



ТОПЛИВНАЯ КОМПАНИЯ РОСАТОМА

ТВЭЛ



ВНИИНМ
имени А.А.Бочвара

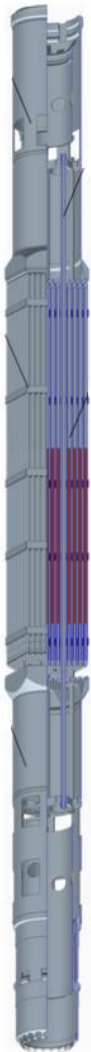


РОСАТОМ

Топливо для АЭС: перспективные разработки

Скупов Михаил Владимирович
АО «ВНИИНМ»

Научно-техническая конференция под эгидой Ядерного общества
27.06.2019, АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»



Устойчивое к авариям (толерантное) топливо ВВЭР/PWR

- Новые оболочки
- Покрытия
- Плотное теплопроводное топливо



Нитридное смешанное топливо для РБН (БРЕСТ-ОД-300, БН-1200)

- Новые оболочки
- Новая топливная композиция
- Работа твэлов в свинце
- Бесчехловая ТВС (дистанционирующие решетки)



РЕМИКС-топливо с частичным рециклированием ЯМ в ВВЭР

Оболочка

«отсутствие» водорода



Низкая скорость
окисления:



- Cr-покрытия на Zr-оболочки;
- оболочки из коррозионностойких сплавов (42ХНМ);
- Керамические оболочки (SiC).

Топливо

низкий уровень запасённого
тепла



Высокая
теплопроводность:



- металлическое U-Mo топливо;
- силицидное топливо;
- другие.

Положительные качества:

- Низкая скорость окисления в водяном паре.
- Высокая температура плавления.
- Опыт эксплуатации для оболочек ПЭЛов ВВЭР, транспортных реакторов.



Отрицательные качества:

- Повышенный, по сравнению с циркониевой оболочкой, захват тепловых нейтронов (Cr-3,05 барн; Ni-4,49 барн; Mo-2,48 барн). Это потребует применение топлива с обогащением больше 5% по U- 235, либо использование более тонкой оболочки.
- Снижение пластичности при высокой температуре.
- Изменение химического состава и, следовательно, свойств под облучением.
- Нарботка короткоживущих радиоактивных изотопов хрома, радиоактивного кобальта и молибдена.

Метод нанесения: Высокоскоростное ионно-плазменное магнетронное распыление (ВИПМР)

Положительные свойства:

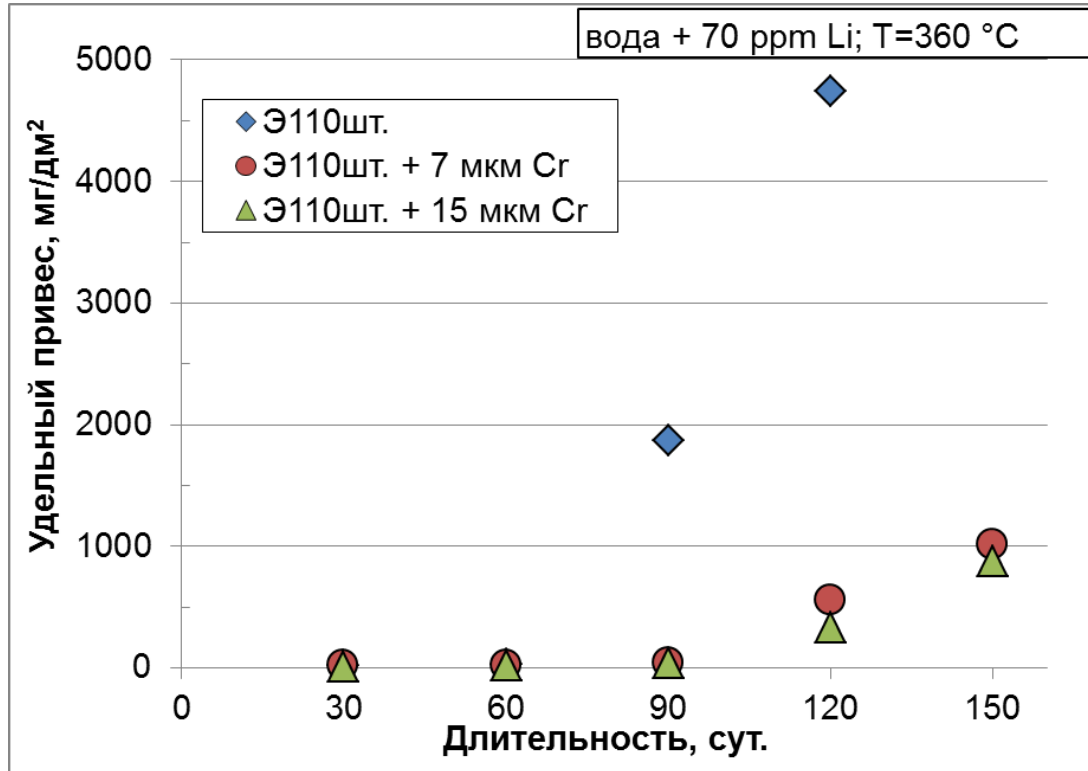
- Скорость окисления хромированных ТВЭЛОВ при температуре 1100-1200 °С на порядок меньше скорости окисления циркониевых труб, после автоклавных экспериментов по окислению в водяном паре при давлении 18 МПа и температуре 1100-1200 °С сохраняются механические свойства оболочек (отсутствует водородное охрупчивание) в отличие от циркониевых оболочек.
- Внедрение в производство требует минимальных изменений в существующей конструкции и технологии изготовления ТВЭЛОВ.
- Является антидебризным покрытием.
- Обеспечивает коррозионную стойкость в условиях повышения мощности и наличия кипения.

Отрицательные свойства:

- Отсутствуют экспериментальные данные по состоянию покрытия при облучении.
- Сечение захвата тепловых нейтронов изотопами хрома (3,05 барн) в 15 раз выше, чем у изотопов циркония (0,185 барн).
- Нарботка активного короткоживущего изотопа ^{51}Cr ($T_{1/2}=28$ дней) и изменение химического состава в результате накопления ванадия.



Оболочка с напылением хрома 5, 10 и 15 мкм



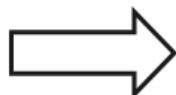
Результаты автоклавных испытаний образцов из сплава Э110 штатного состава на основе электролитического порошка циркония и образцов с защитным покрытием хрома



Оболочки экспериментальных твэлов ВВЭР для облучения в реакторе МИР

Преимущества альтернативного топлива – повышенная теплопроводность топлива, меньше перепад температуры, более высокая ураноемкость.

Повышенная ураноемкость



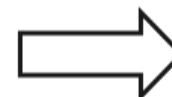
- увеличение кампании твэлов;
- улучшение экономических показателей активной зоны;
- компенсация потери реактивности при использовании стальных оболочек, оболочек из сплава 42ХНМ и оболочек с покрытиями



аварийная ситуация



Температура оболочки
На 400-500 °С
выше, чем у твэла
с теплопроводным
топливом



Паро-циркониевая реакция

Ураноемкость 11,3 г /см³
Т_{max} ~ 600 °С



Ураноемкость 15,3 г /см³
Т_{max} ~ 550 °С



решение

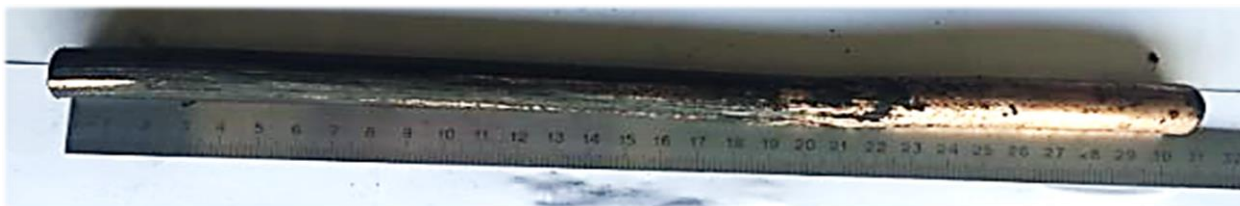
Ураноемкость 9,6 г /см³
Т_{max} ~ 1200 °С



