



Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»



ВВЭР со спектральным регулированием – путь к эффективному использованию урана - 238

Семченков Ю.М., НИЦ «Курчатовский институт»

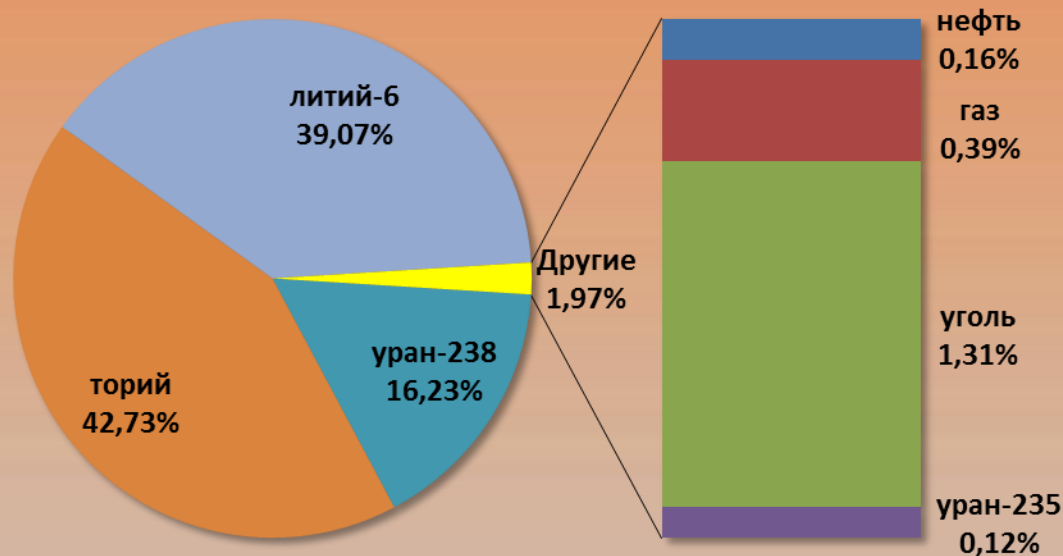
Мохов В.А., ОКБ «Гидропресс»

Алексеев П.Н., НИЦ «Курчатовский институт»

Москва, Росэнергоатом, МНТК-2014, 21-23 мая 2014.

Сравнительная оценка топливных ресурсов России

Распределение энергетических ресурсов в России, %

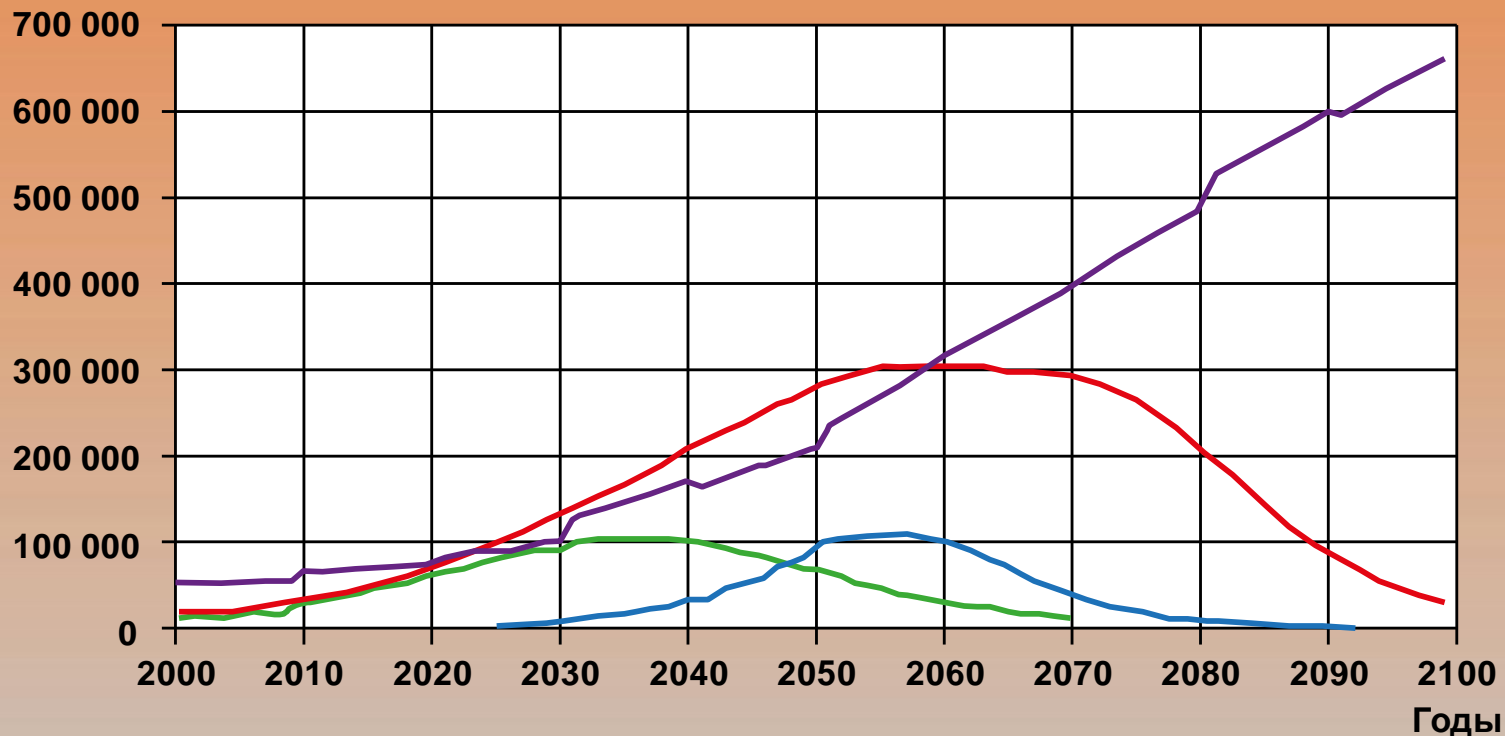


Нефть – $9.9 \cdot 10^9$ тонн, газ – $48 \cdot 10^{12}$ м³, уголь – $1.57 \cdot 10^{11}$ тонн, U235 – $6.35 \cdot 10^5$ тонн

Основные ресурсы энергии сосредоточены в U-238, Li-6 и Th-232

Оценка потенциала годовой добычи природного урана

Природный уран, т/год



- Подтвержденные запасы: 4,0 млн т.
- Прогнозные ресурсы: 2,9 млн т.
- Полные ресурсы: 16,7 млн т.
- Потребности для открытого топливного цикла

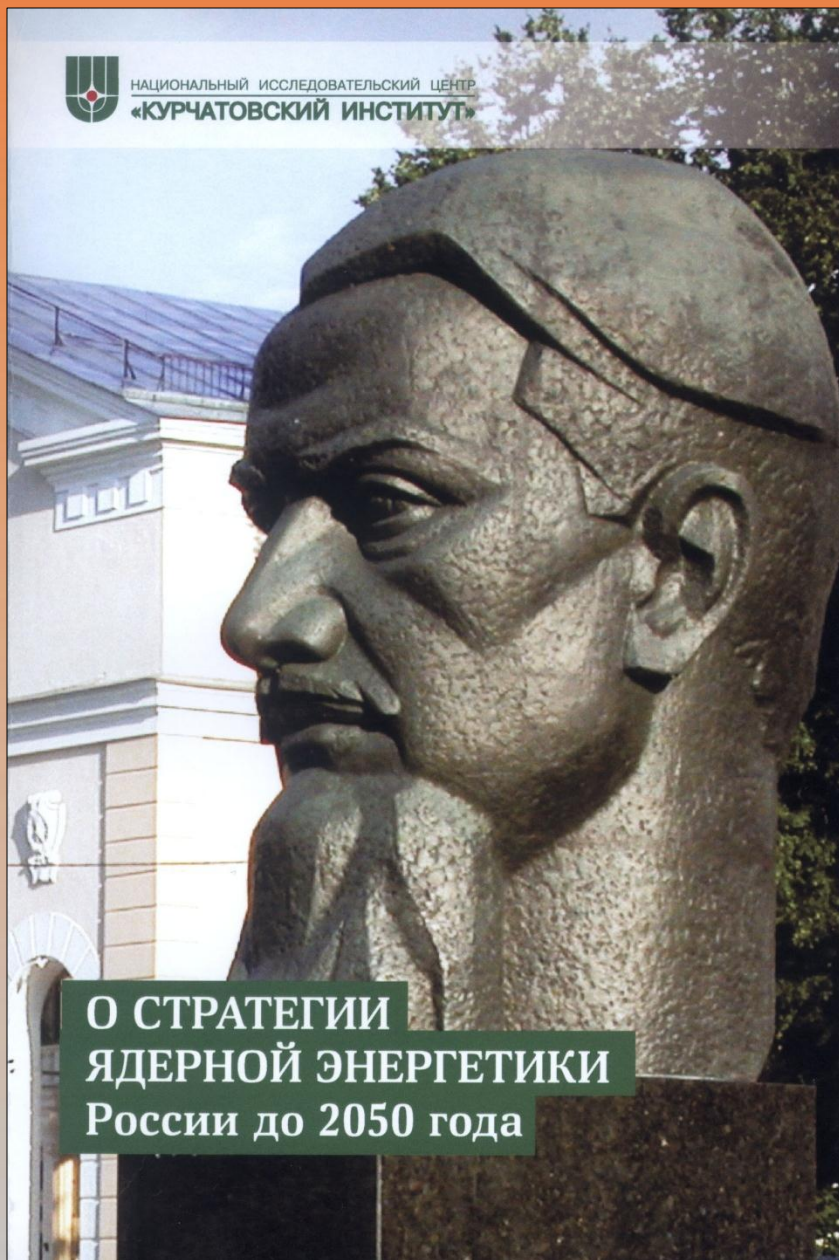
Этап перехода к ЗЯТЦ в ядерной энергетике России

Ближайшая перспектива ядерной энергетики России опирается на развитие технологии ВВЭР. Блоки ВВЭР, которые будут построены в России и за рубежом к 2035 году, за 60 лет службы израсходуют основные запасы дешевого урана в России (~650 000 т) при работе в открытом топливном цикле.

