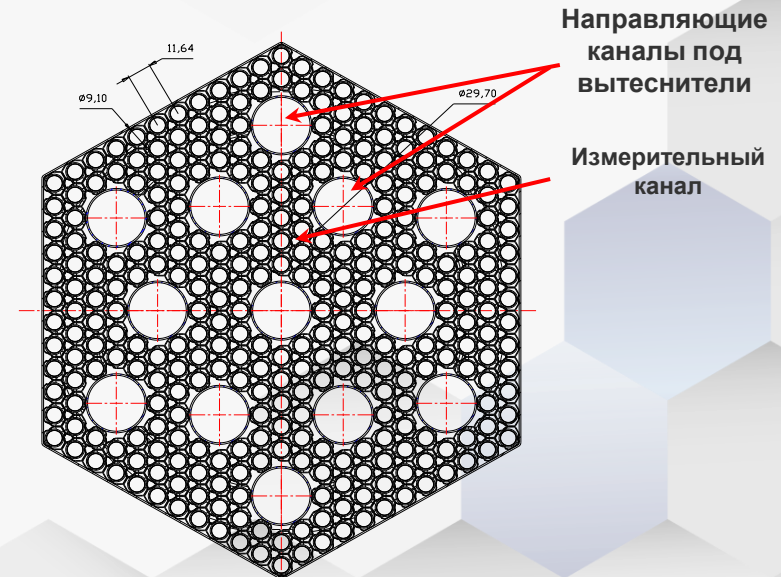
Кольская АЭС-2



Технические особенности активной зоны ВВЭР-600

- Выбор корпуса ВВЭР большой мощности (низкая энергонапряженность а.з.)
- Применение уран-плутониевого топлива

ТВС-С



Технические особенности ТВС-С

- Тесная решетка твэл (шаг 11,64мм.)
- Изменение водо-уранового отношения в диапазоне – 1,5–2,0

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, 18, 24
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

Итак, на сегодня:



Обе модификации активной зоны в перспективе позволяют :

- организовать экономичные топливные циклы на природном уране (не более 130 тUпр/ГВт(э)·год);
- реализовать 100%-ю загрузку МОХ-топлива;
- отказаться от борного регулирования при работе на мощности.

Обе модификации активной зоны удовлетворяют требованиям ядерной безопасности.

Для проекта энергоблоков 1 и 2 Колькой АЭС-2 основным вариантом принята активная зона с ТВС-600+.

Разработка варианта активной зоны с ТВС-С на стадии эскизного проекта прорабатывается с целью реализации всего потенциала РУ со спектральным регулированием в рамках РУ большой мощности.

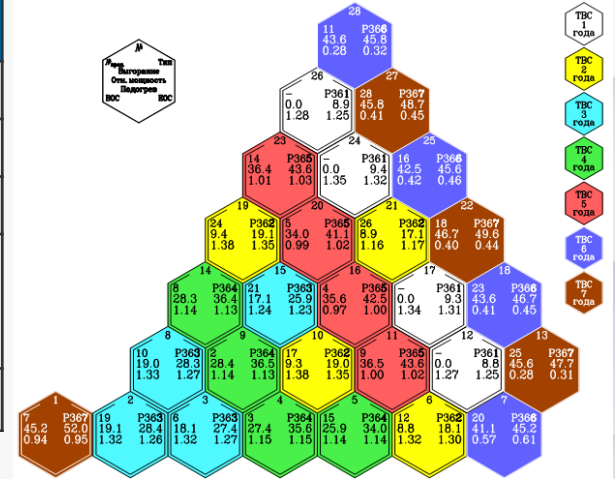
Спасибо за внимание!