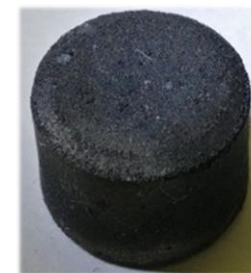
Таблетки U-Mo, полученные методом литья

Достоинства

- Металлическое U-Mo-топливо с высокой теплопроводностью (25 Вт/мК), имеет на 60% большую плотность по урану ($15,76 \text{ г/см}^3$), по сравнению с диоксидным топливом, что дает возможность применять нейтронно-поглощающие материалы (оболочки из стали) не превышая 5% барьер по обогащению топлива.
- U-Mo-топливо помимо исследовательских реакторов, применялось ранее также в реакторах типа ВВЭР – Билибинской АЭС, АМ, Белоярской АЭС, (в виде дисперсного топлива).



Пруток-заготовка для распыления U-Mo



Таблетка U-Mo, полученная методом порошковой металлургии

Отрицательные свойства

- Относительно большое распухание, низкая температура плавления.
- Отсутствие опыта эксплуатации такого топлива в реакторах ВВЭР-1000.

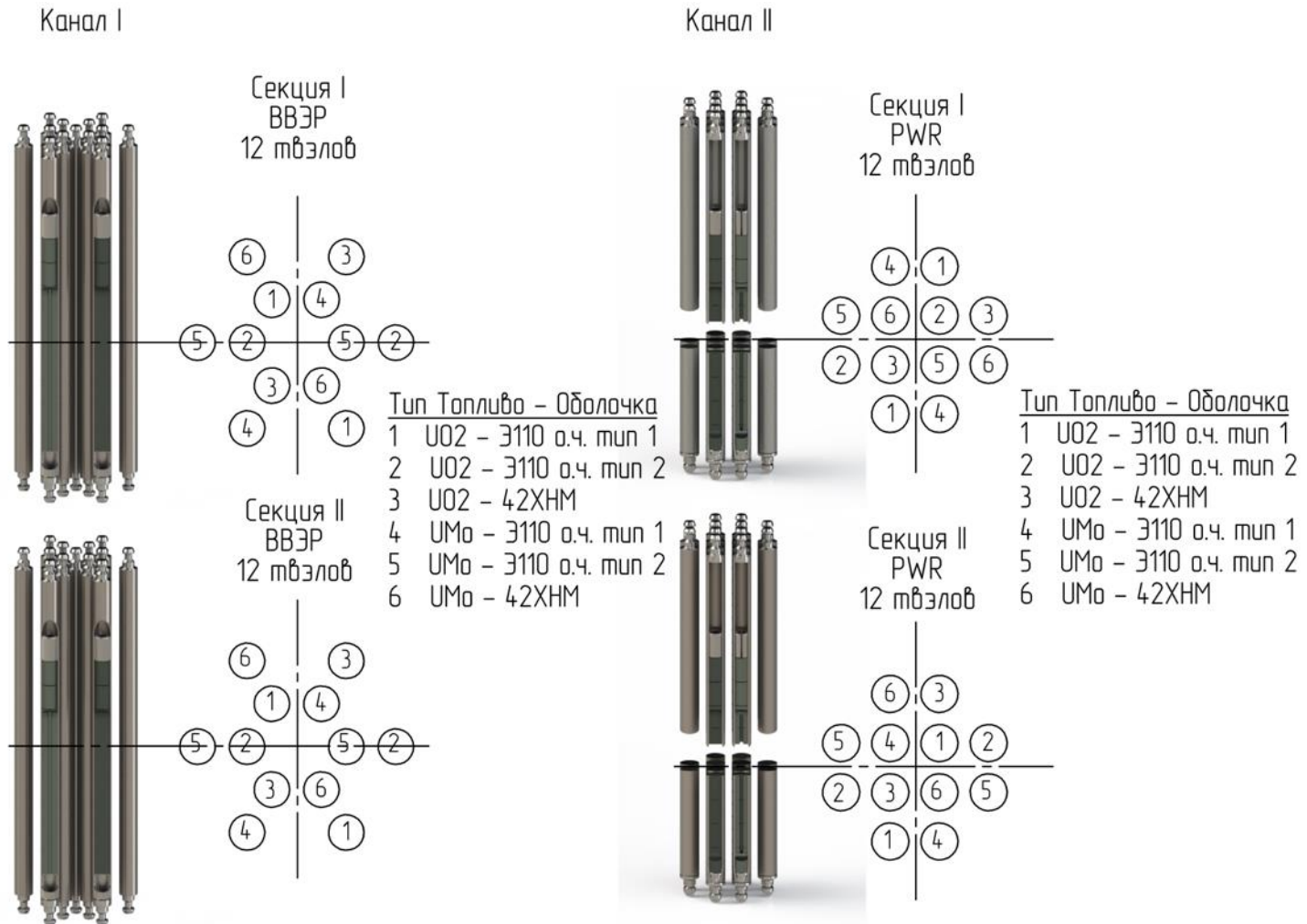


Схема размещения твэлов в облучательных устройствах реактора МИР

- ❖ Привлекательность плотного топлива определяется возможностью создания реакторных установок с коэффициентом воспроизводства в активной зоне больше 1
- ❖ Работа реактора в течение интервала между очередными перегрузками топлива осуществляется при малом, практически не меняющемся запасе реактивности, $\sim 1 \beta_{эф}$
- ❖ Высокая теплопроводность нитрида (выше, чем у оксида почти на порядок) позволяет понизить рабочую температуру топлива, уменьшить мощностной эффект реактивности
