



TVEL
ROSATOM

Топливо и топливные циклы ВВЭР

28.05.2024
Нейтроника-2024

Вадим Евгеньевич Кузин
Главный эксперт департамента по научно-технической деятельности

**75 энергетических
реакторов в 13 странах**

**Опыт эксплуатации ТВС
более 550 тыс. реактор-
лет**

**Опыт эксплуатации
ТВЭЛОВ более 98 млн
реактор-лет**

**Каждый 6 реактор в мире
работает на ядерном
топливе АО «ТВЭЛ»**



**АО ТВЭЛ
РОСАТОМ**

**Разделительно-
сублимационный
комплекс: АО «ПО «ЭХЗ», АО
«УЭХК», АО «СХК», АО «АЭХК»**

**Фабрикация ЯТ: АО «МСЗ»,
ПАО «НЗХК», АО ЧМЗ**

**Научно-конструкторский
комплекс: АО «ТВЭЛ», АО
«ВНИИНМ», АО «ЦПТИ»**

**Привлекаемые научно-конструкторские
организации: АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»
АО «ОКБМ Африкантов», НИЦ
«Курчатовский институт» и др.**

География



TVEL
ROSATOM





Сегодня

Огромный опыт
успешной эксплуатации
ЯТ

За 25 лет более 20 новых
топливных решений на
АЭС

Сопровождение
эксплуатации топлива

Топливо для
исследовательских
реакторов

Перспектива

Новые конструкции ТВС,
материалы, композиции
топлива, поглотители

Гибкие и эффективные
топливные циклы

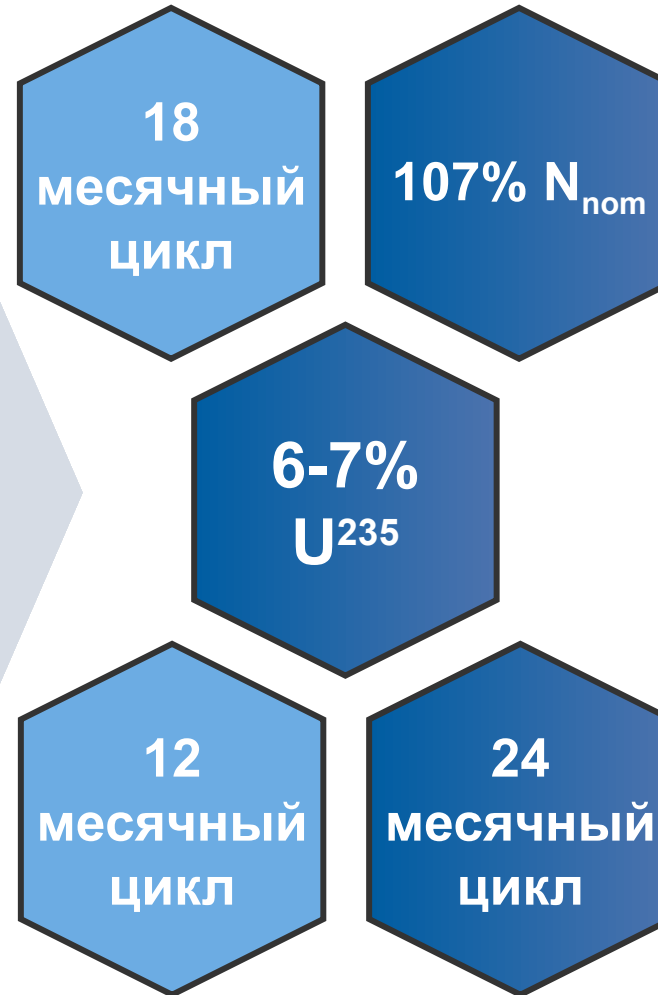
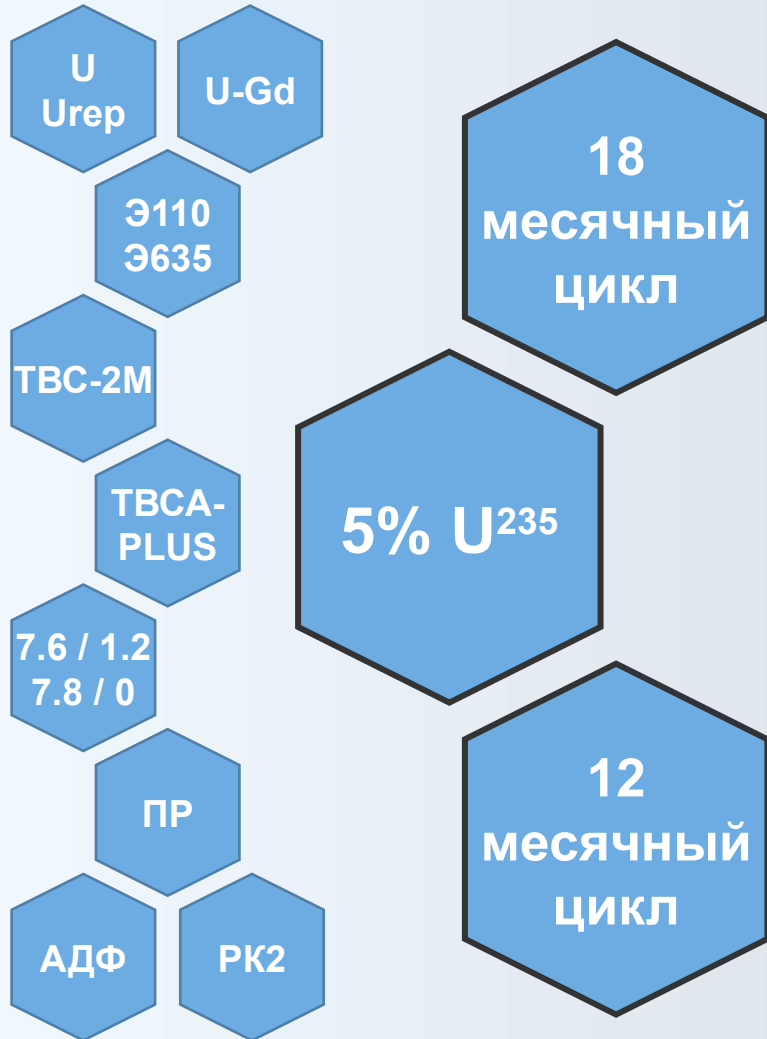
Расширение сырьевой
базы и замыкание
топливного цикла