Центральные стратегические задачи ядерной энергетики России – инвестиционная привлекательность энергоблоков и создание замкнутого топливного цикла с максимальным использованием сырьевого потенциала урана-238 и тория-232 на базе быстрых бридеров и тепловых реакторов, а также решение проблемы накопления ОЯТ.

Многокомпонентность, наряду с возможностями реализации различных топливных схем в реакторах, создает широкие возможности маневра в структуре ядерного топливного цикла, которые могут в приемлемые временные периоды компенсировать возможные неудачи технологии или отклонение реального развития от намеченного сценария (т.е. компенсировать возможные риски).

Параллельно с замыканием ЯТЦ должны осуществляться минимизация себестоимости добываемого урана и оптимизация использования природного урана в действующих ядерных реакторах.



**Доклад подготовлен
в Национальном
исследовательском центре
«Курчатовский институт»
в 2010-2011 гг. экспертной
группой в составе:**

**П.Н. Алексеев,
В.Г. Асмолов,
А.Ю. Гагаринский,
Н.Е. Кухаркин,
Ю.М. Семченков,
В.А. Сидоренко,
С.А. Субботин,
В.Ф. Цибульский,
Я.И. Штромбах**

**при поддержке широкого круга
специалистов Курчатовского
института.**

Основные положения стратегии

1. Ядерная энергетика – неотъемлемая составляющая энергетики России.
2. Формирование ядерной энергетики связано с ЗЯТЦ.
3. Структура парка ядерных реакторов многокомпонентна.
4. Стоимость установленной мощности АЭС к 2030 г. увеличится до 4000\$/кВт.
5. **Коммерческий заказ для ядерно-энергетического сектора экономики в ближайшие десятилетия будет сосредоточен на водо-водяных тепловых реакторах.**
6. Структура вариантов развития ядерной энергетики демонстрирует необходимость серийного строительства быстрых реакторов с расширенным воспроизводством топлива после 2030 г.
7. Для обеспечения гарантий безопасности следует внедрить международные критерии защиты от внешних воздействий и стихийных бедствий и реализовать задачу максимального уменьшения их исходной опасности.
8. Инновационный характер ядерной энергетики требует целенаправленной поддержки государства.

Расширение сырьевой базы ВВЭР

- С начала эксплуатации до 2010 года из российских ВВЭР-1000 (9 блоков) выгружено порядка 7000 ТВС, в топливе которых содержится:
 - уран-235 в количестве 0.7 – 1.2 %,
 - плутоний в количестве 0.6 – 1.3% с содержанием делящихся изотопов в плутонии от 75% до 65%.
- Путем обогащения выделенного из выгоревшего топлива урана можно в принципе получить регенерированное урановое топливо с содержанием изотопа уран-235 около 5.1%. Из него можно изготовить порядка **1500 ТВС**, эквивалентных по энергопотенциалу ТВС, изготовленным из природного урана, обогащенного до 4.95%. Из-за повышения содержания урана-232 при обогащении регенерата необходимо разбавлять его природным ураном.
- Выделенного из выгоревшего топлива плутония достаточно для изготовления порядка **800 МОХ ТВС**, эквивалентных по энергопотенциалу ТВС, изготовленным из природного урана, обогащенного до 4.95%.

А.П. Александров:

«Будущая крупная атомная энергетика должна быть способной (в смысле ядерного топлива) к саморазвитию... с подачей в топливный цикл извне только недефицитного U-238».

**«Ядерная энергетика и ее роль в техническом прогрессе»
– Генеральный адрес, зачитанный на открытии
VII Мирового энергетического конгресса, 1968 г.**

Две линии создания Супер-ВВЭР

Эволюционно-
инновационная
(эволюционная)

ОСНОВА

Развитие
существующей
технологии ВВЭР

Инновационно-
революционная
(инновационная)

ОСНОВА

На основе
существующей
технологии ВВЭР
создание реактора,
работающего
на сверхкритических
параметрах

ВВЭР-С

Направление эволюционного развития ВВЭР со спектральным регулированием получило название ВВЭР-С.

Реактор ВВЭР-С является одним из вариантов эволюционно-модернизированных тепловых реакторов ВВЭР, отвечающих требованиям системы Ядерной Энергетики в среднесрочной перспективе.

Энергоблок с ВВЭР-С может рассматриваться как вариант дальнейшего эволюционного развития корпусных водо-водяных энергетических реакторов и диверсификации ядерной энергетики в переходный период при реализации замкнутого ядерного топливного цикла.

Цели развития эволюционного «СУПЕР-ВВЭР» – ВВЭР-С с модернизацией традиционной технологии ВВЭР

- расход природного урана в открытом топливном цикле – (130-135) т/ГВт(э)·год;
- максимальное уменьшение количества поглотителей в активной зоне в процессе выгорания, включая борную кислоту;
- возможность работы в замкнутом топливном цикле с КВ ~0,7-0,8.

Основным методом решения поставленных задач выбран метод регулирования спектра нейтронов в активной зоне ВВЭР в процессе его работы.

Диапазон изменения водо-уранового отношения при опущенных и извлеченных вытеснителях меняется от 1.0 до 1.96.

Четыре составляющие запаса реактивности в начале кампании

- 1 Запас реактивности на разогрев
- 2 Запас реактивности для выхода на мощность
- 3 Запас реактивности на Xe отравление
- 4 Запас реактивности на выгорание

Первые три запаса являются слабо изменяемыми для ВВЭР.

Запас на выгорание в начале кампании компенсируется гадолинием в твэгах и бором и теплоносителе.

Альтернативный способ компенсации запаса реактивности на выгорание в начале кампании

1

Уменьшение возникновения тепловых нейтронов за счет увеличения вероятности резонансного захвата

2

Увеличение резонансного захвата за счет повышения жесткости спектра

3

Ужесточение спектра за счет уменьшения водо-уранового отношения

4

Уменьшение водо-уранового отношения за счет уменьшения шага твэл

5

Уменьшение шага твэла за счет применения спектрального регулирования

Основной эффект спектрального регулирования

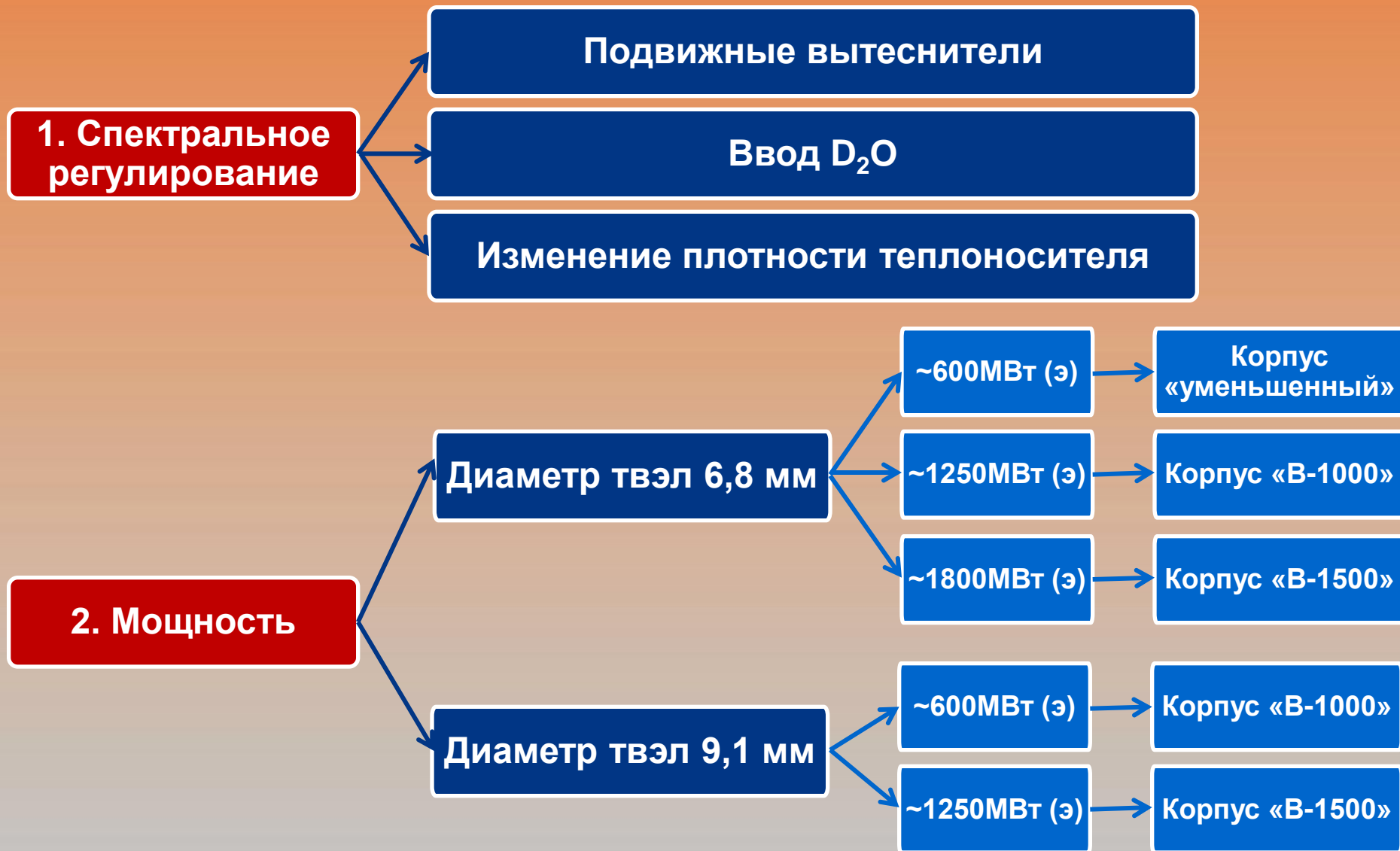
Увеличение захвата ^{238}U в начале кампании $\geq 10\%$
(в сравнении с захватом в штатной активной зоне)



