

Требования к топливным циклам ВВЭР /Россия, тендерные запросы инозаказчиков /

- Длительность работы между перегрузками в течение 12/18/24 месяцев при коэффициенте готовности не менее 0,9
- Обеспечение необходимых для эксплуатации изменений длительности кампании реактора за счет
 - изменения количества и обогащения загружаемых ТВС,
 - работы на мощностном эффекте реактивности до 60 эфф.сут. преждевременного останова за 30 эфф.сут.
- Максимальное среднее по ТВС выгорание топлива - 60 МВт*сут/кгU,
 - в перспективе - 70 МВт*сут/кгU
- Обеспечение отрицательности внутренних ядерных обратных связей по температуре и мощности реактора
- Использование топливных загрузок с низкой утечкой нейтронов
- Маневренность энергоблока (режимы регулирования частоты и суточного регулирования)

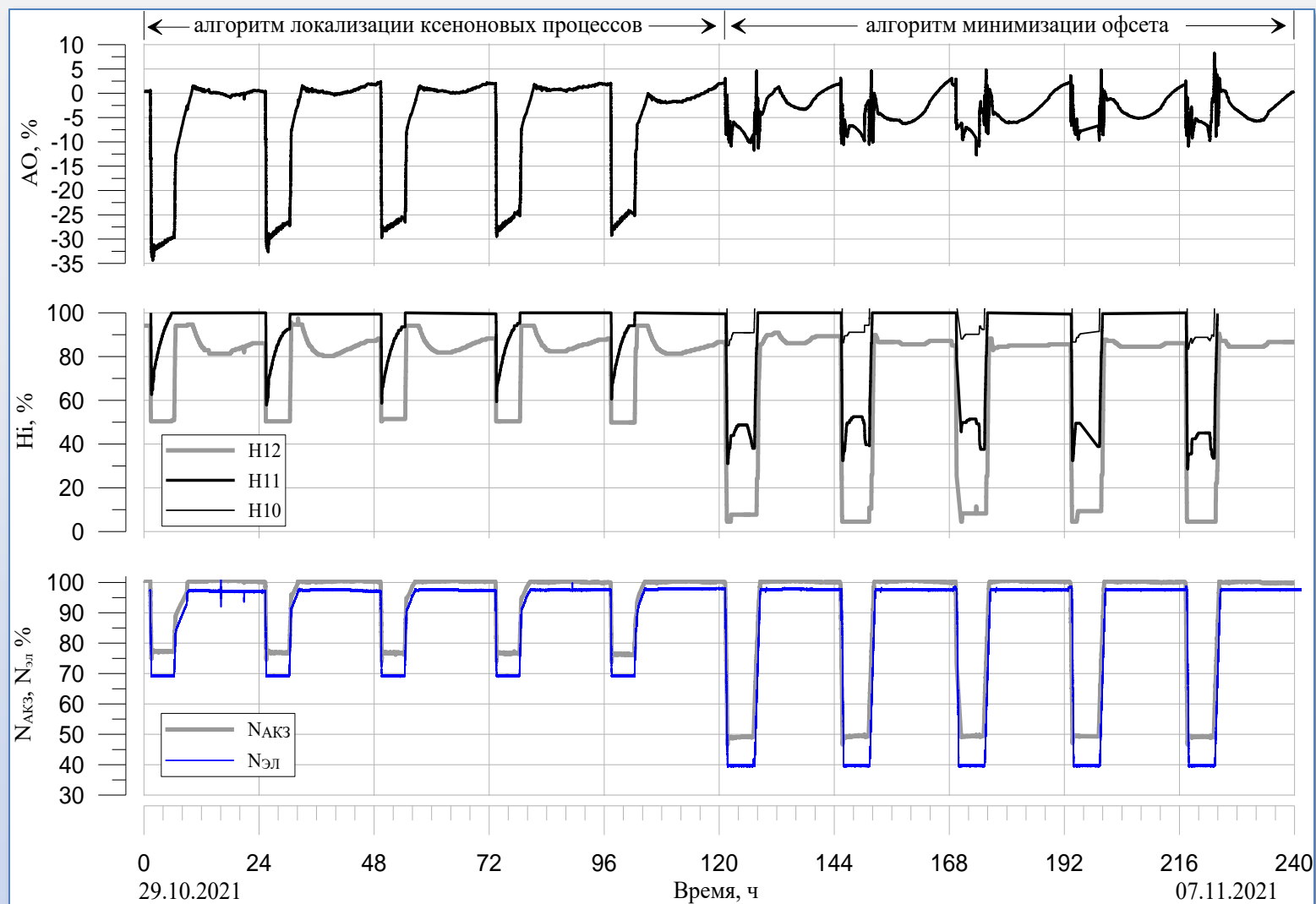
В соответствии с EUROPEAN UTILITY REQUIREMENTS FOR LWR NUCLEAR POWER PLANTS эти требования распространяются на энергоблоки с урановым и МОКС топливом



Современные топливные циклы ВВЭР

- На всех российских энергоблоках ВВЭР-1000 внедрен 18-месячный цикл с длительностью кампании около 500 эфф. сут. на повышенной мощности, равной 104% номинальной.
- На зарубежных блоках ВВЭР-1000 реализованы 12- и 18-месячные циклы на номинальной или повышенной мощности.
- Энергоблоки ВВЭР-1200 в России пущены в эксплуатацию в 12-месячном цикле. Энергоблок № 1 НВАЭС-2 работает во второй переходной загрузке 18-месячного цикла. Планируется перевод остальных блоков (ЛАЭС-2 бл.1, 2 и НВАЭС-2 бл.2) в 18-месячный цикл
- В зарубежных проектах ВВЭР-1200 18-месячный цикл будет реализован, начиная с третьей топливной загрузки
- В перспективе запланировано
 - ✓ повышение мощности энергоблоков,
 - ✓ реализация компоновок активной зоны, обеспечивающих дальнейшее снижение потоков нейтронов на корпус и выгородку реактора,
 - ✓ использование 24-месячных топливных циклов,
 - ✓ внедрение регенерированного уранового и уран-плутониевого топлива,
 - ✓ применение толерантного топлива,
 - ✓ внедрение режима суточного маневрирования

Испытание на ЛАЭС-2, энергоблок 1 (конец 3 кампании, 2021 г)



24- месячные топливные циклы ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200

По заказу АО «Концерн Росэнергоатом» НИЦ «Курчатовский институт» выполнял расчёты и подготавливал исходные данные для технико-экономических исследований возможности перехода ВВЭР-1000/1200 на эксплуатацию в 24-х месячном цикле.

В процессе формирования 24 месячных топливных циклов использовались следующие допущения и ограничения:

- рассматривался режим стационарных перегрузок;
- длительность кампании ~ 670 эфф. сут при расчете на тепловую мощность 3120 МВт для ВВЭР-1000 и 3200 МВт для ВВЭР-1200;
- максимальное обогащение топлива по урану-235 не более 7,0 %;
- количество твэгов в ТВС не более 30 штук, содержание оксида гадолиния не превышает 10%;
- максимальное содержание оксида эрбия в твэлах не более 1,4 %, оксид эрбия содержится во всех топливных элементах с обогащением выше 5,0 %;
- допустимое расчетное среднее по твэлу, твэгу и твэлу с оксидом эрбия выгорание топлива не превосходит 72 МВт·сут/кг U;
- при анализе рамочных значений, точность расчета нейтронно-физических характеристик и коэффициенты запаса принимаются в соответствии с существующими проектными материалами.