Адаптация производства,
Эффективный инжиниринг
под заказчика

Направления развития ядерного топлива для ВВЭР

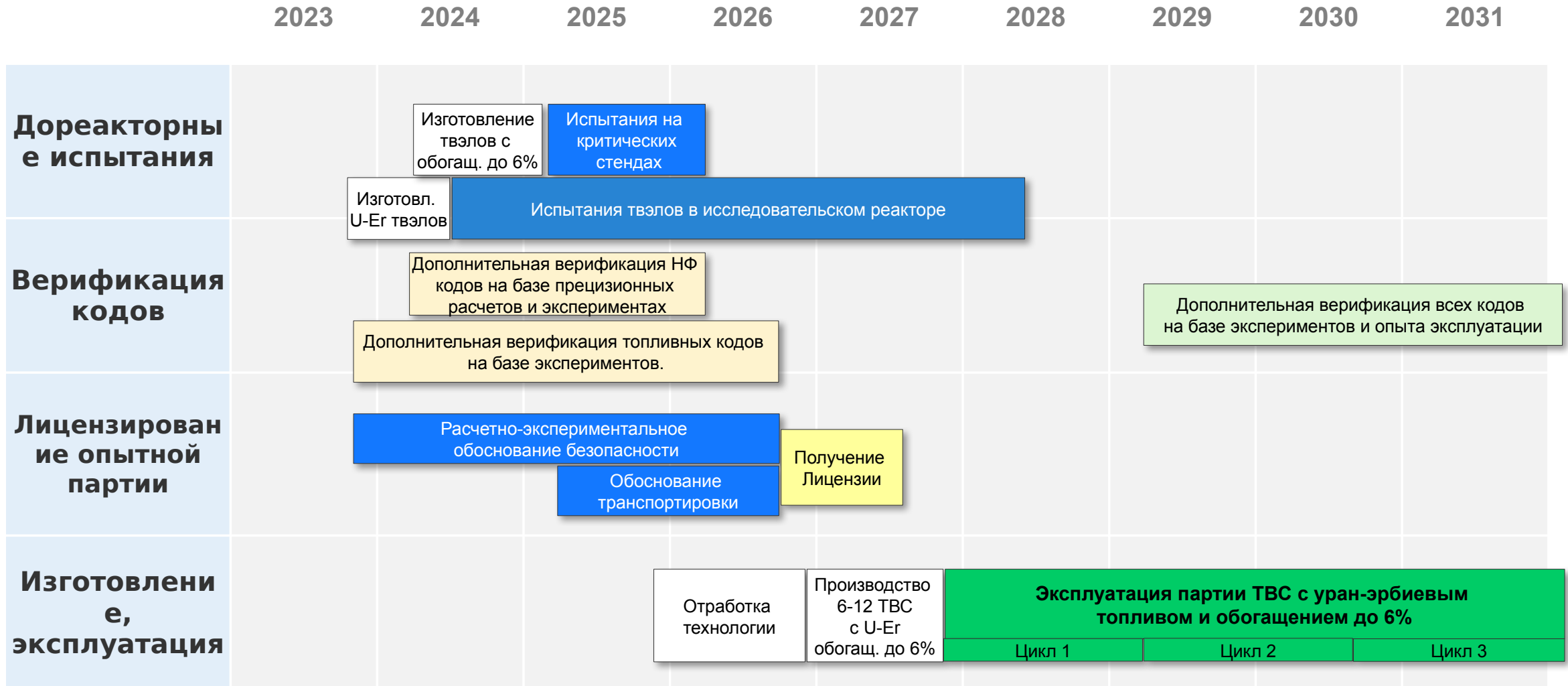


TVEL
ROSATOM



Топливные циклы с ТПО и Эрбием

Программа реферирования



Развитие циркониевого сплава Э110М для оболочек ТВЭЛОВ

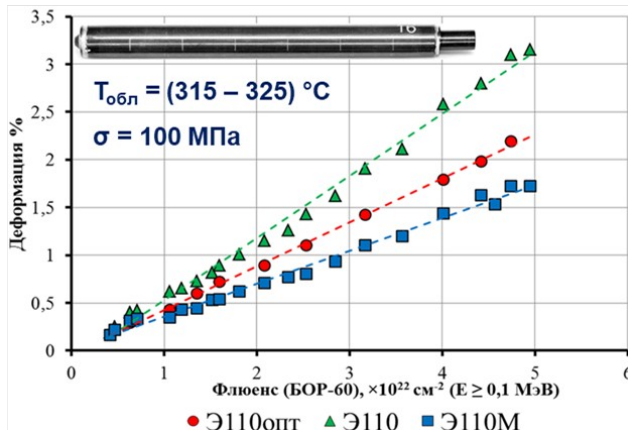
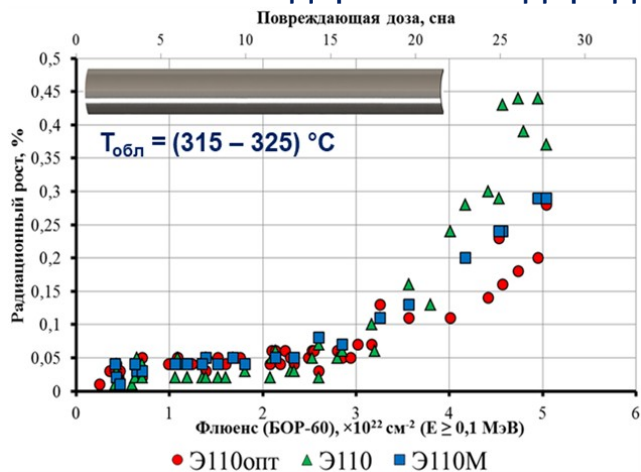
ТВЭЛОВ



TVEL
ROSATOM

По результатам реакторных испытаний в БОР-60 и ПРИ показано, что оболочки твэлов из сплава Э110М в сравнении с оболочками из сплава Э110опт и Э110 имеют:

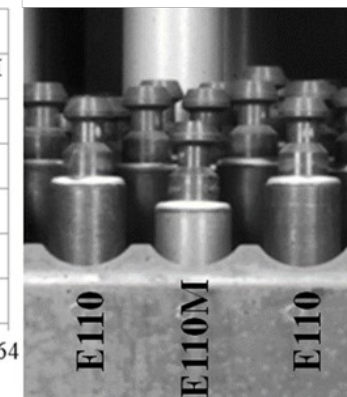
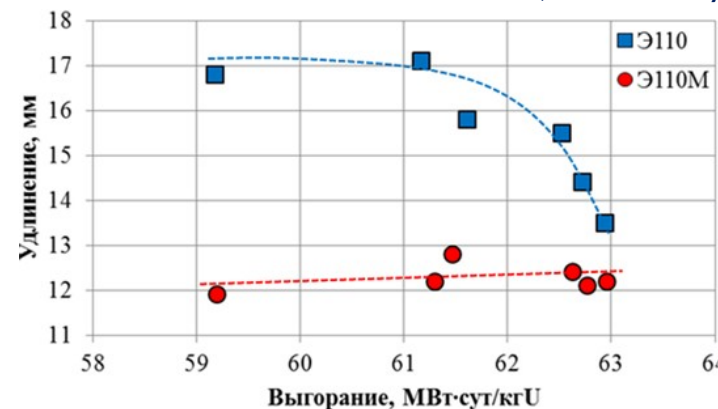
- более высокую прочность;
- повышенное сопротивление радиационному формоизменению;
- меньшее содержание водорода при одном уровне окисления.



На Балаковской АЭС выполнена ОПЭ ТВС-2М с твэлами с оболочками из Э110М. Показано:

- деформация ползучести после контакта оболочки с топливом: Э110М – 0,009 мм (в Э110 – 0,03 мм);
- среднее удлинение оболочек твэлов: Э110М – 12,3 мм, (Э110 – 15,5 мм).