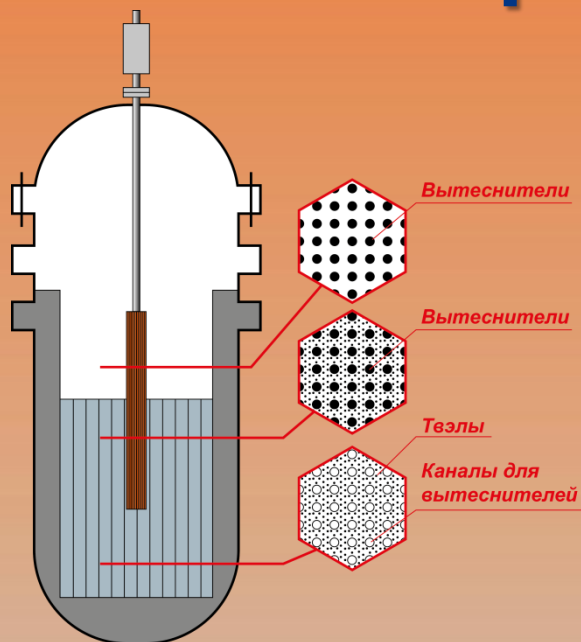
Отказ от компенсации
запаса реактивности за счет
борной кислоты

Снижение величины
необходимого запаса
реактивности (уменьшение
начальной загрузки ^{235}U)

Развилки проекта ВВЭР-С



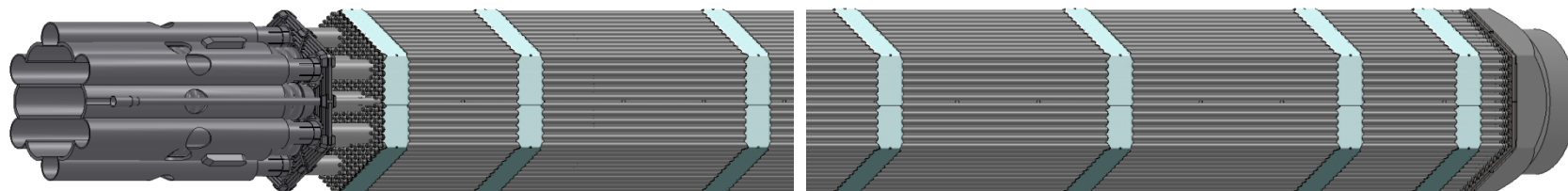
Эволюционный Супер-ВВЭР



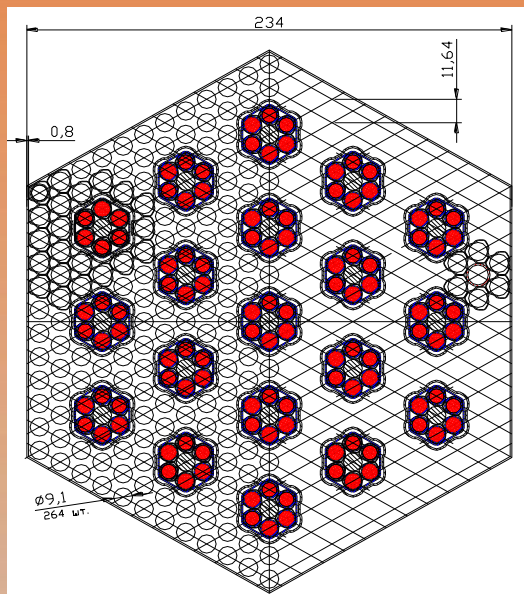
Параметр	ВВЭР-С
Организация-разработчик	НИЦ КИ
Мощность тепл./Эл, МВт	3300/1250
КПД АЭС, %	33 ↑
Давление в первом контуре, МПа	16.2
Температура на входе/выходе реактора, °С	297/329
Высота/диаметр активной зоны, м	3,4/4,57
Стадия разработки проекта РУ	ТЭИ
Срок, требуемый для завершения НИОКР и выпуска технического проекта РУ, лет *	10
Необходимость сооружения опытно-промышленной установки	—

Технические характеристики активной зоны ВВЭР-С

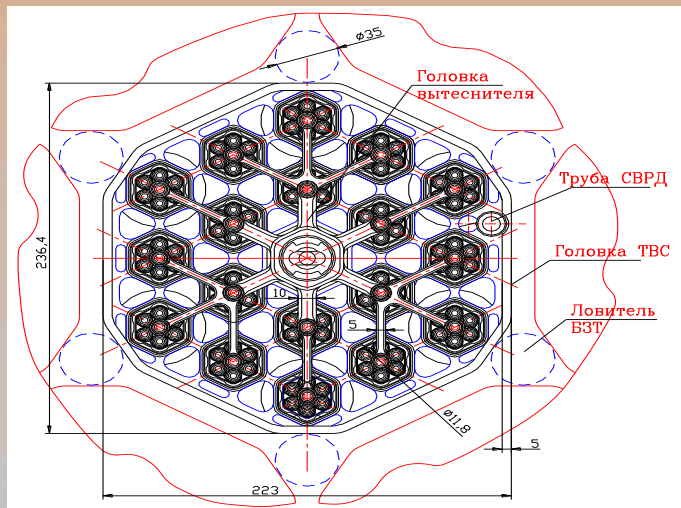
Характеристика	ВВЭР-С
Количество ТВС в активной зоне, шт	241
Количество ТВС с вытеснителями, шт	126
Количество ТВС с ПС СУЗ, шт	61
Высота топливного столба в холодном состоянии, мм	4200
Размер ТВС «под ключ», мм	234
Кампания реактора, месяцы	12
Кампания топлива, годы	6