24- месячные топливные циклы. Постановка задачи и исходные данные

Рассматривались следующие варианты 24-месячных топливных циклов:

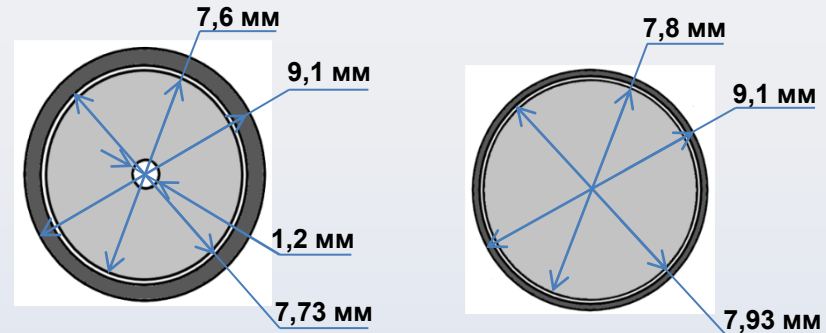
ВВЭР-1000 с ТВС-2М;

ВВЭР-1200 с ТВС типа ТВС-2М;

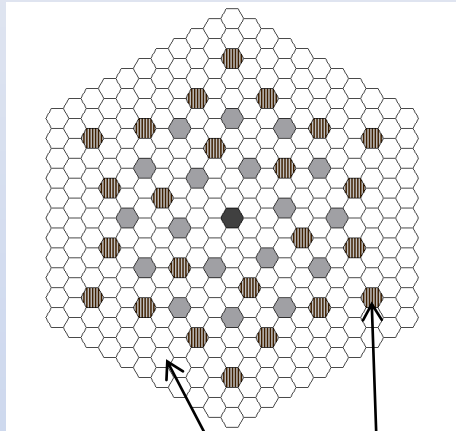
ВВЭР-1000 с ТВС-4;

ВВЭР-1200 с ТВС типа ТВС-4.

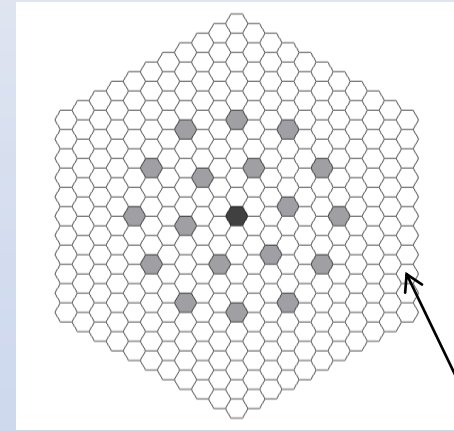
Основное отличие ТВС-4 от ТВС-2М заключается в применении ураноемкой топливной таблетки с внешним диаметром 7,8 мм без центрального отверстия. Масса урана в ТВС-4 на 8% больше, чем в ТВС-2М



Для всех вариантов 24-месячных топливных циклов рассматривались следующие топливные композиции:

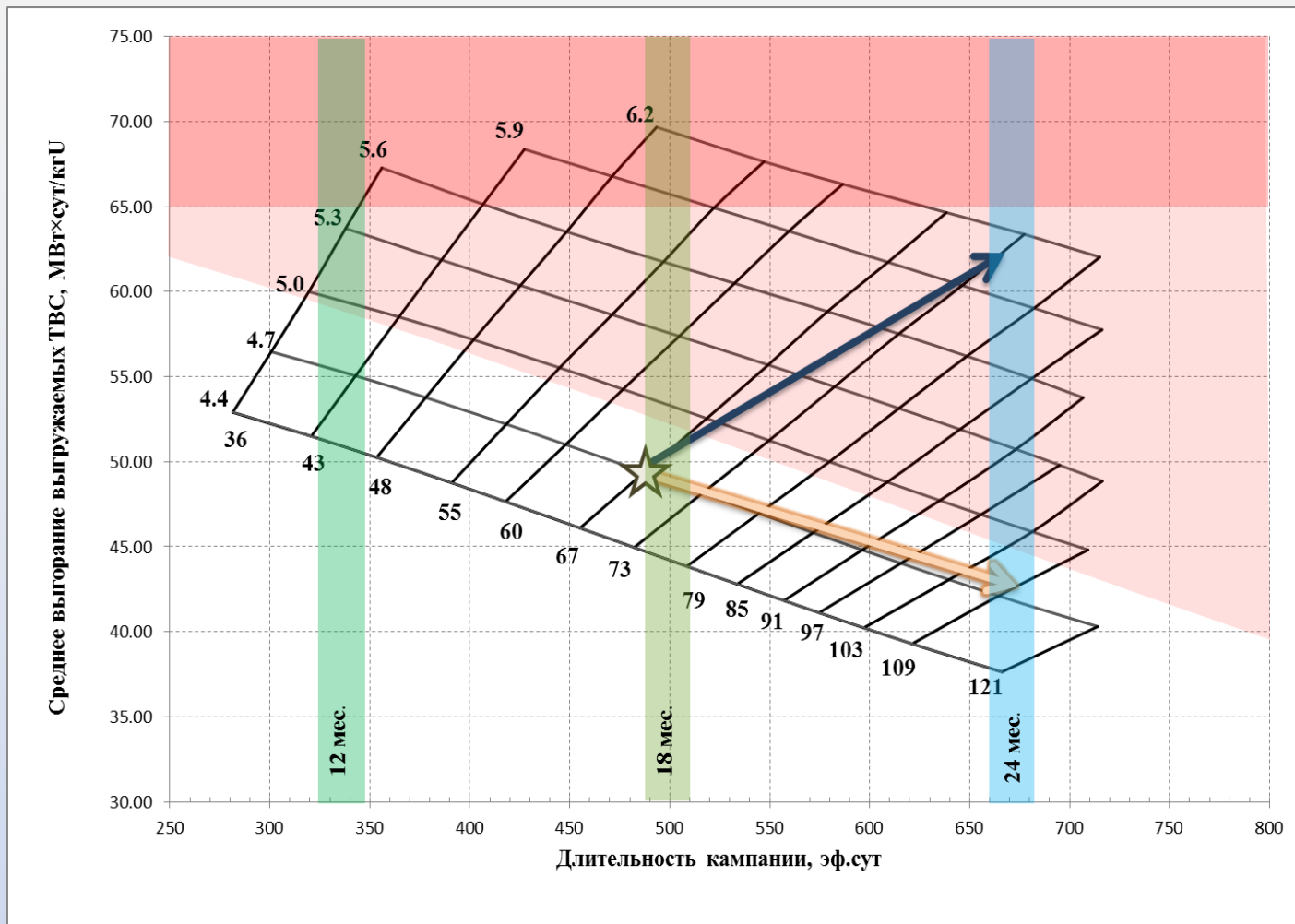


урановое топливо с обогащением менее 5 % с уран-гадолиниевыми выгорающими поглотителями



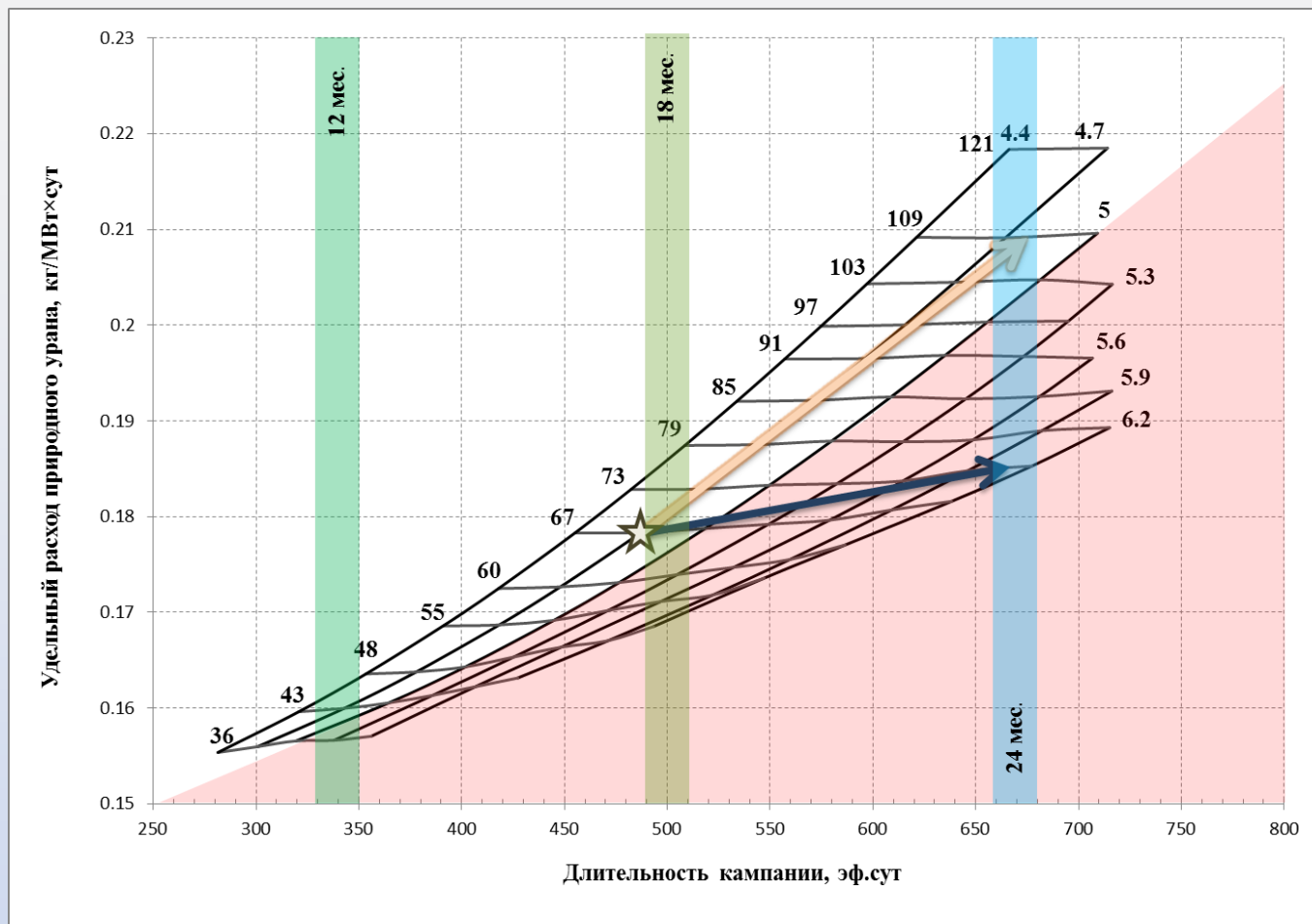
уран-эрбиевое топливо с обогащением более 5 %