ТВС-2М № 485408750: $B_{th} = 59,73 \text{ МВт} \cdot \text{сут/кгU}$ (1462 эфф. сут.)



Использование сплава Э110М в качестве материала оболочки твэла может увеличить температуру гидроиспытаний РУ ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 до 295 °С.

2024

2025

2026

2027

2028

2029

2030

Э110М

(из «губки»,
модифицирован по
содержанию
Fe (750 - 1350) ppm;
O₂ (1000 - 1400) ppm.

Разработка ТП и лицензирование

Постановка на производство



Поставки на 5 «старых» блоков ВВЭР-1000

Развитие циркониевого сплава Э635 для НК



TVEL
ROSATOM

С 2022 года выполняется работа по модификации состава сплава Э635 для снижения наводороживания труб НК при эксплуатации.

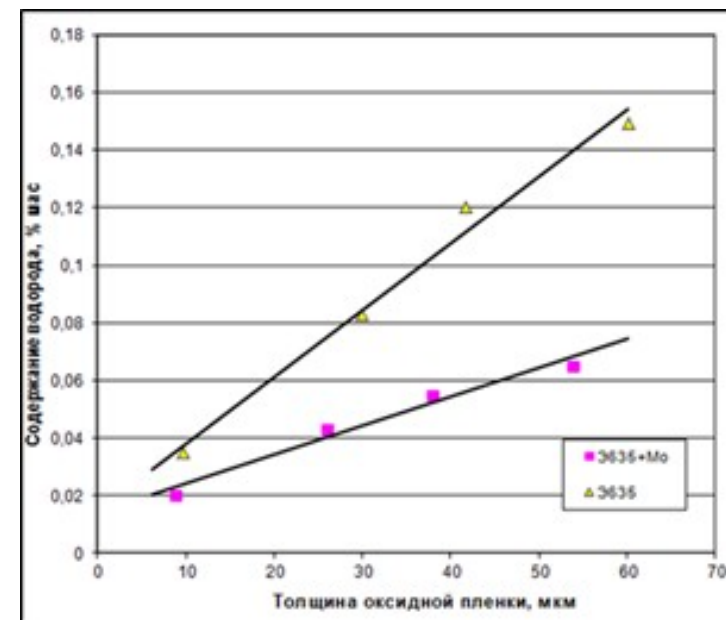
Рассматривается 9 вариантов состава сплава Э635 с

дополнительным легированием (Мо или V). На конец 2023:

- разработана технология выплавки слитков (массой 60 кг);
- разработана технология и изготовлены трубы НК Ø12,9×10,9 мм;
- поставлено ОУ в МИР.М1 с образцами труб НК (9 вариантов).