Основные характеристики варианта ТВС ВВЭР-С с традиционным ТВЭЛ



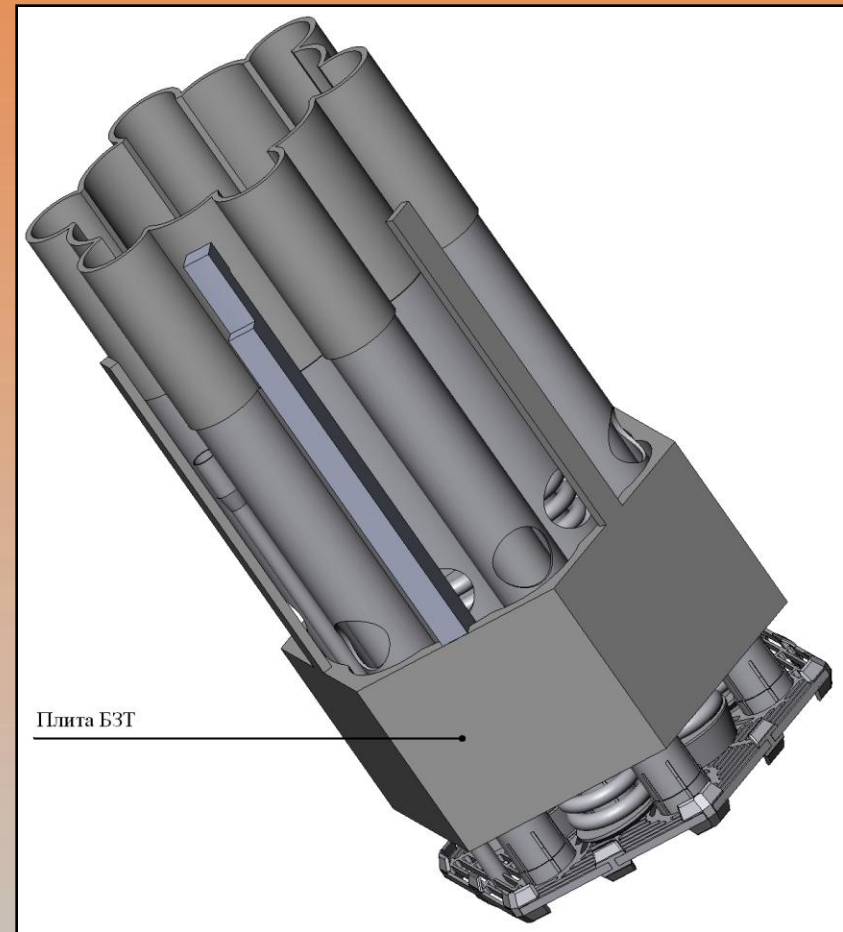
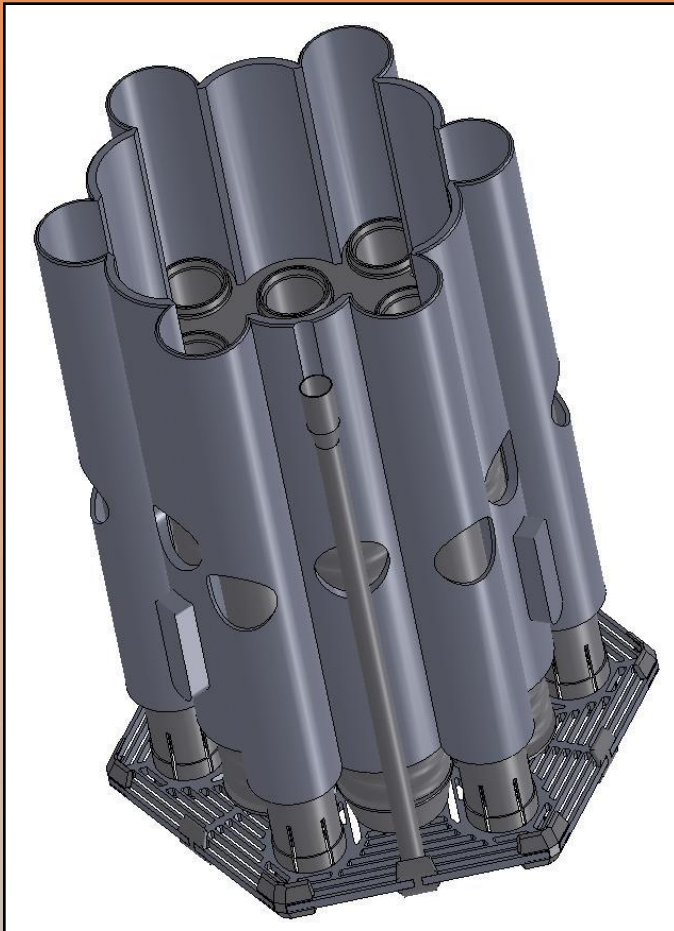
- ТВЭЛ с внешним диаметром 9.1 мм.
- Количество ТВЭЛов в ТВС 264 шт.
- Дистанционирующая решетка выполняется из ячеек, аналогичных используемым в конструкции ТВС-2М, установленных по треугольной сетке с шагом 11,64 мм вместо 12,75 мм.



- Тепловыделяющие элементы практически полностью повторяют конструкцию ТВЭЛов ТВС-2М.
- Вытеснители выполнены в виде 6 ТВЭЛов Ø8,6 мм из обедненного урана, закрепленных на циркониевом прутке.

Основные элементы ТВС

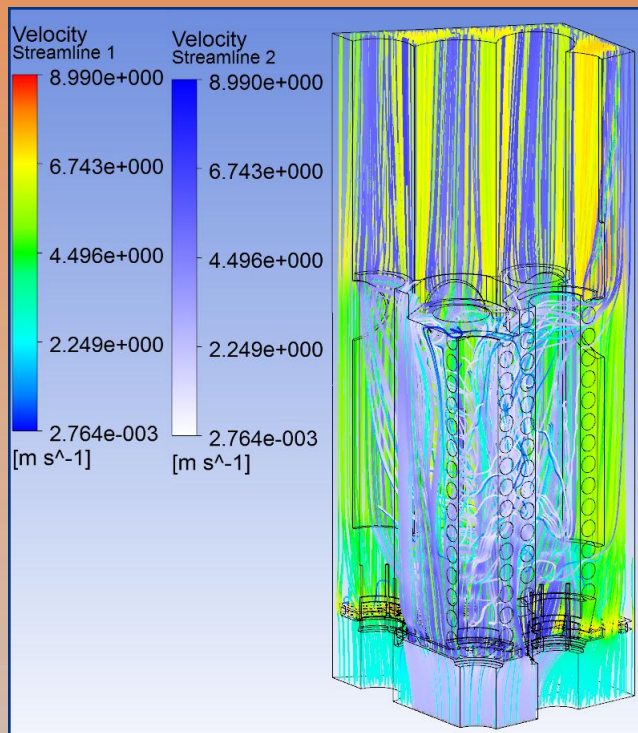
Головка (вариант под круглые НК)



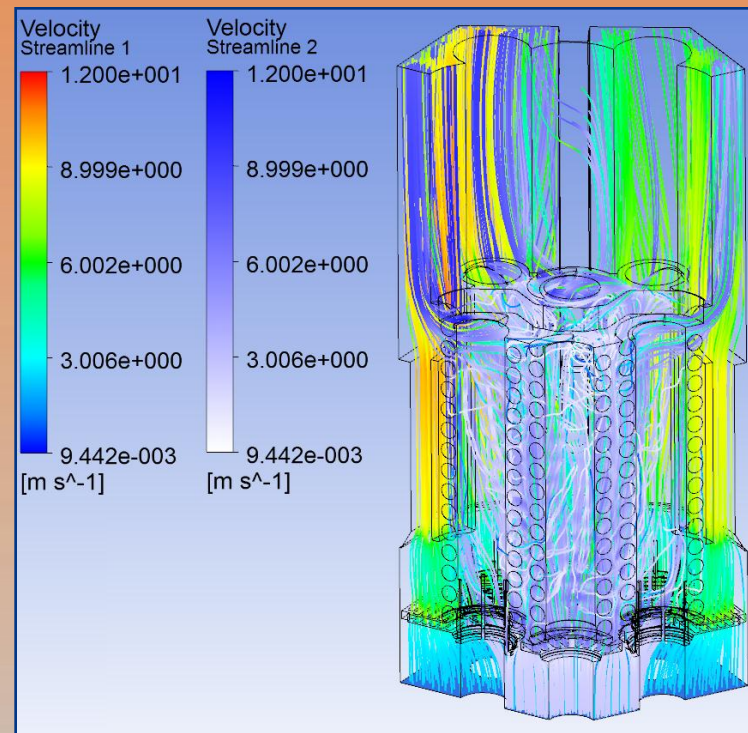
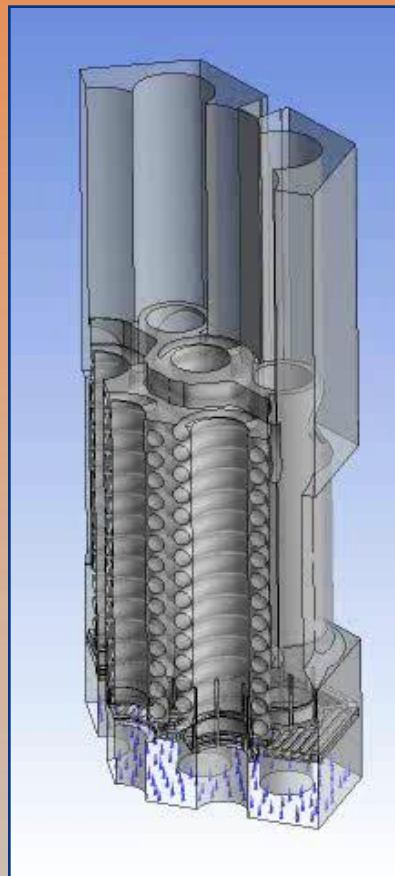
Модель стыковки ТВС с плитой БЗТ