Анализ способов увеличения длительности кампании (1)



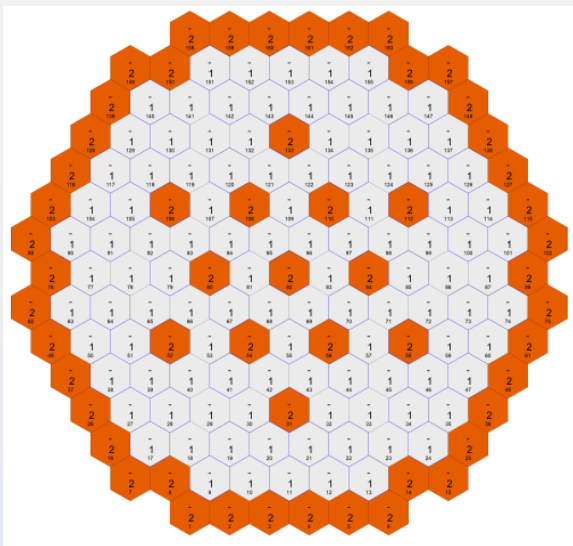
Зависимость среднего выгорания выгружаемых ТВС-2М от длительности кампании при различном количестве загружаемых ТВС и их среднем обогащении для реактора ВВЭР-1000, работающего на 104 % мощности от номинальной.

Анализ способов увеличения длительности кампании (2)

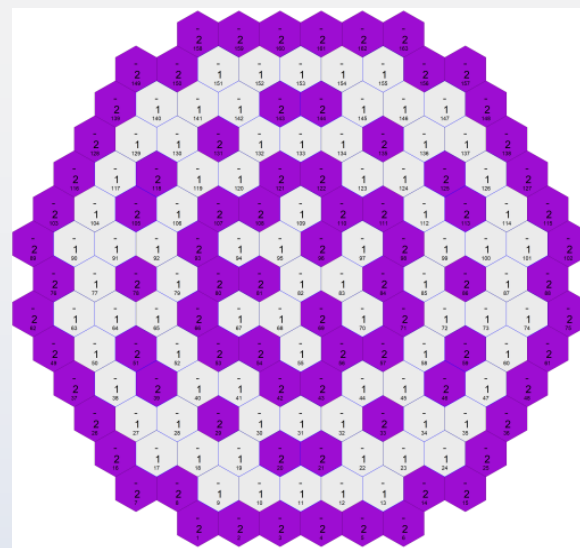


Зависимость удельного расхода природного урана от длительности кампании при различном количестве загружаемых ТВС-2М и их среднем обогащении для реактора ВВЭР-1000, работающего на 104 % мощности от номинальной.

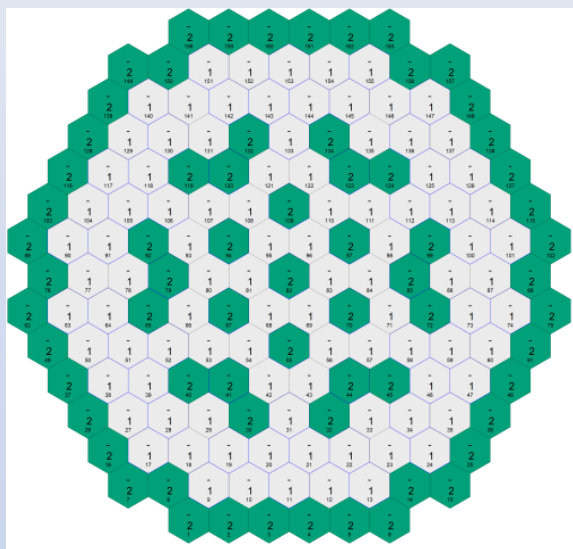
ВВЭР-1000. Примеры картограмм 24-месячных топливных загрузок