В 2026 планируется завершить облучение (флюенс быстрых нейтронов $\approx 0,7 \times 10^{21}$ н/см²) и комплекс ПРИ, провести коррозионные, материаловедческие испытания, определить механические свойства и содержание водорода. По результатам будет определен состав модифицированного сплава Э635 для НК с оптимальными свойствами.

По имеющимся данным легирование Мо сплава Э635, значительно снижает наводороживание труб НК.



2024

2025

2026

2027

2028

2029

2030

Э635 с Мо

(рассматриваются 9 вариантов состава сплава Э635 с дополнительным легированием Мо или V).

Дореакторные и реакторные испытания

Разработка ТП и лицензирование

Постановка на производство

Выбор состава сплава ▲

▲ Начало ОПЭ

Топливо для реакторов ВВЭР-440

Состояние и перспективы развития

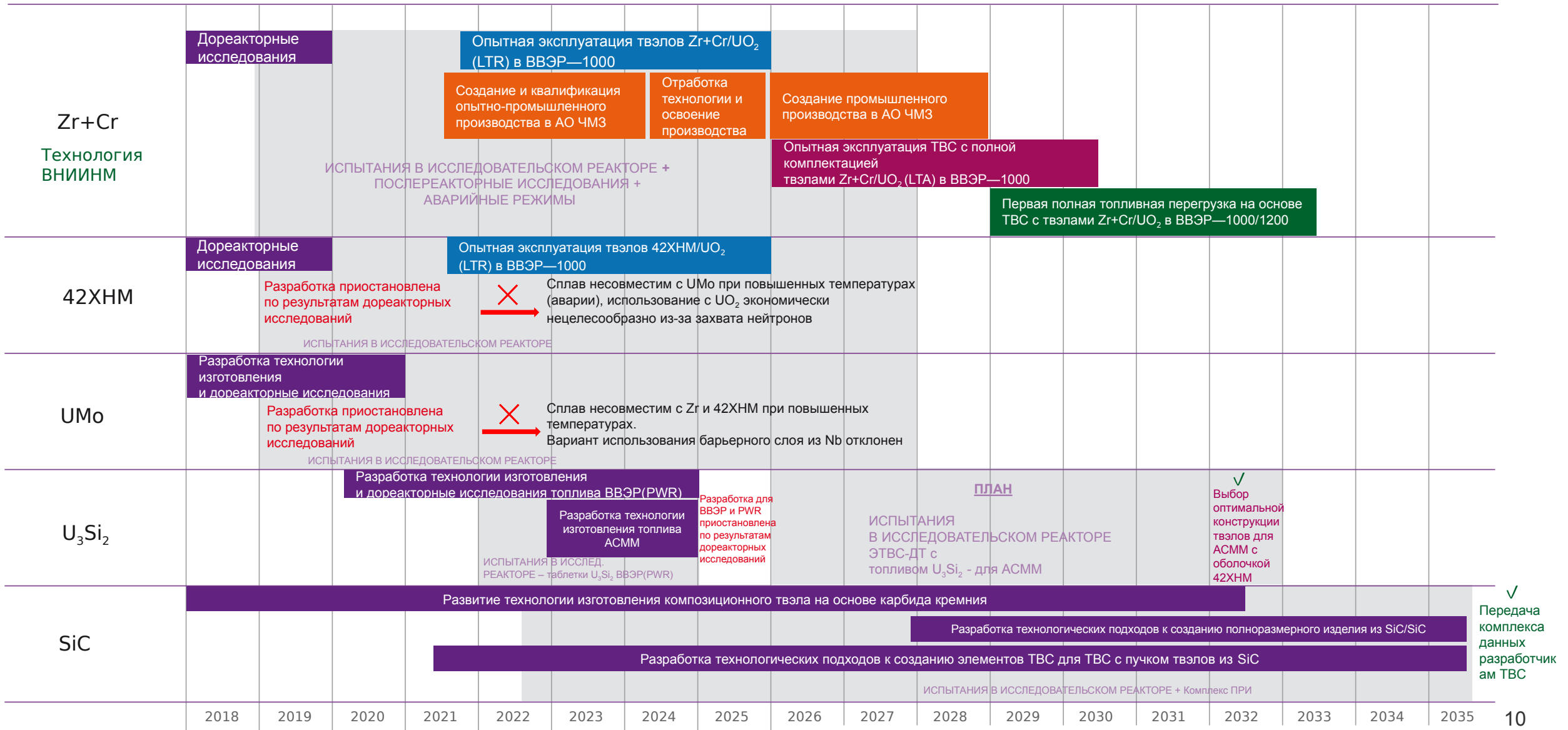


№ п/п	Вид топлива	Страна	АЭС	Начало эксплуатации	Состояние	Перспективы развития
1	РК-3	Россия	Кольская АЭС	2010	ОПЭ завершена. Расширение не планируется	Нет. После 2033 вывод из эксплуатации
2	РТ			2028	Расширение отменено	
3	ОВО (Ø твэла 8,9 мм)	Венгрия	АЭС «Пакш»	2020	Плановое внедрение	Локализация
4		Финляндия	АЭС «Ловииза»	2022		
5	РКЗ+	Чехия	АЭС «Дукованы»	2023	Первая партия загружена в реактор	Локализация, Э110М, Cr-покрытие
6	Топливо 4.7, в том числе РС, РС-Э	Словакия	АЭС «Моховце»	2023	Первая партия загружена в реактор блока 1.	Локализация, РКЗ+
7			АЭС «Богунце»	2024	Планируется п.	
8	ОВО (Ø твэла 8,9 мм)	Армения	Армянская АЭС	-	Направлено ТЭО	Маловероятны