Технические характеристики активной зоны с ТВС+



Характеристика	Значение
Размеры оболочки твэла	9,1 мм / 0,69 мм
Топливной таблетки	7,6 мм / 1,2 мм
Высота топливного столба	373 мм
Система ОР СУЗ: ПС АЗ ПС РГ (черные/серые)	121 шт. 58 шт. 24 шт. / 39 шт.
Обеспечение подкритичности	Две независимых системы – борная система и система механических ПС СУЗ



Характеристика	Значение		
	12 UOX	24 UOX	12 (MOX)***
Топливный цикл, мес. (тип топлива)			
Кол-во загружаемых ТВС, шт	24	42	24
Среднее выгорание, МВт сут/кгтм	48,1	55,8	48,3
Среднее обогащение топлива/содержание Pu, %	3,6	4,59	7,5
Ежегодный расход природного урана/плутония, т/ГВт год ($x_{отв}=0,2\%$)	123	141	1,35
Максимальный срок эксплуатации ТВС, лет	7	8	7
Эффективность аварийной защиты на номинальной мощности, кроме наиболее эффективного ПС СУЗ (бор, ксенон и температуры номинальные)*, %	-9,4	-8,8	-7,8
Реактивность реактора в горячем состоянии, в активную зону погружены только ПС групп аварийной защиты, кроме наиболее эффективного ПС СУЗ, (бор, ксенон номинальные)*, %	-6,5	-6,0	-4,6
Концентрация борной кислоты в хол. состоянии обеспечивающая подкритичность 2%**, все ОР СУЗ извлечены из а.з., гСН ₃ ВО ₃ /кгН ₂ О	8,5	12,4	18,5

* Критерием является заглушение реактора с отказом одного наиболее эффективного органа СУЗ (п. 2.3.2.2. НП-082-07), значение должно быть меньше - 3% с учетом погрешности расчетов;

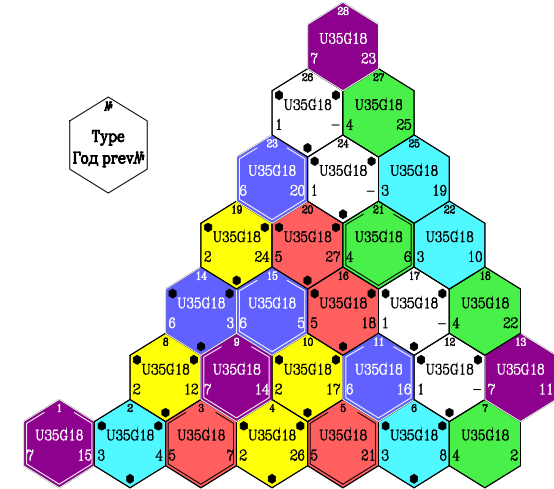
** Минимальная подкритичность реактора в процессе перегрузки с учетом возможных ошибок должна составлять не менее 2%; (п.2.7.2.5 НП-082-07)

*** Предварительная оценка (результаты детального моделирования будут получены в ходе выполнения НИОКР в конце 2023 года)

Технические характеристики активной зоны с ТВС-С



Характеристика	Значение
Размеры оболочки твэла	9,1 мм / 0,69 мм
Топливной таблетки	7,6 мм / 1,2 мм
Высота топливного столба	373 мм
Система ОР СУЗ: ПС АЗ ПС ВС (вытеснители)	121 шт. 43 шт. 78 шт.
Обеспечение подкритичности	Две независимых системы – борная система и система механических ПС СУЗ



Характеристика	Значение		
	12 (UOX)	24 (UOX)	12 (MOX)
Топливный цикл, мес. (тип топлива)	12 (UOX)	24 (UOX)	12 (MOX)
Кол-во загружаемых ТВС, шт	24	48	24
Среднее выгорание, МВт сут/кгтм	49,1	51,1	49,1
Среднее обогащение топлива/содержание Pu, %	3,63	4,22	6,8
Ежегодный расход природного урана/плутония, т/ГВт год ($x_{отв}=0,2\%$)	120	141	1,22
Максимальный срок эксплуатации ТВС, лет	7	8	7
Эффективность аварийной защиты на номинальной мощности, кроме наиболее эффективного ПС СУЗ (бор, ксенон и температуры номинальные)*, %	- 8,2	- 8,0	- 7,2
Реактивность реактора в горячем состоянии, в активную зону погружены только ПС групп аварийной защиты, кроме наиболее эффективного ПС СУЗ, (бор, ксенон номинальные),* %	- 4,8	- 5,5	- 4,8
Концентрация борной кислоты в хол. состоянии обеспечивающая подкритичность 2%** , все ОР СУЗ извлечены из а.з., гСН ₃ ВО ₃ /кгН ₂ О	6,7	7,8	12,7