- ❖ Малая запасенная энергия в топливе (низкая теплоемкость) дает преимущество при нарушениях нормальной эксплуатации, связанных с прекращением циркуляции теплоносителя через активную зону
- ❖ При переходе реактора к работе в условиях замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) реактор эксплуатируется в режиме самообеспечения делящимися материалами, без подпитки внешним плутонием, плутоний оружейного качества при этом не накапливается
- ❖ Решение о начале интенсивных работ по нитриднему топливу для перспективных РБН принято 29 октября 2009 г. на секции №4 НТС ГК «Росатом» по результатам анализа вариантов плотного топлива

- ❖ Многолетний опыт изготовления и эксплуатации топлива UN в реакторе БР-10:
 - ✓ Две загрузки реактора с UN (660 твэлов и 590 твэлов), максимальное выгорание около 9 % т.а., максимальная линейная мощность – 45 кВт/м, максимальная температура топлива 1175 К, плотность таблеток 85-94 % т.п.

- ❖ Большое количество твэлов, испытанных в реакторе БОР-60:
 - ✓ 1 ТВС с топливом UN, максимальное выгорание более 8 % т.а., максимальная температура топлива 1775 К;
 - ✓ Несколько твэлов с топливом (U,Pu)N (содержание плутония 20%), максимальное выгорание - 4 % т.а. и 8,95 % т.а., максимальная температура топлива, соответственно, 2475 К, 1750 К, плотность таблеток 85-86 % т.п.
 - ✓ 2 ЭТВС с топливом (U,Pu)N и свинцовым подслоем, максимальное выгорание в одной из ЭТВС - 5,5 % т.а.
 - ✓ 4 твэла с топливом (U,Pu)N с повышенным содержанием Pu в рамках российско-французского эксперимента BORA-BORA, максимальное выгорание топлива 12 % т.а.