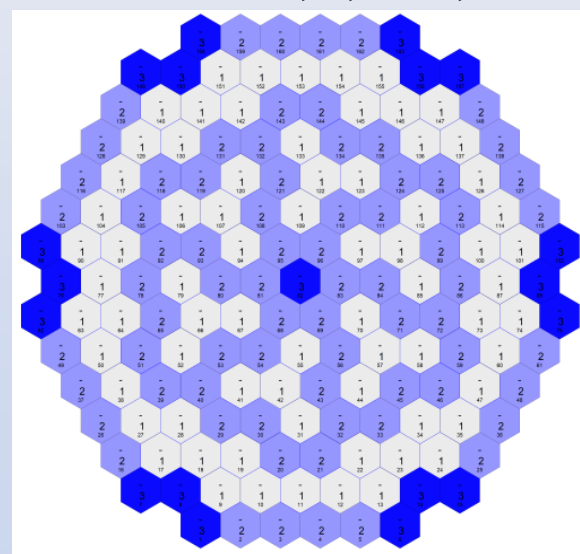
108 TBC-2M, 4,8 %, Gd



82 TBC-2M, 5,81 %, Er

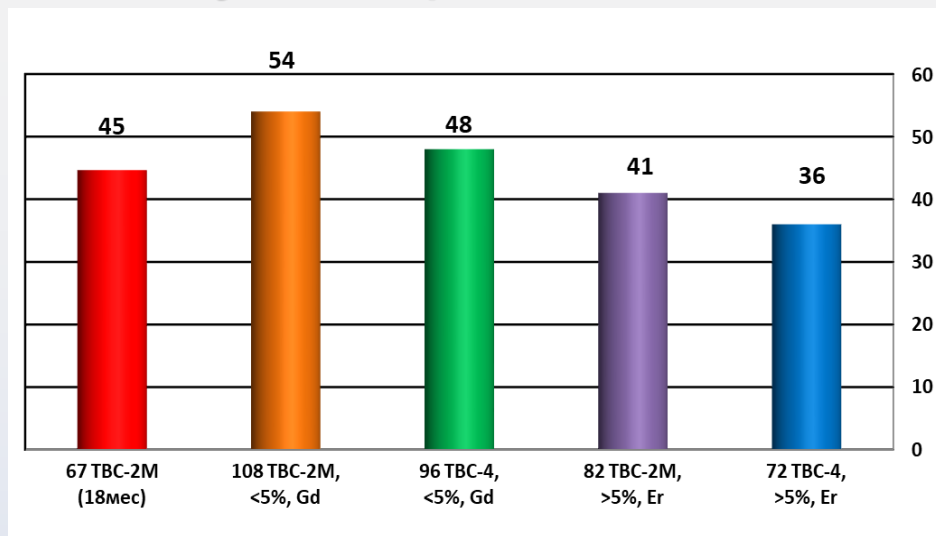


96 TBC-4, 4,85%, Gd

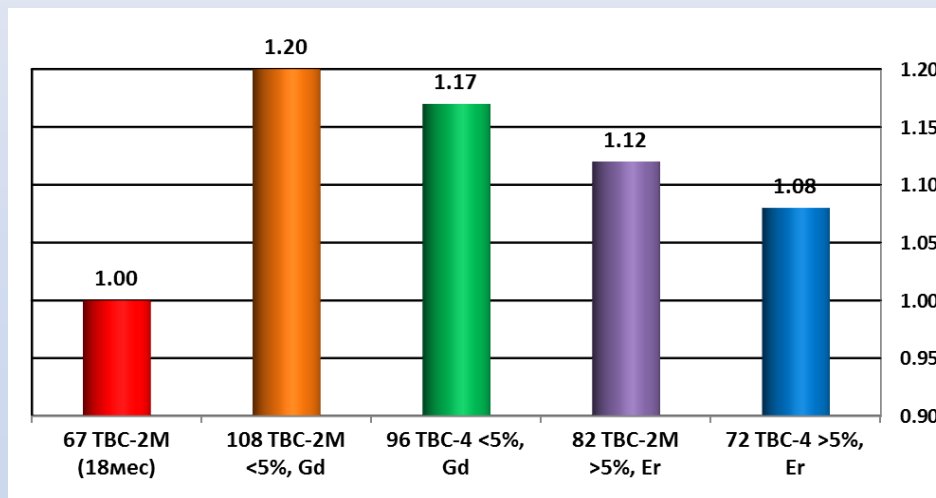


72 TBC-4, 6,0 %, Er

ВВЭР-1000. Результаты расчёта 24- месячных циклов (1)



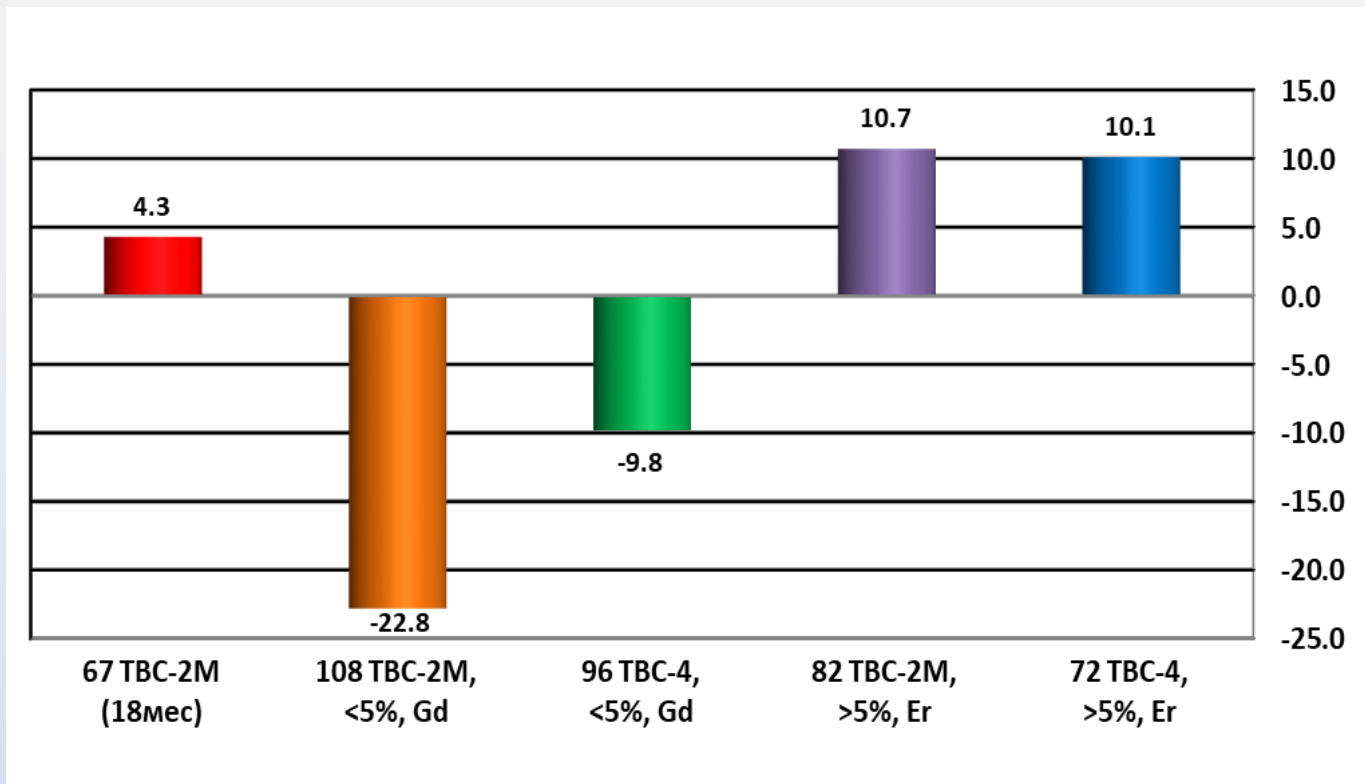
Количество перегружаемых ТВС, приведённое к одному календарному году



Удельный расход природного урана, отн. ед.



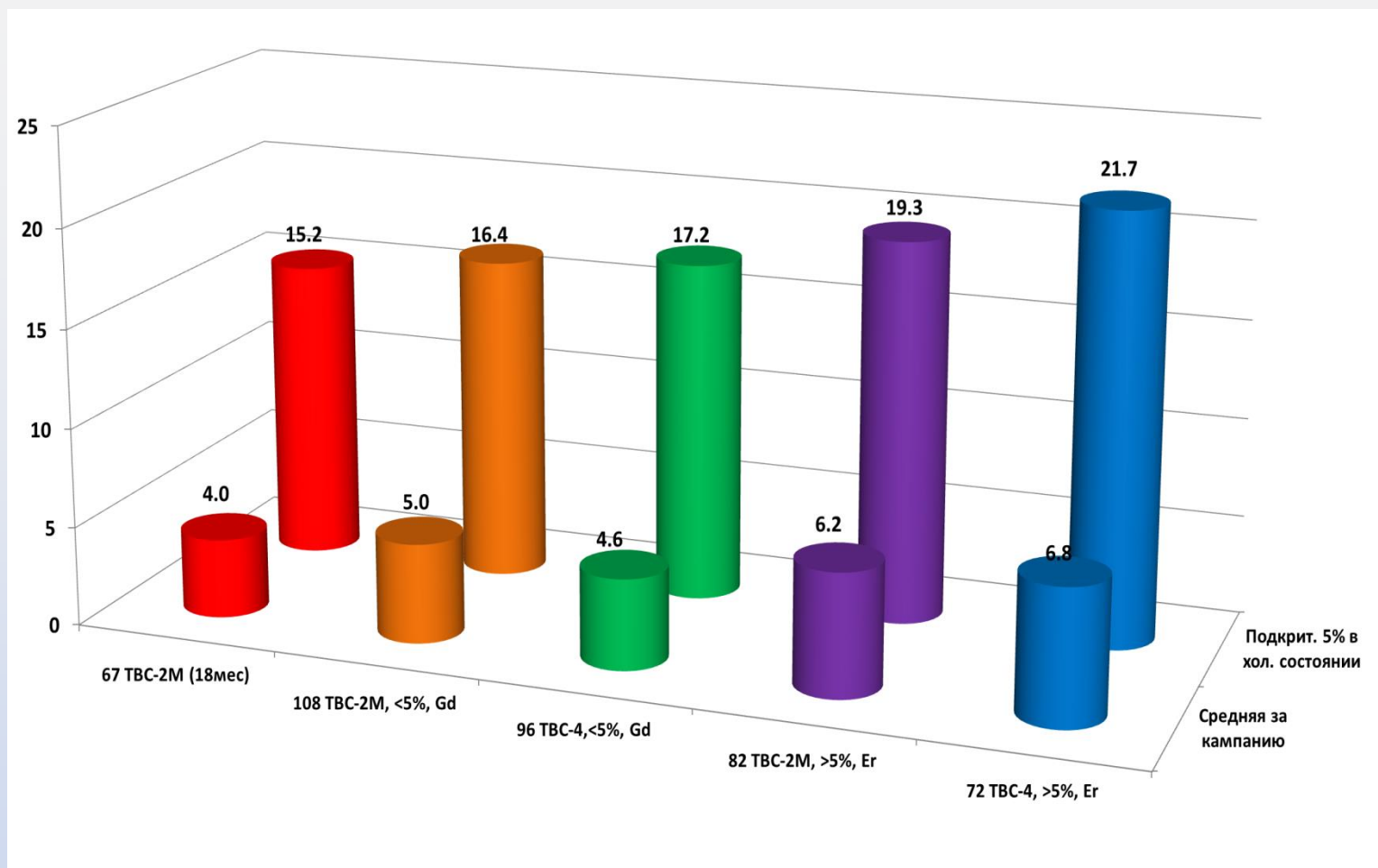
ВВЭР-1000. Результаты расчёта 24- месячных циклов (2)