Дорожная карта создания и внедрения новых конструкционных и топливных материалов типа ATF для ВВЭР и PWR



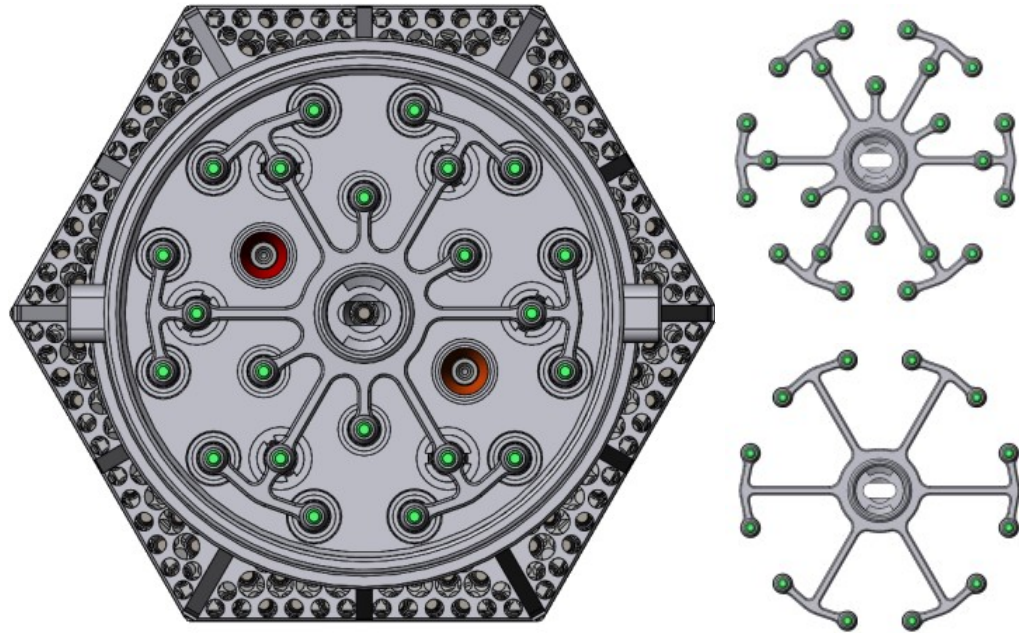
TVEL
ROSATOM



✓
Передача комплекса данных разработчикам ТВС

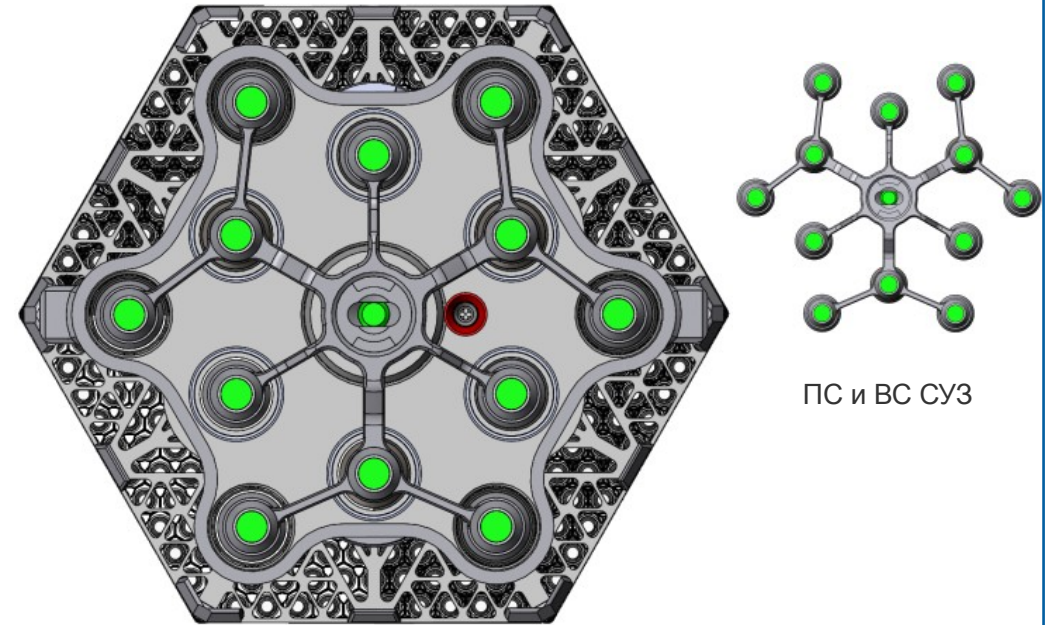
Особенности активной зоны ВВЭР-600

ВВЭР-600



Параметр	Значение
Количество ПС СУЗ, шт	121
Количество направляющих каналов, шт	22
Количество инструментальных каналов, шт	2
Шаг решетки, мм	12,75
Количество ТВЭЛОВ, шт	307
Количество ПЭЛ в ПС СУЗ, шт	22 / 12
Диаметр ТВЭЛОВ, мм	9,1