- ❖ Возможность изготовления МОКС- и СНУП-топлива на универсальных установках

- ❖ Возможность переработки облученного нитридного топлива на существующих установках при проведении модификации оборудования

Твэл реактора БРЕСТ-ОД-300

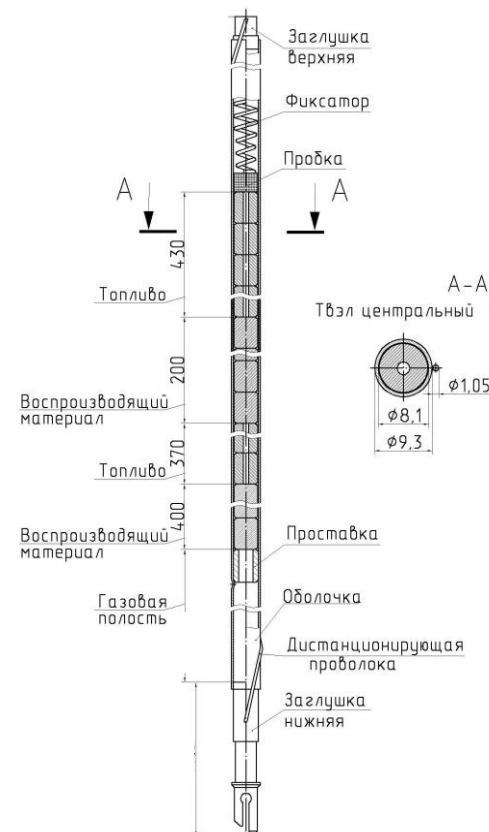
❖ Основные требования на первый этап эксплуатации:

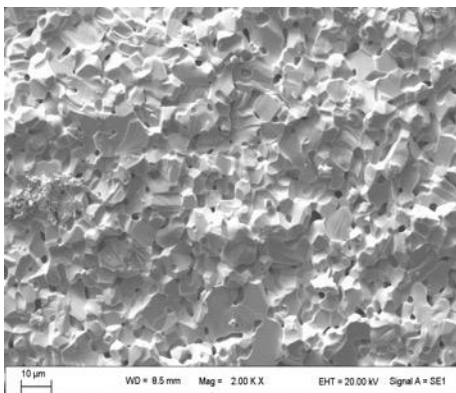
- ✓ Максимальная глубина выгорания – 6 % т.а.
- ✓ Максимальная повреждающая доза – 89 сна
- ✓ Максимальная температура стенки – 670 °С
- ✓ Максимальная линейная мощность – 42 кВт/м
- ✓ Материал оболочки – ферритно-мартенситная сталь ЭП823

Твэл реактора БН-1200

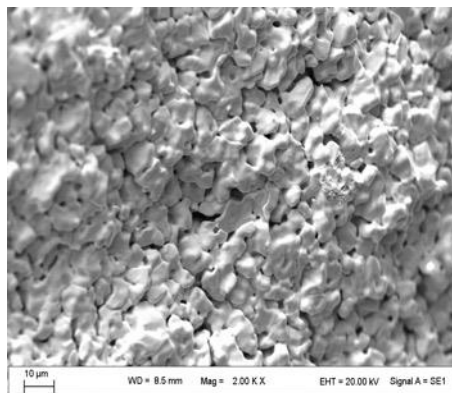
❖ Основные требования на первый этап эксплуатации:

- ✓ Максимальная глубина выгорания – 7,6 % т.а.
- ✓ Максимальная повреждающая доза – 96 сна
- ✓ Максимальная температура стенки – 680 °С
- ✓ Максимальная линейная мощность – 47 кВт/м
- ✓ Материал оболочки – аустенитная сталь ЭК164
 - Рассматривается вариант твэла с прослойкой из производящего материала
 - Повышение глубины выгорания на последующих этапах планируется за счет перехода на ферритно-мартенситные стали и их ДУО модификации