Основные элементы ТВС

Линии тока в головке



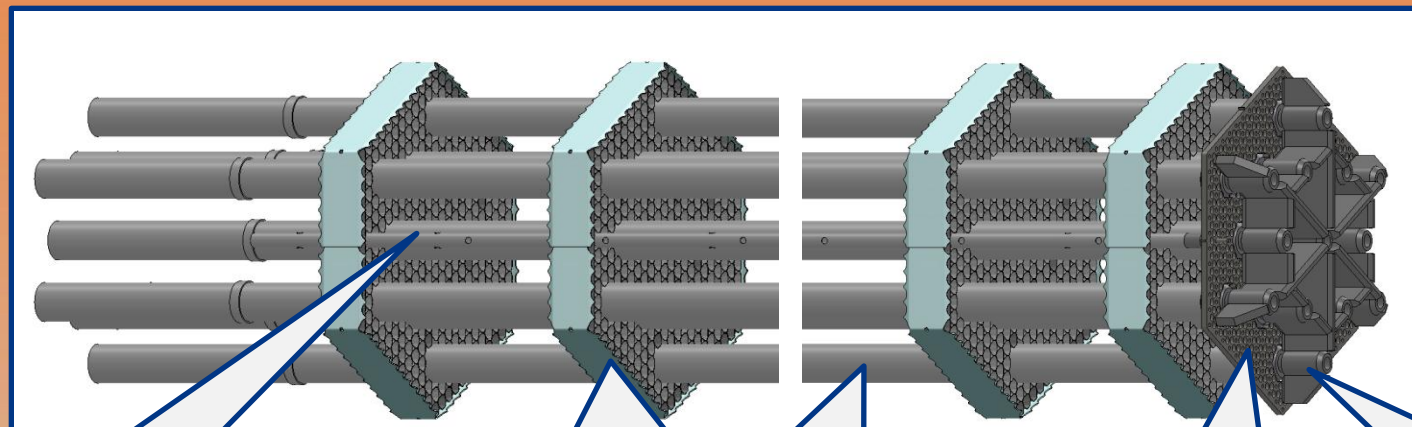
Без плиты БЗТ



С плитой БЗТ

Основные элементы ТВС

Каркас



Инструментальный канал

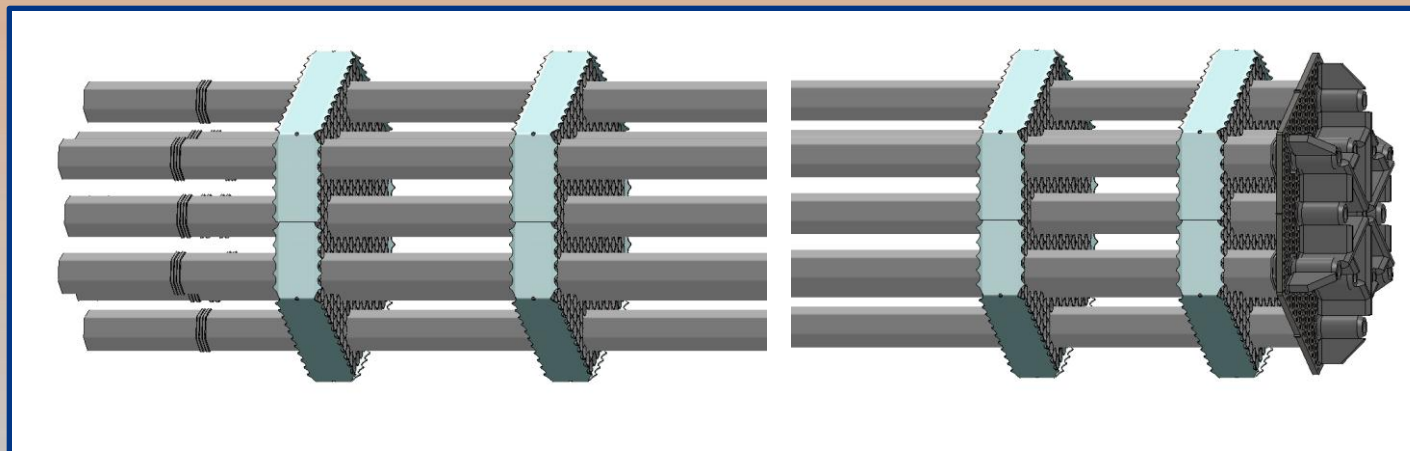
Дистанционирующая решетка

Направляющий канал

Нижняя решетка

Опорная плита

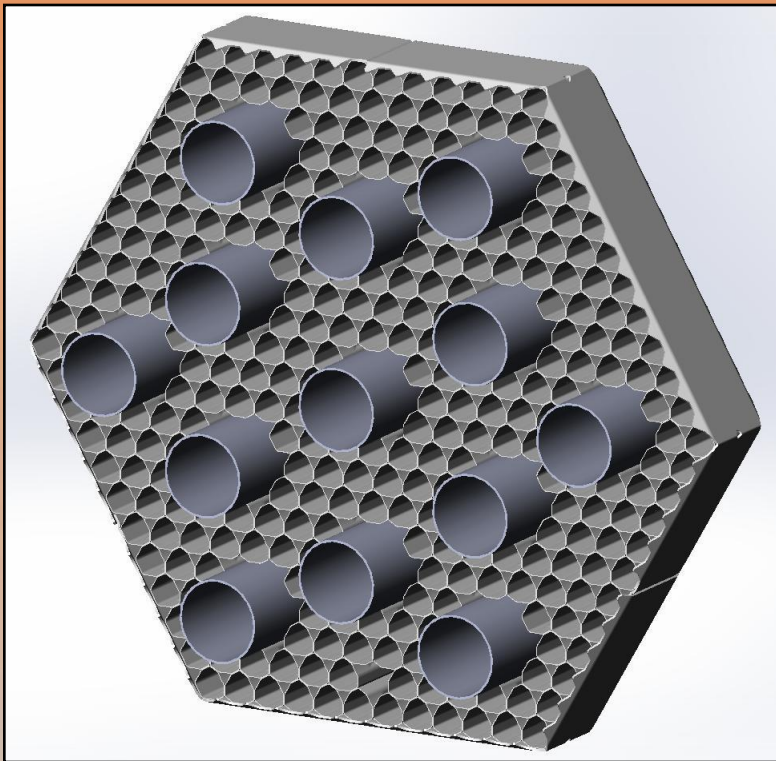
Вариант с круглыми НК



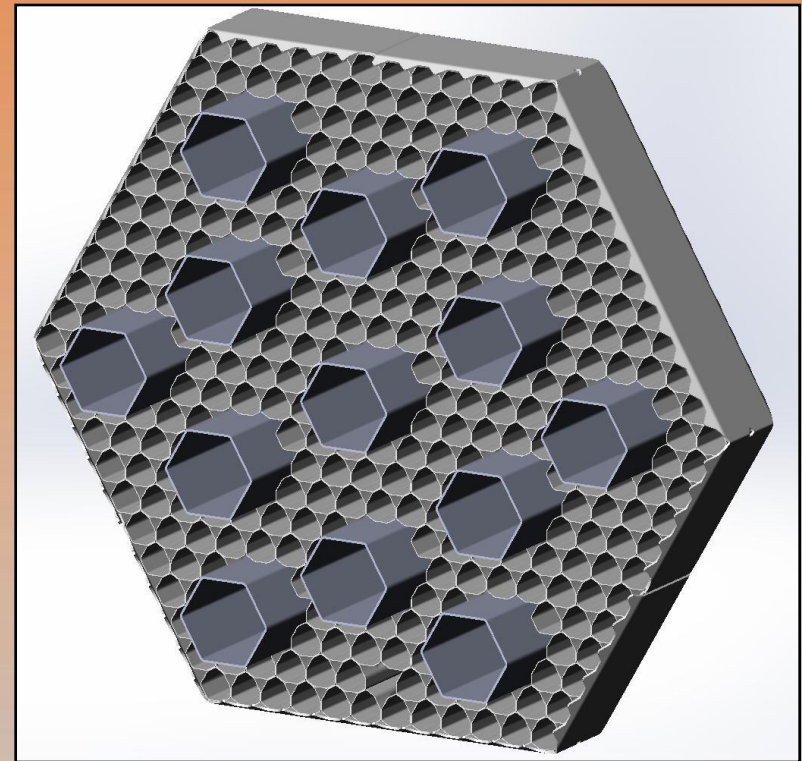
Вариант с шестигранными НК

Основные элементы ТВС

Дистанционирующая решетка

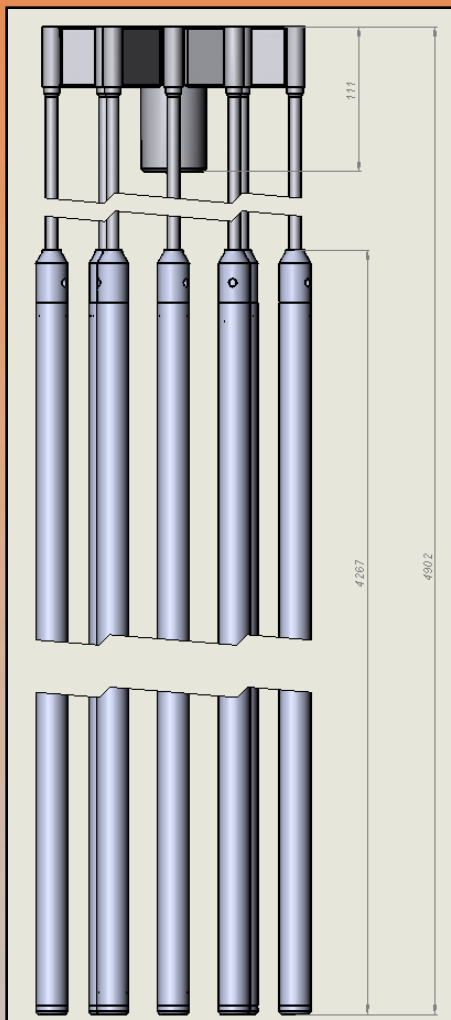


ДР с фрагментами круглых НК

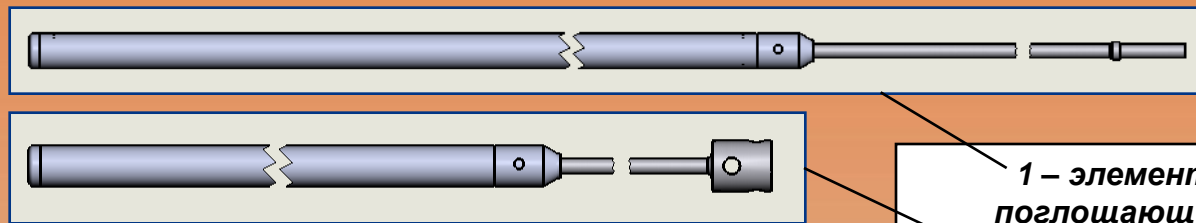


ДР с фрагментами шестигранных НК

Основные элементы ПС СУЗ



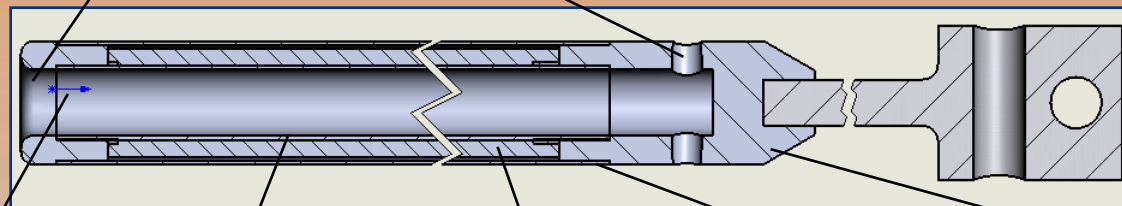
ПС СУЗ



1 – элемент поглощающий
2 – элемент поглощающий центральный

Отверстие для входа теплоносителя

Отверстие для выхода теплоносителя



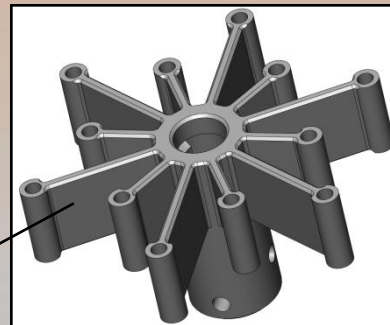
Нижняя концевая деталь

Внутренняя оболочка

Поглотитель

Внешняя оболочка

Верхняя концевая деталь

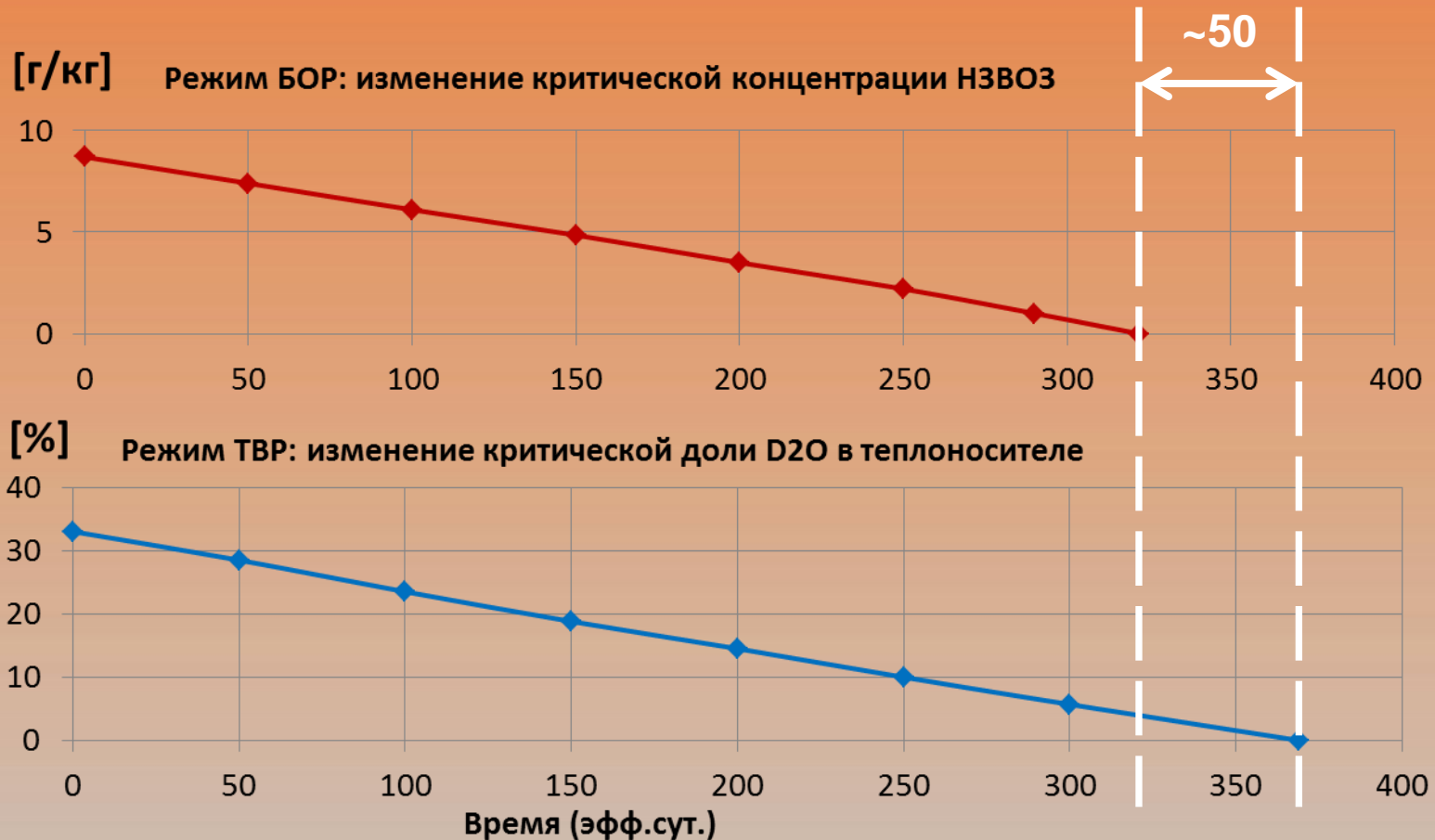


Траверса

Принцип тяжеловодного регулирования (ТВР) и физические эффекты