ВВЭР-С-600



Параметр	Значение
Количество ПС СУЗ / ВС СУЗ, шт	43 / 78
Количество направляющих каналов, шт	13
Количество инструментальных каналов, шт	1
Шаг решетки, мм	11,64
Количество ТВЭЛОВ, шт	305
Диаметр ТВЭЛОВ, мм	9,1
Диаметр каналов, мм	30
Диаметр ПЭЛ и ВЭЛ, мм	25

Концепция замкнутого цикла



TVEL
ROSATOM



* 100% готовность к поставкам
** без необходимости создания геологического могильника



Направления совершенствования топливных циклов ВВЭР



Пути применения регенерированного урана на ВВЭР-1000/1200 в 18-месячном ТЦ



TVEL
ROSATOM



Топливные циклы на основе регенерированного урана на примере ВВЭР-1000/1200



TVEL
ROSATOM

Регенерат урана <5%
72/78 ТВС
Таблетка 7,6/1,2 мм

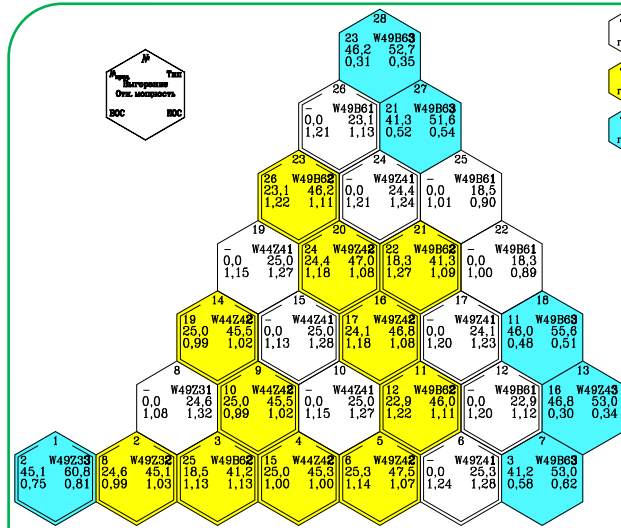
Плюсы:
- До 5%
- Сохранение конструкции

Минусы:
- Флюенс
- Экономика
- Больше ОЯТ

Регенерат урана <5%
66/72 ТВС Таблетка 7,8/0 мм

Плюсы:
- До 5%
- Сохранение параметров цикла

Минусы:
- Экономика
- Конструкция топлива



Природный уран (РС)
Таблетка 7,6/1,2 мм
66 ТВС

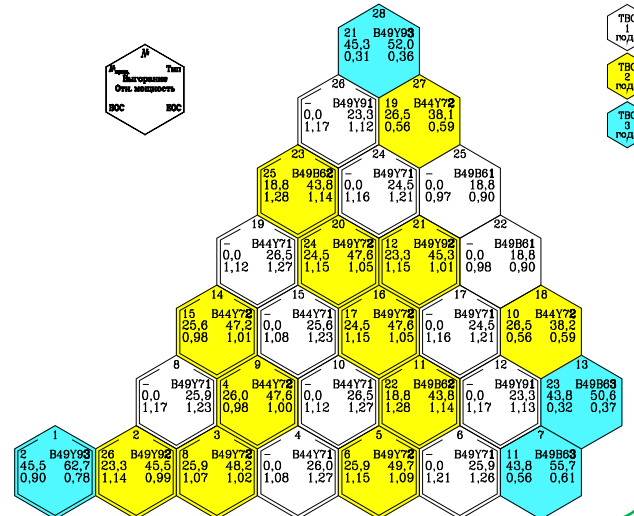
4,8 % U235
505 эфф.сут.

Bu_{av} 49,5
МВт*сут/кг
 Bu_{max} 55,6
МВт*сут/кг

Природный уран (РС)
72 ТВС
Таблетка 7,6/1,2 мм

4,7 % U235
500 эфф.сут.