Минимальный запас линейной мощности твэла (с учетом неопределенности расчета) до лимитной кривой по высоте активной зоны, %

Для варианта 108 ТВС-2М минимальный запас линейной мощности твэла может быть увеличен до 1 % путем профилирования содержания оксида гадолиния по высоте и радиусу ТВС, а также управления аксиальным офсетом энерговыделения с помощью рабочей группы ОР СУЗ.

ВВЭР-1000. Результаты расчёта 24- месячных циклов (3)



Концентрация борной кислоты в теплоносителе, г/кг

Топливный цикл 24 месяца. Выводы ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200

Большинство НФХ находятся в пределах рамочных параметров, использованных при обосновании безопасности проектных 18-месячных циклов.

Расход природного урана увеличивается на 6 – 21 %, минимальное увеличение при использовании топлива с обогащением более 5 %

Количество ежегодно перегружаемых ТВС увеличивается на 7 – 26 % при обогащении менее 5 % и уменьшается на 8 – 25 % при обогащении более 5 %.

Среднее выгорание топлива снижается до 39 - 44 МВт*сут/кг при обогащении менее 5 % и возрастает до 55 - 60 МВт*сут/кг при обогащении более 5 %.

При использовании только гадолиниевых поглотителей наблюдается существенный рост неравномерности энерговыделения. В случае уран-эрбиевого топлива повышенного обогащения наблюдается рост концентрации борной кислоты в теплоносителе (значение стояночной концентрации достигает 24 г/кг). Поэтому целесообразно использовать уран-эрбиевое топливо в комбинации с уран-гадолиниевыми твэгами.

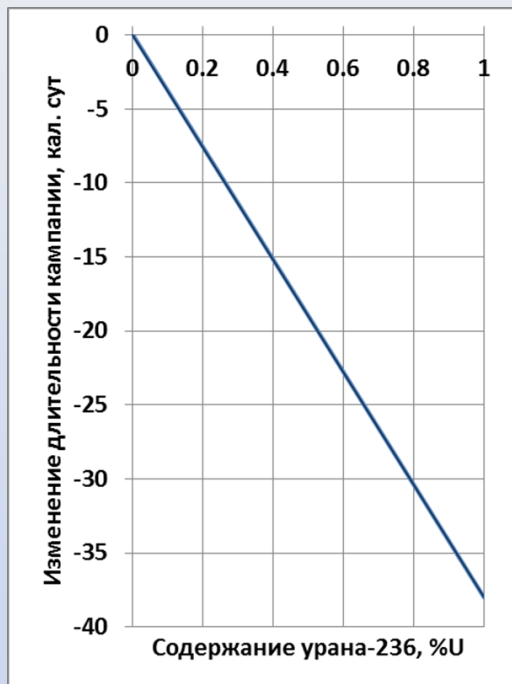
Ядерная безопасность систем обращения с топливом на АЭС обеспечивается во всех рассмотренных вариантах

Суммарная активность продуктов коррозии на оборудовании первого контура изменяется на ± 30 %, максимальная активность наблюдается в вариантах с минимальным количеством перегружаемых ТВС.

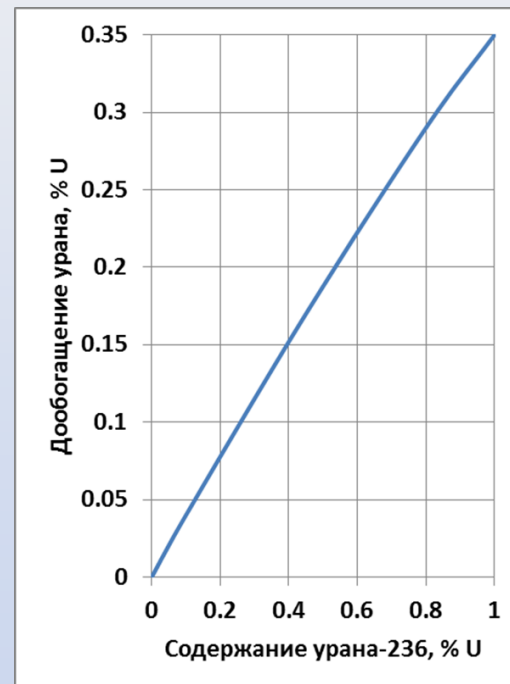
Топливные циклы ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 с регенератором урана

Регенерированное урановое топливо (РУТ) содержит регенерированный уран, выделяемый при переработке ОЯТ. При изготовлении РУТ в зависимости от исходного изотопного состава регенерированный уран может обогащаться, смешиваться с высокообогащенным природным ураном или регенерированным ураном другого изотопного состава.

Особенностью топлива из регенерата урана является наличие в нем изотопов урана-232 и урана-236. Для сохранения длительности топливных циклов с топливом из регенерата урана необходимо компенсировать только наличие поглощающего нейтроны изотопа уран-236 дополнительным обогащением по урану-235.



Изменения длительности кампании при увеличении содержания урана-236 в топливе

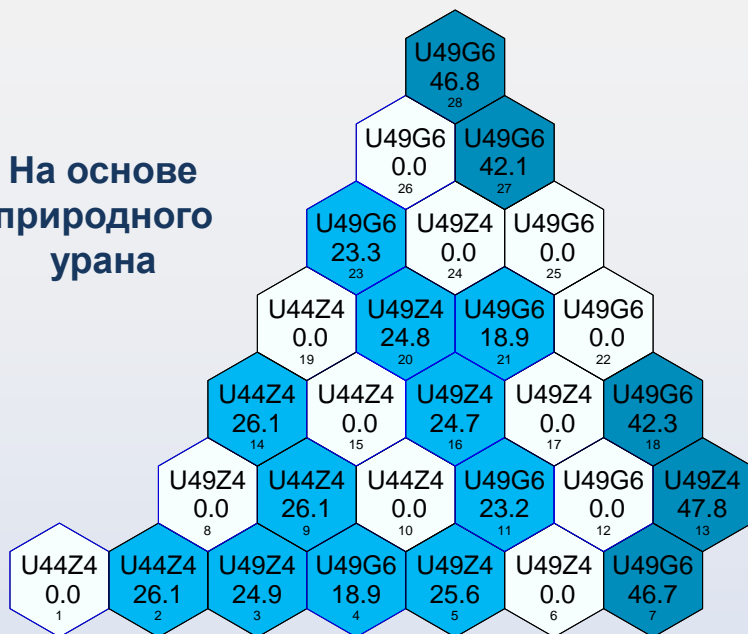


Дообогащение урана, обеспечивающее сохранение длительности кампании

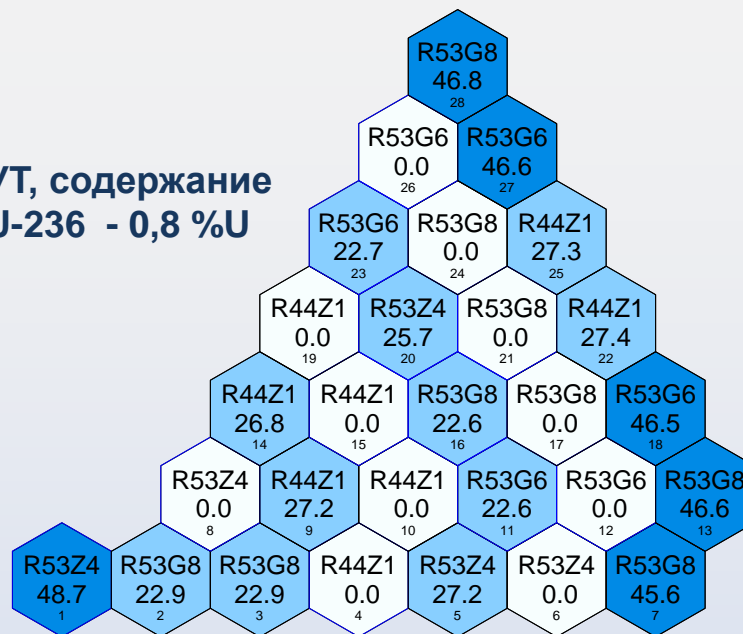


18-месячный топливный цикл ВВЭР-1000 (104%)