1. Для компенсации запаса реактивности на выгорание в начале работы топливной загрузки (вместо борной кислоты) в теплоноситель добавляется тяжелая вода, концентрация которой обеспечивает поддержание критичности реактора и регулируется (снижается) по мере выгорания.
2. Тяжелая вода обладает худшими замедляющими свойствами по сравнению с обычной водой. Уменьшение интенсивности замедления нейтронов повышает вероятность резонансного захвата избыточных нейтронов «четными» изотопами с последующим воспроизводством делящихся изотопов. При этом повышается энергопотенциал топлива и, соответственно, увеличивается длительность кампании. При борном регулировании (БР) избыточные нейтроны замедляются обычной водой и затем поглощаются бором.
3. Дополнительным бонусом ТВР является невозможность положительного ТКР (при ВВЭРовском водо-урановом отношении) и, следовательно, возможность отказа от твэгов или других выгорающих поглотителей.

Расчет стационарной топливной загрузки



Первый предварительный вывод:

При переходе с регулирования по схеме БР на схему ТВР на том же реакторе ВВЭР-1000 и на том же топливе можно получить увеличение энерговыработки на 13-15%.

Повышение конкурентоспособности РУ ВВЭР-С

Повышение параметров пара и эффективности машзала

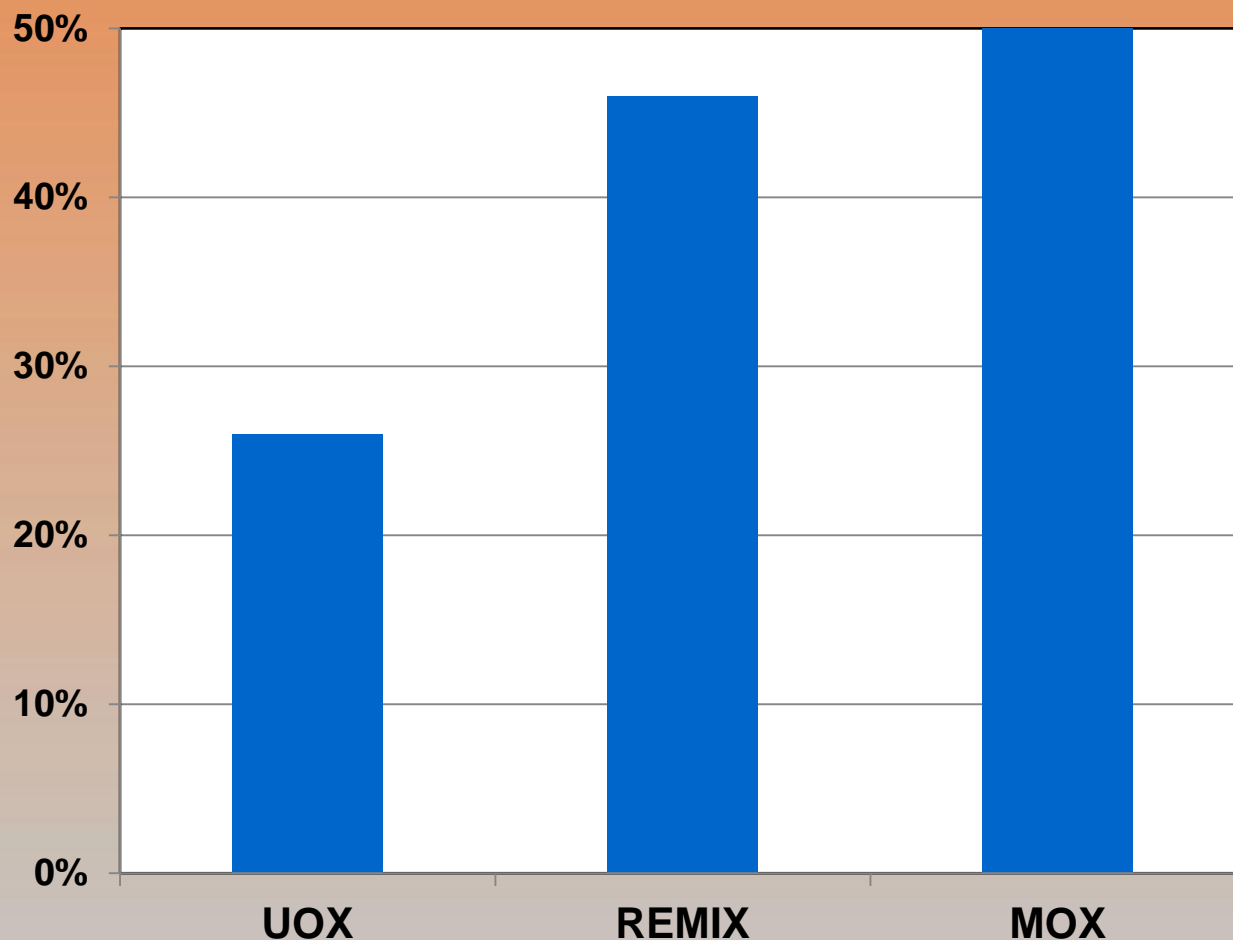
Повышение эффективности использования урана-238