Bu_{av} 47,6
МВт*сут/кг
 Bu_{max} 55,7
МВт*сут/кг



Регенерат урана 5,3%
66/72 ТВС
Таблетка 7,6/1,2 мм

Плюсы:
- Сохранение параметров цикла и конструкции топлива

Минусы:
- Свыше 5%

Регенерат урана + УЭТПО
<6% (~5,6 %) 60/66 ТВС
Таблетка 7,6/1,2 мм

Плюсы:
- Флюенс
- Экономика
- Меньше ОЯТ
- Запасы до ограничений

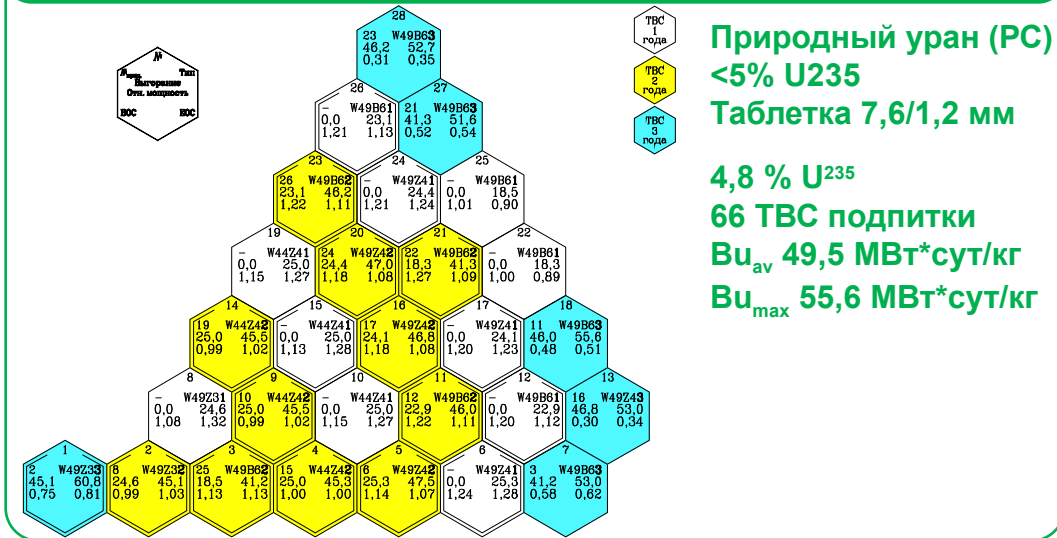
Минусы:
- Свыше 5%

Внедрение компоновки In-Out на примере ВВЭР-1000



TVEL
ROSATOM

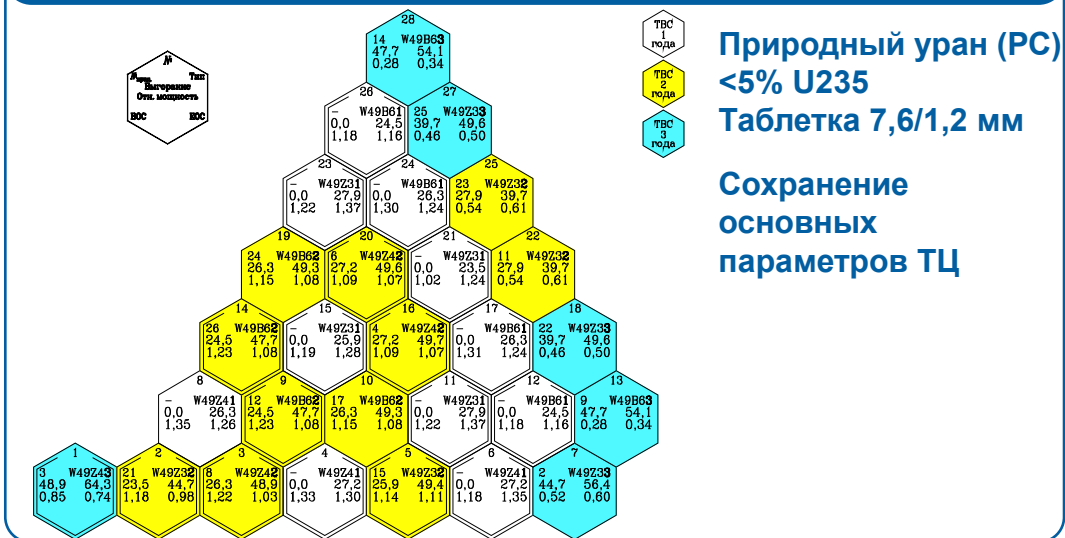
Реализованный ТЦ



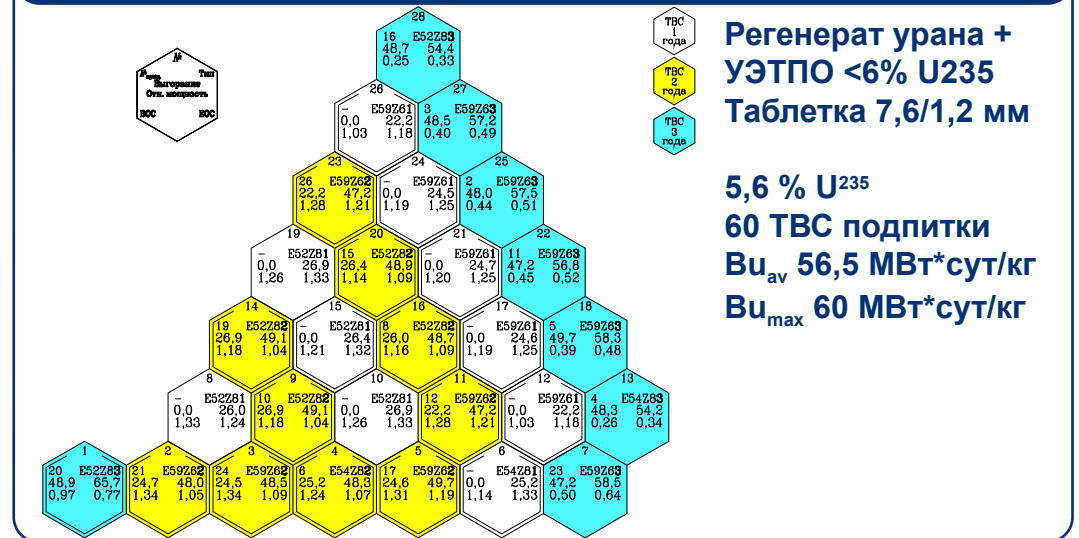
Компоновка in-out на основе топлива >5% U²³⁵