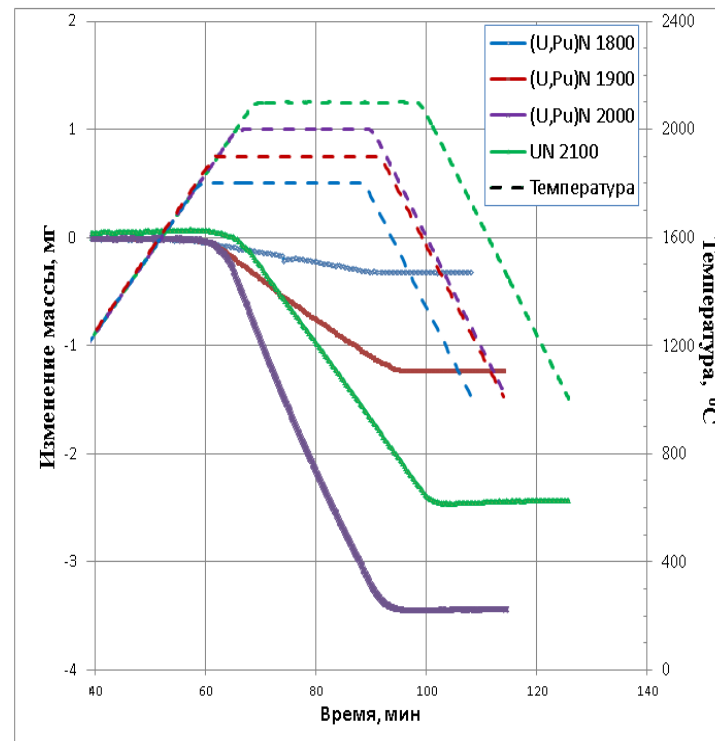


До испытаний

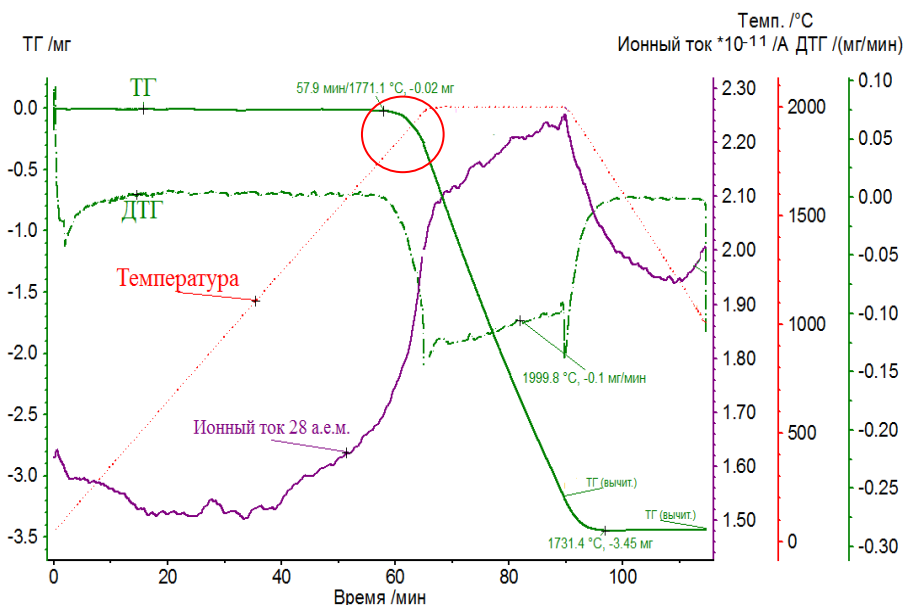