На основе
природного
урана



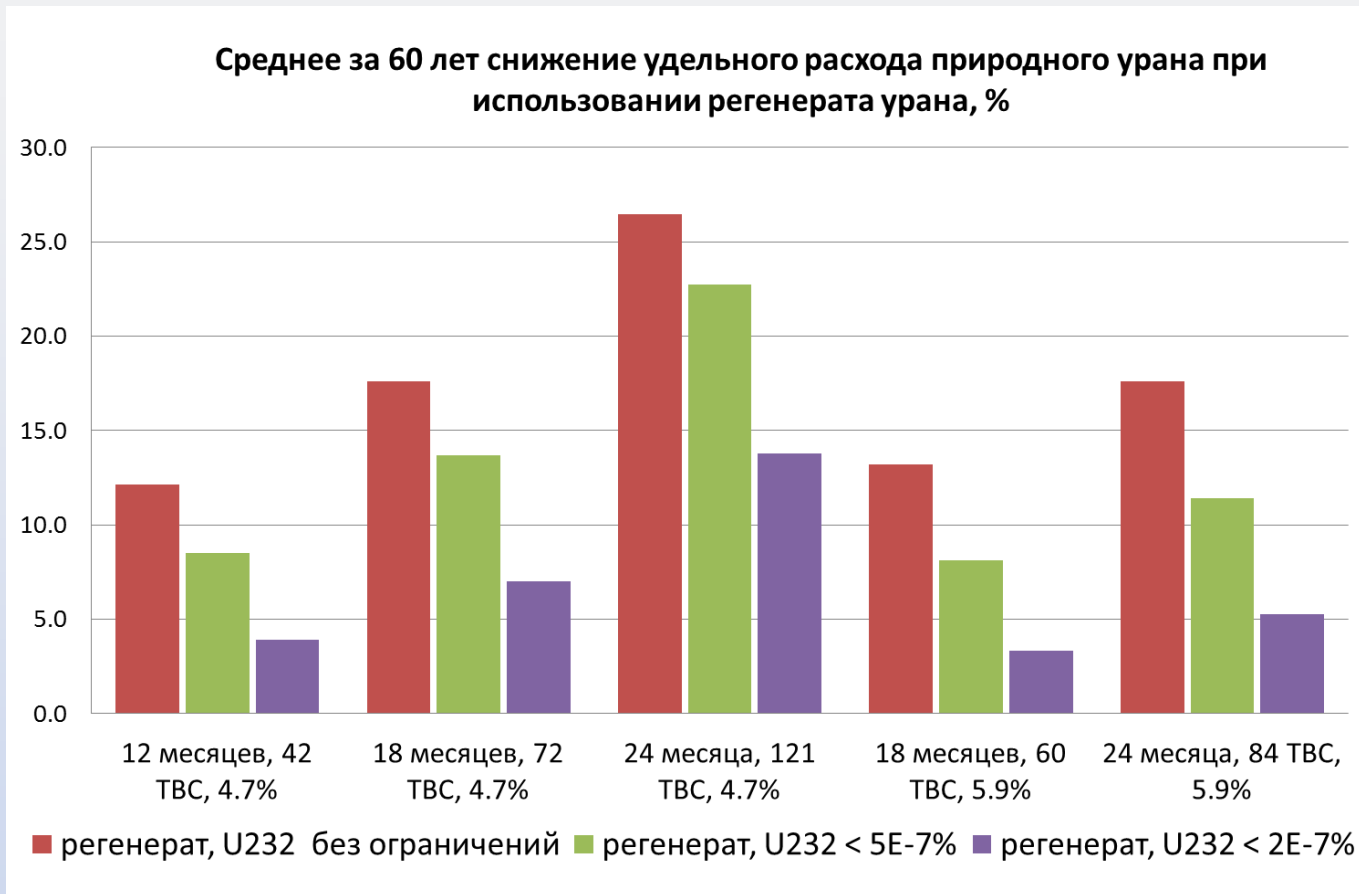
РУТ, содержание
U-236 - 0,8 %U



Тип топлива	На основе природного урана	РУТ
Количество загружаемых ТВС	66/67	66
Среднее обогащение топлива, %	4,73	5,16
Максимальное обогащение топлива, %	4,95	5,30
Среднее выгорание топлива, МВт*сут/кгU	50,0	49,0
Длительность кампании, календарных суток	493	479



Результаты расчетов многократного рециклирования урана в ВВЭР-1200



Регенерат урана. Выводы ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200

Переход на регенерированное топливо на базе существующих конструкций ТВС при сохранении длительности кампании потребует либо повышения обогащения топлива выше 5%, либо увеличения количества загружаемых тепловыделяющих сборок.

Основные нейтронно-физические характеристики разработанных топливных циклов с регенератором урана находятся в пределах, использованных при обосновании безопасности топливных циклов с обогащенным природным ураном.

Концентрация борной кислоты, обеспечивающая подкритичность 5 % в холодном состоянии, возрастает в процессе рециклирования (~ на 1 г/кг к четвёртому рециклу).

Экономия природного урана в результате рециклирования возрастает при переходе от 12-месячного к 18- месячному, а затем и к 24-месячному циклу. При фиксированной длительности кампании экономия природного урана увеличивается при снижении обогащения с одновременным ростом количества перегружаемых ТВС.

Использование регенерированного уран-плутониевого топлива

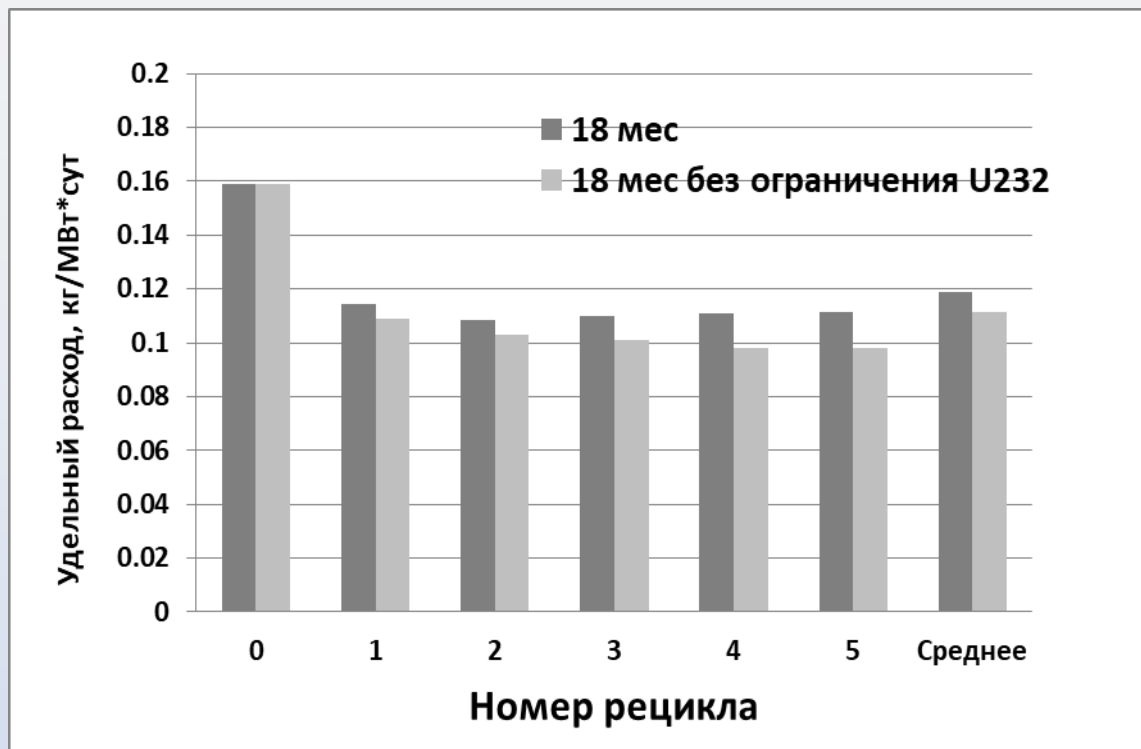
Для ВВЭР рассматриваются следующие виды регенерированного УПТ

РЕМИКС-топливо состоит из регенерированного урана, регенерированного плутония и обогащенного природного урана. Для реакторов ВВЭР рассматриваются несколько видов РЕМИКС-топлива (РЕМИКС-С, РЕМИКС-Гет, РЕМИКС-В) различающихся содержанием плутония в твэлах и ТВС.