Компоновка in-out на основе топлива <5% U²³⁵



Компоновка in-out на основе регенерированного урана >5% U²³⁵



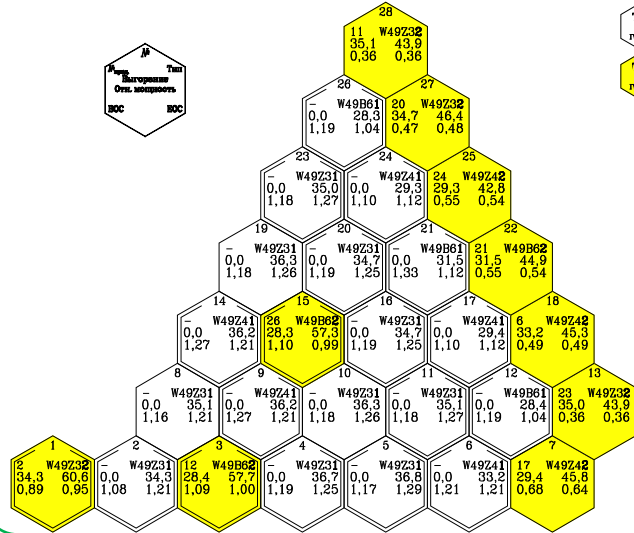
Переход к 24-месячному топливному циклу реактора ВВЭР-1000



TVEL
ROSATOM

Возможен при использовании следующих компоновок активной зоны

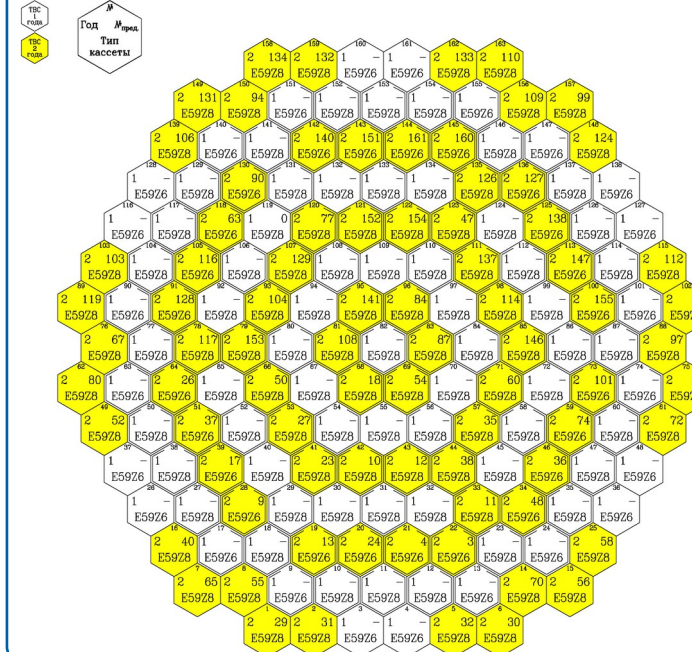
Природный уран (РС)



Обогащение до 5%
в качестве
выгорающего
поглотителя
выступает оксид
гадолия в ТВЭгах

108 ТВС подпитки
среднее обогащение
4,85%

УЭТП, с обогащением до 6,0%

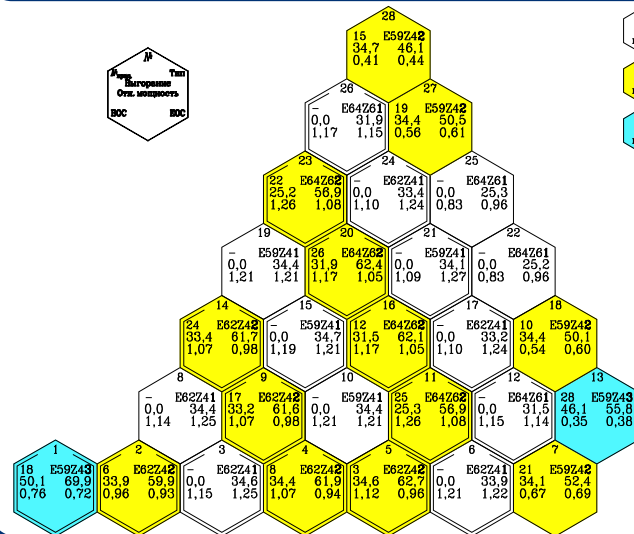


В качестве
выгорающего
выступает оксид
эргия, равномерно
распределенный по
ТВЭлам и оксид
гадолия в ТВЭгах

81/82 ТВС подпитки
среднее обогащение
5,87%

Схема перестановок
с симметрией 120°

УЭТП, с обогащением до 6,5%



В качестве
выгорающего
выступает оксид
эргия, равномерно
распределенный по
ТВЭлам и оксид
гадолия в ТВЭгах

78 ТВС подпитки
среднее обогащение
6,09%

Основные показатели 24-месячных циклов

№	Количество свежих ТВС	Длительность, эфф.сут.	Среднее обогащение по U5, %	Bu av МВт*сут/кг	Bu max, МВт*сут/кг	Расход природного урана, г/МВт*сут	Расход ТВС, 10 ³ шт/МВт*сут	Удельное количество во РР, ЕРР/МВт*сут
1	108	670,6	4,85	42	62,2	0,217	4,88	0,202
2	78	671	6,09	58,3	62,7	0,198	2,54	0,196
3	82/81	672,1/666,7	5,87	55,5	62,0	0,200	2,79	0,196

Направления совершенствования нейтронно-физических кодов



TVEL
ROSATOM



**Спасибо за
внимание!**