Отказ от борного регулирования на всех эксплуатационных этапах РУ ВВЭР-С (включая этап перегрузки)

Обеспечение подкритичности в любом состоянии РУ ВВЭР-С с помощью ОР СУЗ и вытеснителей

Возможность работы в маневренных режимах

Сравнение экономии природного урана



Сравнение экономии природного урана за жизненный цикл при работе

- ВВЭР-ТОИ в ОЯТЦ;
- ВВЭР-С в ОЯТЦ с REMIX-топливом;
- ВВЭР-С в ЗЯТЦ с MOX-топливом

Экономический эффект

В ВВЭР-С внесены изменения, которые позволяют иметь 100%-ную загрузку МОКС-топливом

Реактор ВВЭР-С может работать ~30 лет на урановом топливе, а потом еще ~30 лет на своем же плутонии

В результате он сэкономит ~50% природного урана, по сравнению с работой ВВЭР-ТОИ в открытом топливном цикле. Если рассматривать запасы природного урана ~(130-260) долларов за кг, то экономия за весь жизненный цикл будет эквивалентна капитальным затратам на энергоблок.

Возможные временные рамки развития эволюционного варианта ВВЭР-С

2014-2022 гг.

Выполнение предпроектных и базовых НИОКР для АЭС с эволюционным вариантом ВВЭР-С (материалы, коды, базы данных, бенчмарки, стендовая база)

2017-2021 гг.

Проектирование АЭС с эволюционным вариантом ВВЭР-С (концептуальный проект, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, ТЭО, РД)

2022-2027 гг.

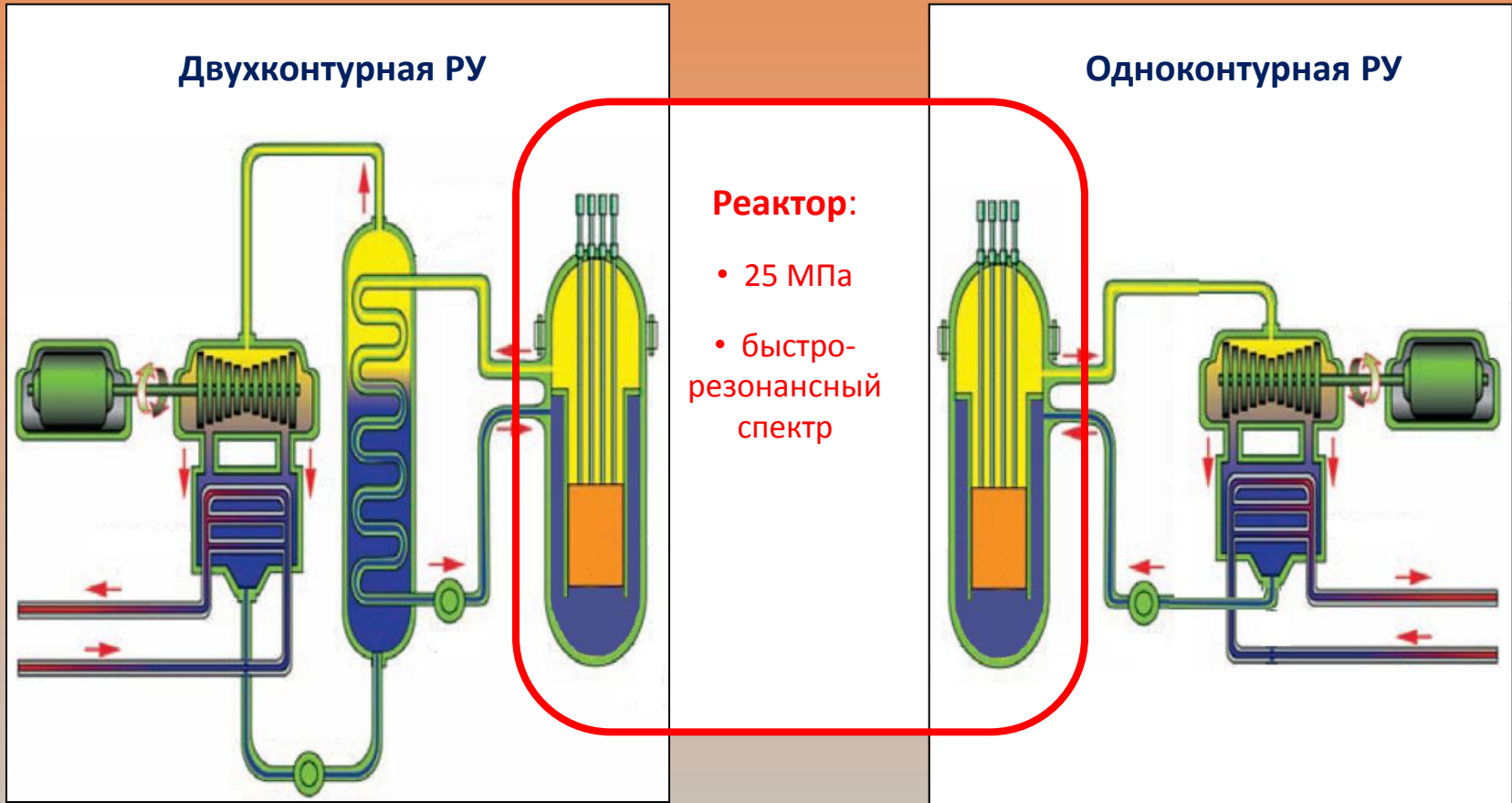
Сооружение головной АЭС с эволюционным вариантом ВВЭР-С

Для выполнения поставленной задачи организации НИЦ КИ, ОКБ ГП и АЭП располагают необходимым кадровым ресурсом и экспериментальной базой, на которой можно проводить работы для обоснования выбранных технических решений. Для выполнения Программы НИОКР на период до 2022 потребуется ~10млрд. руб.

НИЦ «Курчатовский институт» совместно с ОКБ «Гидропресс» и ОАО «Атомэнергопроект» завершил разработку технических требований к реактору ВВЭР-С, которые переданы на рассмотрение в концерн «Росэнергоатом».

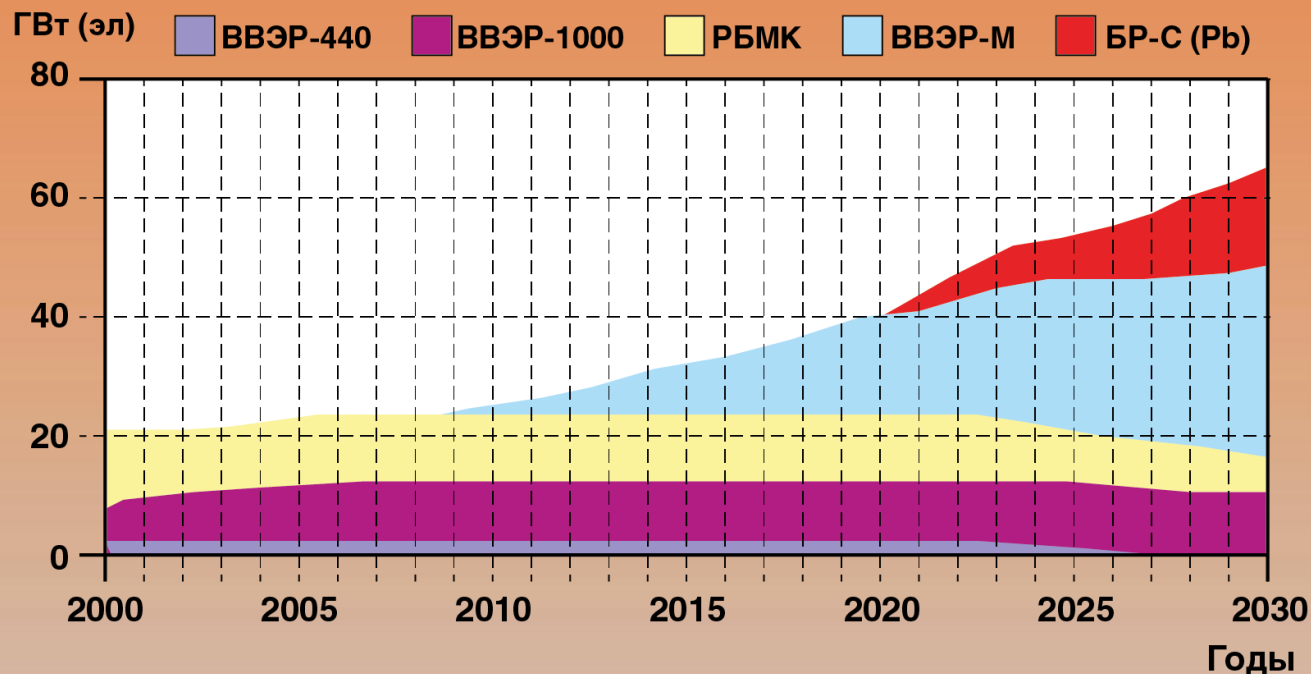
Инновационный Супер-ВВЭР (ВВЭР-СКД)