МОКС-топливо изготавливается из плутония, полученного при переработке ОЯТ энергетических реакторов, смешанного с обедненным или природным ураном

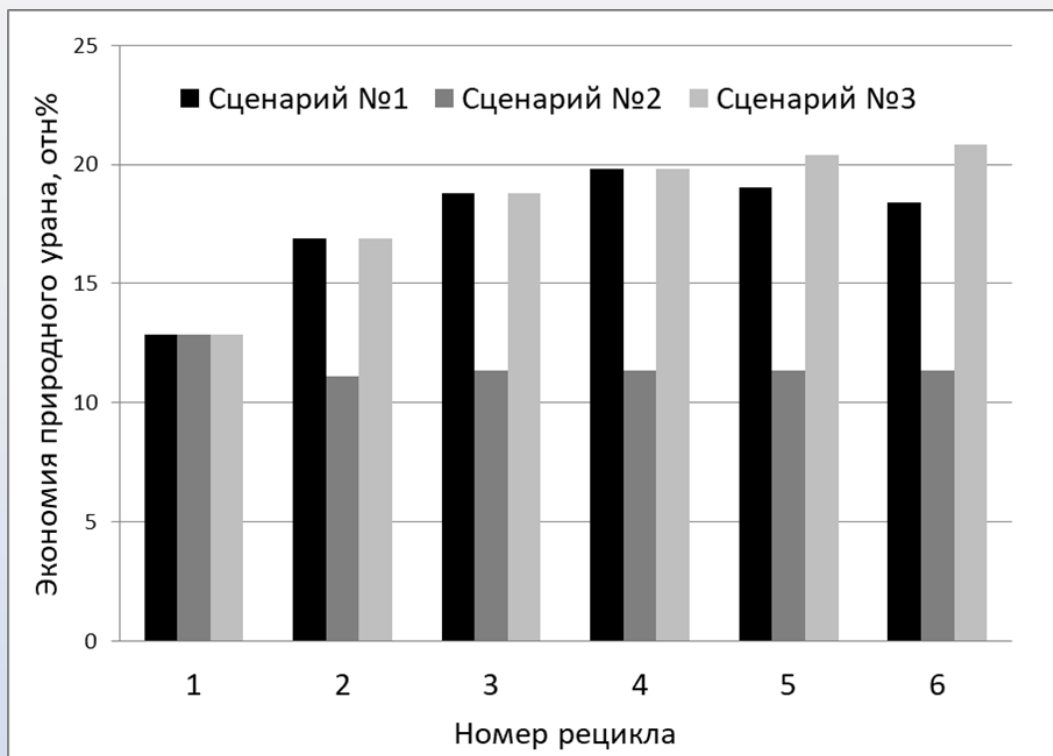


Результаты расчетов многократного рециклирования УПТ в виде РЕМИКС-С в ВВЭР-1200



Средний удельный расход природного урана за шесть рециклов, включая нулевой цикл на обогащенном природном уране, снижается по сравнению с нулевым циклом на 25 % для 18- месячного топливного цикла

Результаты расчетов многократного рециклирования плутония в ВВЭР-1200. 50 % доли МОКС-СТВС в подпитке



Сценарий 1 – используется весь плутоний, наработанный на предыдущем шаге рециклирования (ограничение по содержанию Pu – не более 14 %)

Сценарий 2 - используется плутоний, наработанный на предыдущем шаге рециклирования в урановых ТВС (ограничение по содержанию Pu – не более 14 %)

Сценарий 3 – используется весь плутоний, наработанный на предыдущем шаге рециклирования (ограничения по содержанию Pu нет)

Экономия природного урана и работы разделения по сравнению с открытым топливным циклом в ВВЭР-1200 (одновременный рецикл урана и плутония)

Характеристика	Вариант 2 РЕМИКС-С ВВЭР-1200	Вариант 3 РЕМИКС-С ВВЭР-1200/ БН-1200 ¹⁾	Вариант 4 МОКС ВВЭР-1200 ²⁾	Вариант 5 МОКС ВВЭР-1200/ БН-1200 ²⁾
Номер рецикла	1 → 2	1 → 2	1 → 2	1 → 2
Экономия природного урана, отн ед.	32 → 30%	32 → 35%	31% → 30%	31% → 30%
Экономия работы разделения, отн ед.	18% → 10%	18% → 23%	12% → 13%	12% → 13%

- 1) Обмен равной массой плутония
- 2) Обмен плутонием с равным энергопотенциалом

Уран-плутониевое топливо в ВВЭР-1200. Основные результаты

Расчеты показали, что в процессе рециклирования плутония в реакторе ВВЭР-1200 в виде РЕМИКС и МОКС топлива, количество плутония растет, а содержание делящихся изотопов в нем снижается.

Для обеспечения необходимых размножающих свойств ТВС требуется увеличивать содержание плутония в топливе. Это приводит к ухудшению нейтронно-физических характеристик активной зоны, таких как эффективность аварийной защиты, концентрация борной кислоты в теплоносителе и параметры кинетики.

Замена плутония ВВЭР-1200 на плутоний БН-1200, который имеет стабильный изотопный состав с большим количеством делящихся изотопов плутония, несколько улучшает нейтронно-физические характеристики активной зоны ВВЭР-1200 и увеличивает экономию природного урана при обмене равными массами плутония (при обмене массами плутония, имеющими равный энергопотенциал, экономия природного урана не увеличивается).

Экономический эффект от использования регенерированного УПТ в ВВЭР во многом будет определяться возможностями технологий (транспортировка ОТВС, переработка, изготовление ТВС с высокофоновым УПТ, обращение со свежими ТВС с УПТ на АЭС)

Толерантное топливо

Согласно определению МАГАТЭ толерантное топливо - топливо, при котором твэлы могут выдерживать запроектную аварию с плавлением топлива и выделением водорода в активной зоне реактора в течение значительно более длительного периода времени, чем текущая топливная система UO_2 -Zr, при сохранении или улучшении характеристик существующего топлива при нормальной эксплуатации.