* Критерием является заглушение реактора с отказом одного наиболее эффективного органа СУЗ (п. 2.3.2.2. НП-082-07), значение должно быть меньше - 3% с учетом погрешности расчетов;

** Минимальная подкритичность реактора в процессе перегрузки с учетом возможных ошибок должна составлять не менее 2% (п.2.7.2.5 НП-082-07)

Предлагаемые изменения конструкции ТВС+ и ПС СУЗ по отношению к ВВЭР-1200/1300 обеспечивают:



- повышение эффективности системы ПС СУЗ, в результате которого в соответствии с п. 2.3.1.4. ПБЯ в реакторе будет две системы остановки (борная система и система ПС СУЗ) каждая из которых способна, независимо одна от другой, обеспечивать перевод реактора в подкритическое состояние и длительное поддержание его в подкритическом состоянии с учетом принципа единичного отказа или ошибки персонала;
- запас по эффективности системы ПС СУЗ, который позволит в перспективе реализовать топливные загрузки, содержащие до 100% МОКС топлива;
- возможность снижения концентрации борной кислоты на номинальной мощности за счет погруженных в активную зону ПС СУЗ;
- реализацию маневренных режимов, вплоть до перевода реактора в горячее состояние с последующим выходом на мощность без изменения текущего значения концентрации борной кислоты;
- снижение по сравнению с ТВС-1200 неравномерности потвэльного распределения энерговыделения и подогрева теплоносителя в ТВС;
- экономию природного урана за счет увеличения водо-уранового отношения в ТВС;
- возможное улучшение термомеханических свойств ТВС при длительной эксплуатации ТВС в активной зоне;
- повышение точности измерений распределения энерговыделения системой СВРК за счет оптимизации расположения СВРД в ТВС и в активной зоне.

Ограничение эффективности системы ПС СУЗ - эффективность выброшенного ПС

О системе борного регулирования



1. Отказаться от системы борного регулирования на текущем этапе проектирования не представляется возможным по следующим причинам:
 - необходима вторая независимая (разные принципы действия) система воздействия на реактивность в соответствии с требованием ПБЯ;
 - обеспечивается подкритичность в стояночном режиме и при перегрузках (без риска резкого ввода положительной реактивности);
 - обеспечивается гибкость топливных циклов (включая переходные загрузки) и увеличиваются теплотехнические запасы (снижение неравномерности поля энерговыделения).
2. Реализация работы энергоблока на мощности для стационарной загрузки без использования борного регулирования позволяет сократить сброс в окружающую среду трития по сравнению с ВВЭР-ТОИ в 10 раз.
3. Снижение концентрации борной кислоты в стояночных режимах (с 16 г/кг до 7 г/кг) за счет изменения уран-водного отношения с помощью вытеснителей приводит к снижению текущих затрат на эксплуатацию энергоблока средней мощности на ~20 %* и снижению расходов на переработку РАО до 50%*.

* «Расчет увеличения затрат на эксплуатационные нужды энергоблока ВВЭР-С средней мощности со спектральным регулированием Кольской АЭС-2 в случае применения борного регулирования», Рег.№ 138-21/ПТО, Кольская АЭС, 2021.

Зависимость удельного расхода природного урана
(кг/МВт*сут (тепл)) от длительности кампании

■ ВВЭР-600+ ■ ВВЭР-ТОИ