Концепция ВВЭР-СКД



2 контур: 24 МПа

Установленные мощности АЭС для максимального варианта развития АЭ в РФ (по энергетической стратегии ЭС-2030)

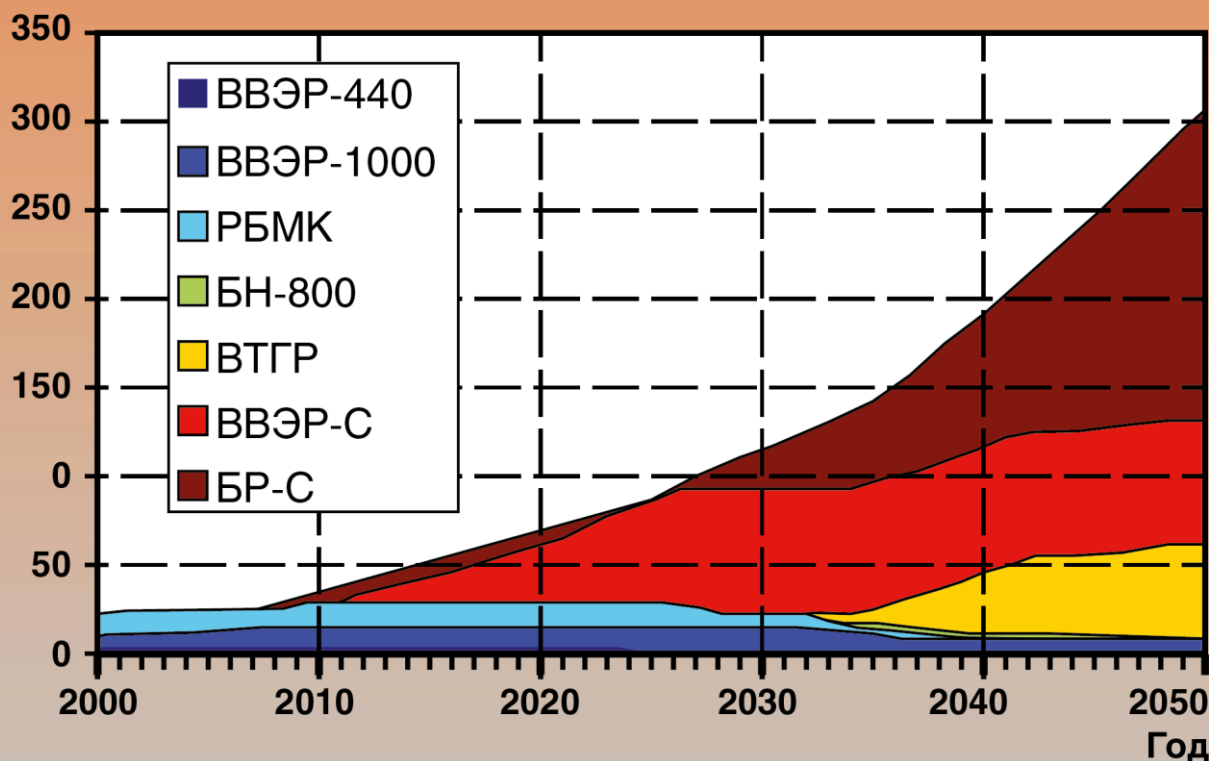


Структура атомной энергетики в период до 2050, где уровень установленных мощностей атомных станций на рубеже 2030 года соответствует верхней цифре в диапазоне, обозначенном в «Энергетической стратегии России до 2030 года», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 года.

В этом базовом сценарии предполагается развитие атомной энергетики с 2020-2025 года на основе замкнутого топливного цикла с быстрыми реакторами, обеспечивающими расширенное воспроизводство топлива с умеренными показателями.

Структура ядерной энергетики России к середине XXI века с учетом ее участия на международном рынке

Установленные мощности, ГВт (эл)

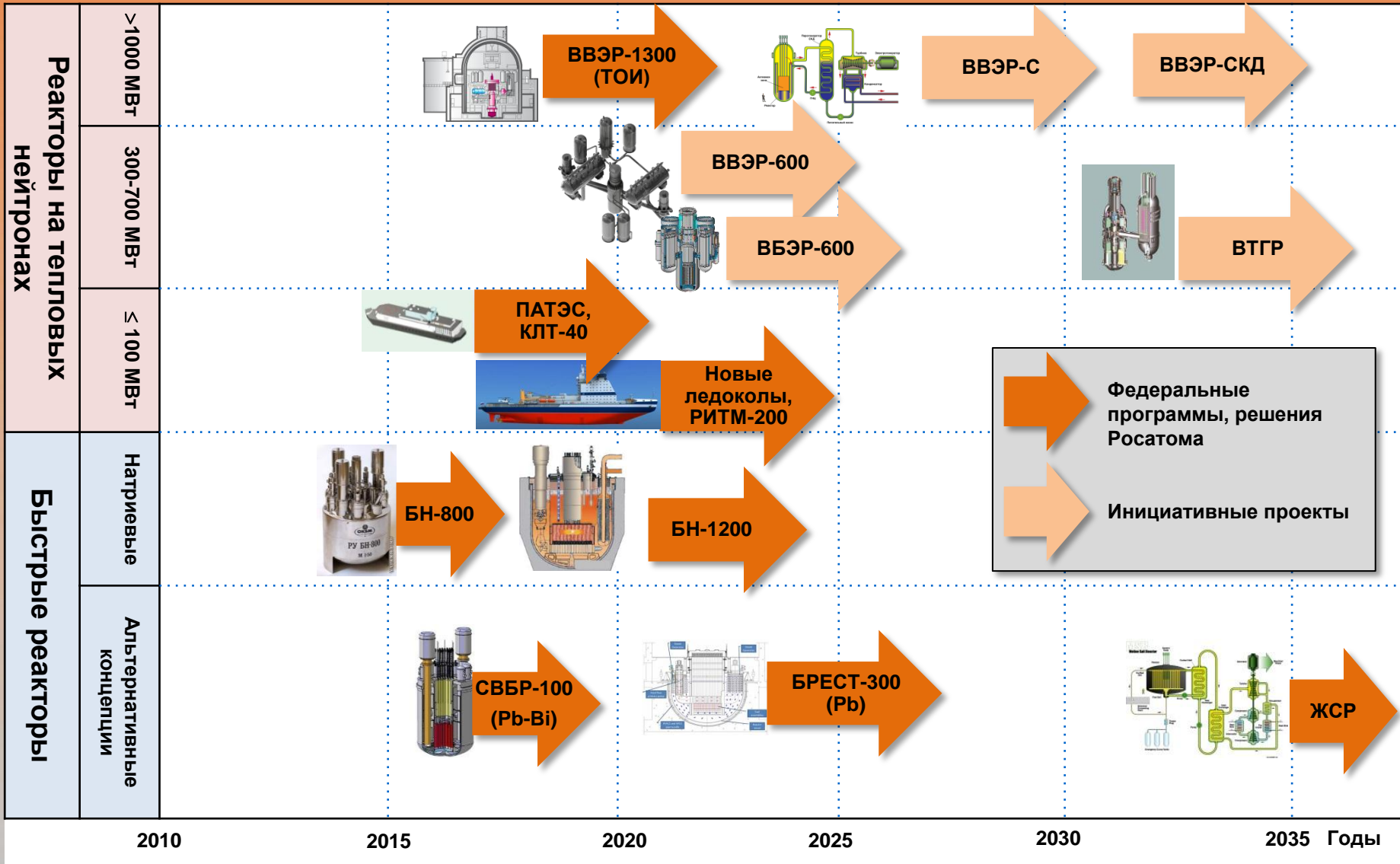


Сроки реализации ЗТЦ и внедрения инноваций как в направлении быстрых реакторов, так и направление тепловых рассматривается в “оптимистическом” варианте (по масштабам мощностей и времени)

Вывод

К моменту готовности всей структуры атомной энергетики к замыканию топливного цикла должен быть разработан оптимальный топливный цикл для работы в системе атомной энергетики с теми типами реакторов, которые к тому времени будут спроектированы, построены и покажут свою работоспособность и надежность.

Новые реакторные технологии российской ядерной энергетики



Спасибо
за внимание!