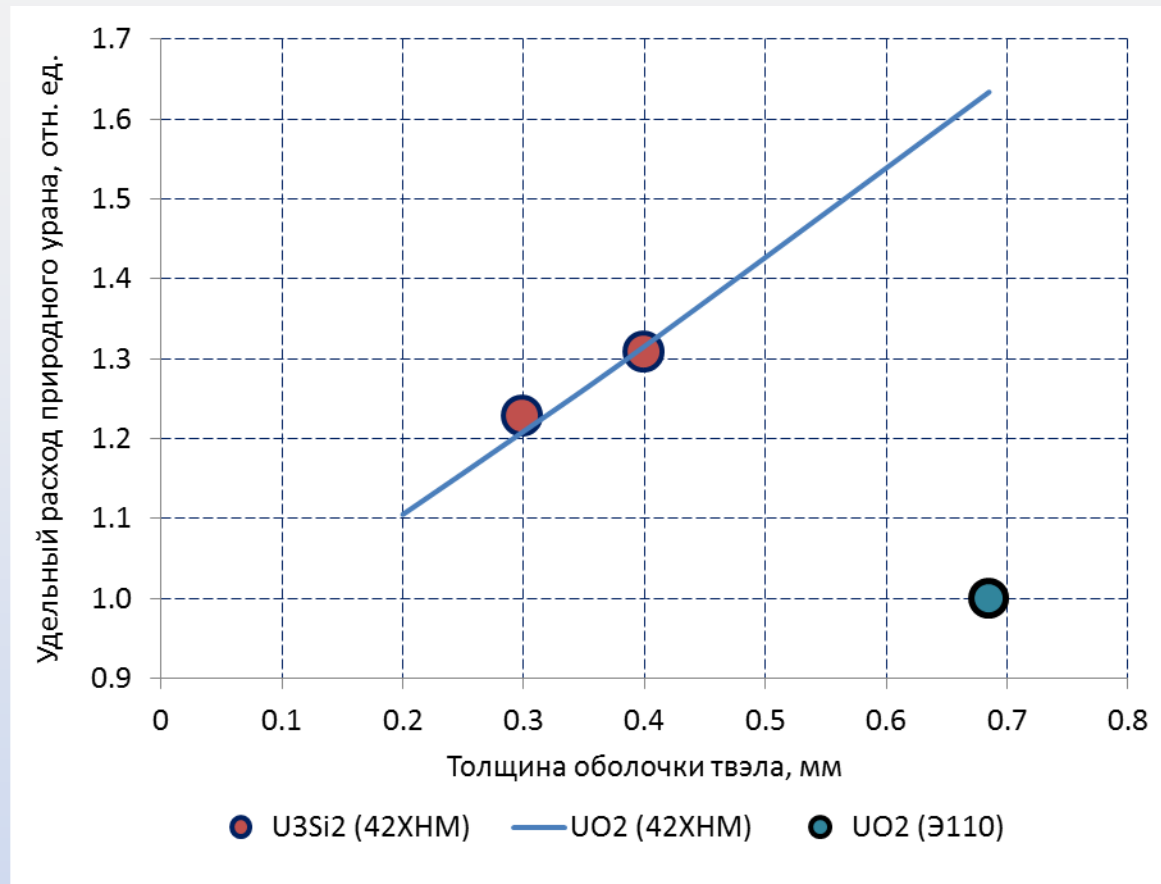
Существуют три концепции толерантного топлива:

- ✓ нанесение покрытия на существующие циркониевые оболочки;
- ✓ замена циркониевой оболочки на оболочку из другого материала;
- ✓ замена топливной композиции из диоксида урана на топливо с повышенной теплопроводностью.

В России проводятся исследования свойств различных толерантных оболочек твэлов. В частности рассматриваются оболочки из циркониевого сплава с хромовым покрытием, а также оболочки из сплава 42ХНМ.

Также изучаются различные топливные композиции: дисилицид урана и уран-молибденовый сплав

Толерантное топливо. Расчёты 18-месячных топливных циклов ВВЭР-1200



Изменение удельного расхода природного урана в 18-месячном топливном цикле ВВЭР-1200 при различной толщине оболочки ТВЭЛ из сплава 42XHM (внутренний диаметр оболочки ТВЭЛ постоянный – 7,73 мм)

Основные нейтронно-физические характеристики 18-месячных циклов с U_3Si_2 топливом ВВЭР-1200

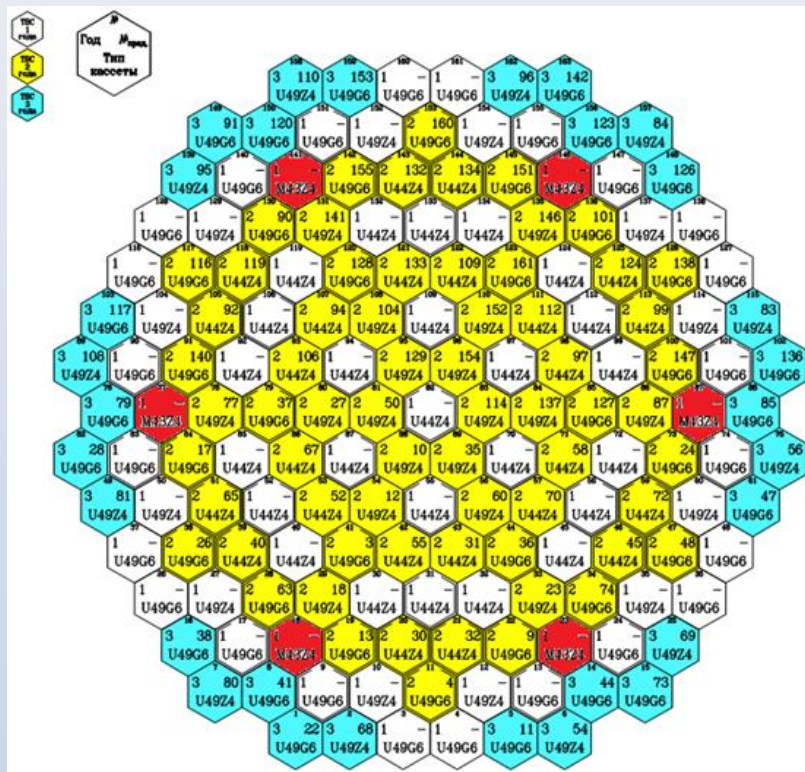
Характеристика	Значение в топливном цикле				
	Референсный	Э110 72ТВС	Э110 60ТВС	42ХНМ	42ХНМ тонкий ТВЭЛ
Тип топлива	UO_2	U_3Si_2			
Диаметр и толщина оболочки ТВЭЛОВ, мм	9,1 x 0,685	9,1 x 0,685	9,1 x 0,685	8,53 x 0,4	8,53 x 0,4
Количество загружаемых ТВС, шт.	72	72	60	72	72
Среднее обогащение топлива подпитки, вес. %	4,70	4,08	4,51	5,40	5,39
Число уран-гадолиниевых ТВЭГОВ, шт.	1476	1242	1008	1632	1536
Масса урана в ТВэле, кг	1,507	1,743	1,743	1,743	1,681
Длительность кампании, эфф. сут,	501	499	495	504	499
Среднее по ОТВС выгорание топлива, МВт*сут/кгU	47,5	41,2	49,0	41,8	42,9
Удельный расход природного урана, г/МВт*сут	186	185	172	244	237

Опытно-промышленная эксплуатация перспективного топлива

Завершена опытно-промышленная эксплуатация трёх комбинированных ТВС, содержащих 18 РЕМИКС-ТВЭЛОВ на энергоблоке № 3 Балаковской АЭС

Осуществляется эксплуатация трёх опытных ТВС-2М с ТВЭлами, имеющими оболочки из сплава 42ХНМ и сплава циркония с хромовым покрытием, на энергоблоке № 2 Ростовской АЭС

Шесть опытных РЕМИКС-ТВС установлены на опытно-промышленную эксплуатацию в активную зону энергоблока № 1 Балаковской АЭС



Картограмма
расположения 6 опытных
РЕМИКС-ТВС в 27-й
загрузке энергоблока № 1
Балаковской АЭС

Заключение

В настоящее время в России успешно завершены работы по повышению тепловой мощности эксплуатирующихся ВВЭР-1000 и проектированию новых энергоблоков с тепловой мощностью 3200 и 3300 МВт, внедрен 18-месячный топливный цикл на ВВЭР-1000, и на энергоблоке № 1 НВАЭС-2 с ВВЭР-1200, проведены испытания суточных графиков изменения мощности на энергоблоке № 1 ЛАЭС-2 и энергоблоке № 1 НВАЭС-2, проводятся предварительные исследования по применению РЕМИКС и МОКС топлива, проводится опытная эксплуатация 6 РЕМИКС ТВС на энергоблоке № 1 Балаковской АЭС, опытная эксплуатация трёх ТВС-2М с твэлами, имеющими оболочки из сплава 42ХНМ и сплава циркония с хромовым покрытием, на энергоблоке № 2 Ростовской АЭС.

Выполненные расчётные исследования показывают перспективы адаптации производства электроэнергии на АЭС с ВВЭР к нуждам конкретной энергосистемы и возможным изменениям соотношений между составляющими себестоимости электроэнергии.

Дальнейшее продвижение в реализации конкурентного топлива ВВЭР большой мощности связано с поэтапным проведением испытаний и ОПЭ на действующих энергоблоках

**Спасибо
за внимание!**