После 2000 °C

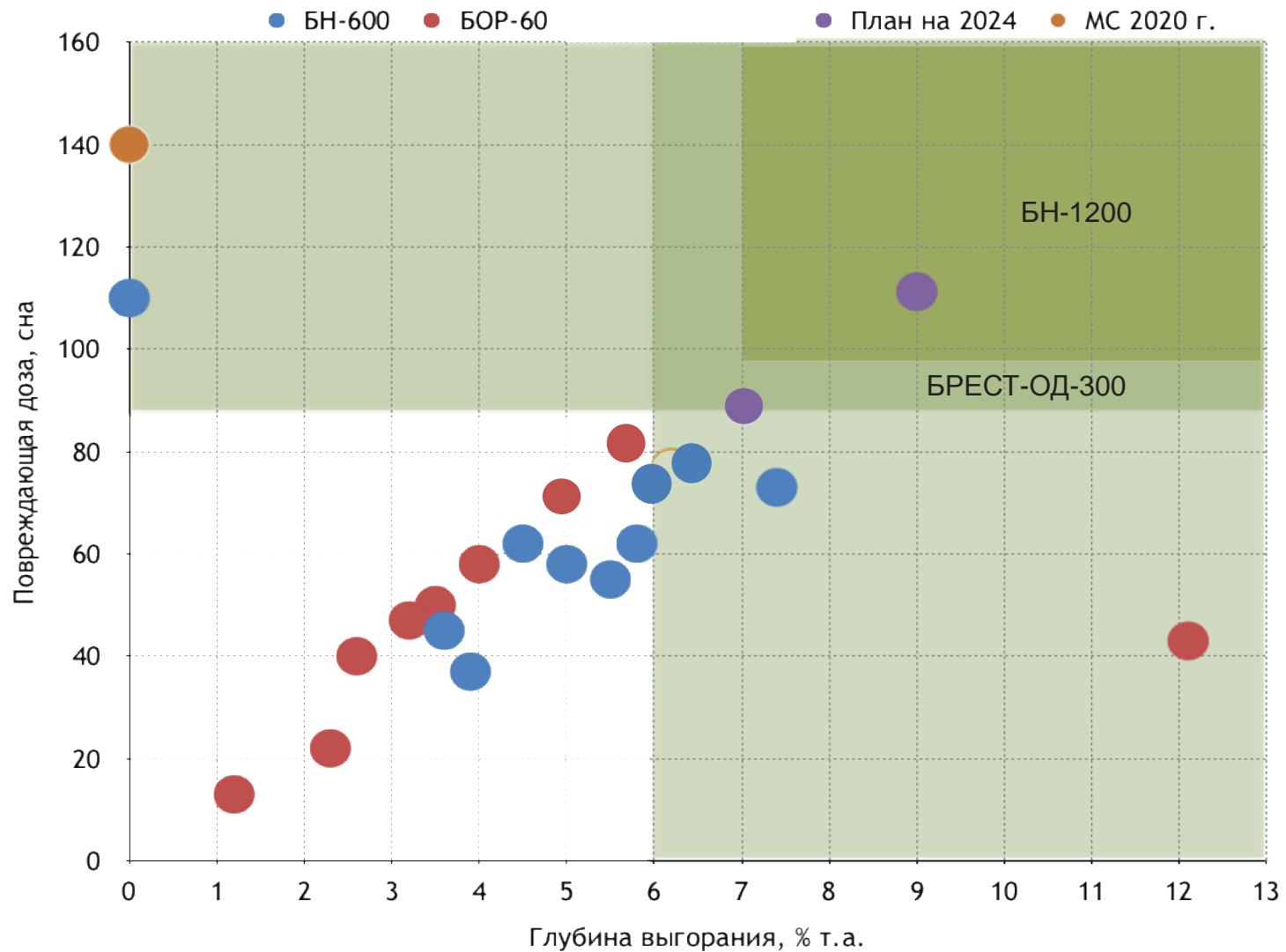
Процесс испарения заметен, начиная с 1800 °C

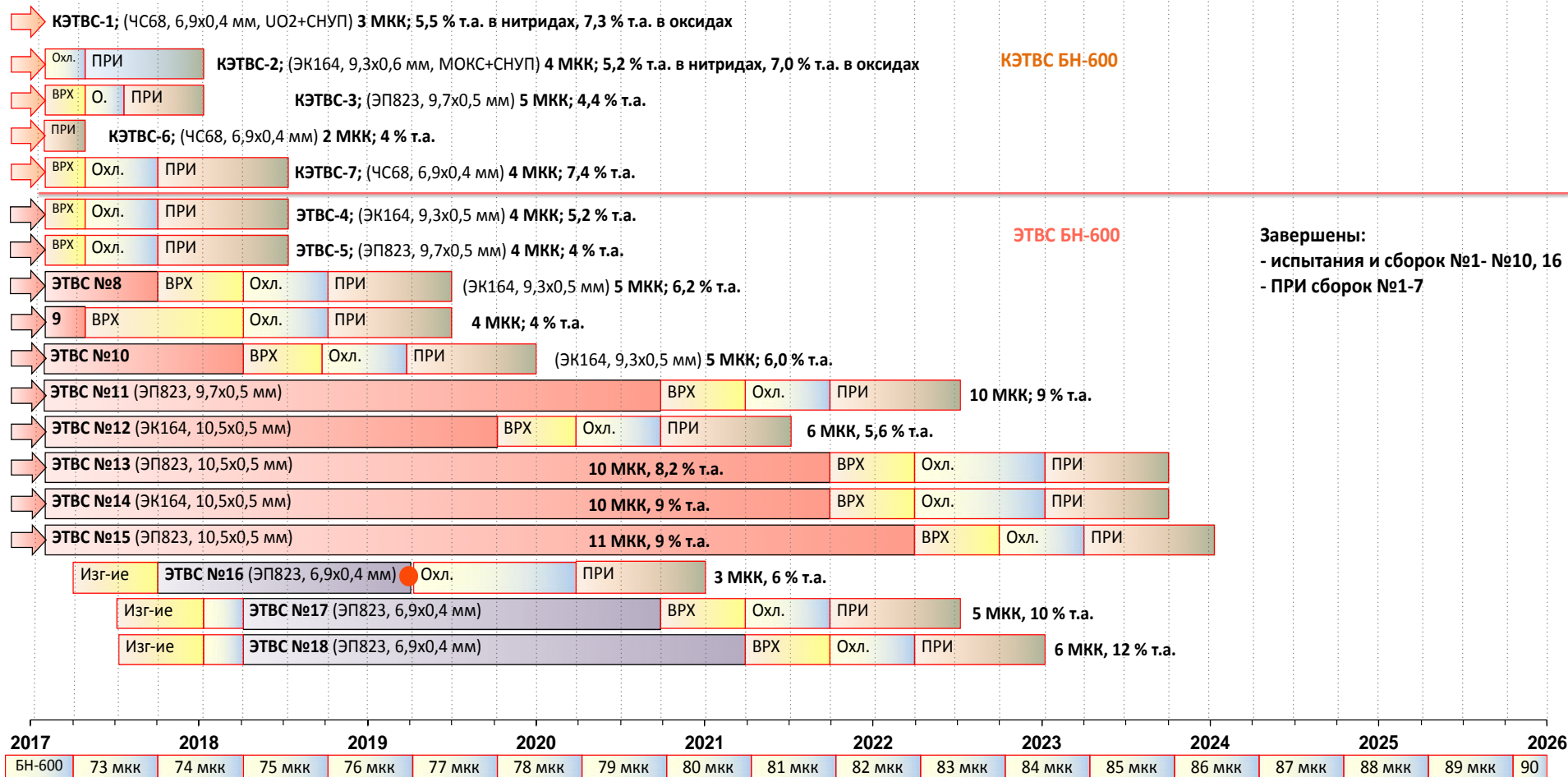


Максимальное обнаруженное обеднение по плутонию в результате испытаний – до 2-х раз

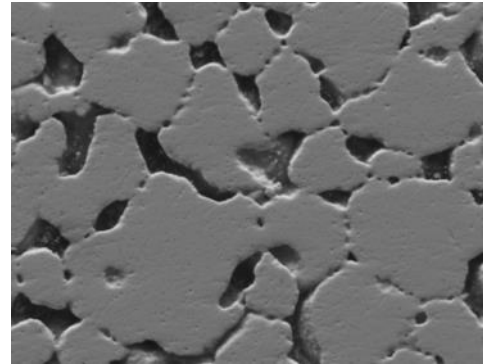
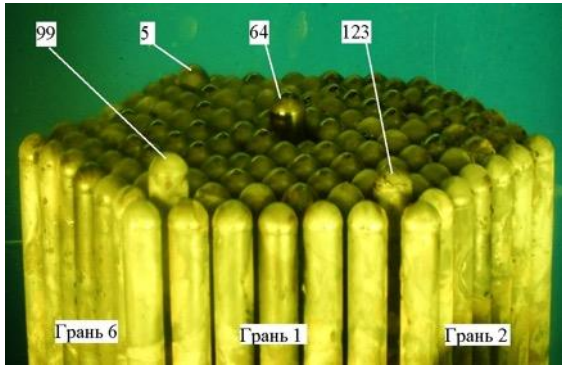


Состояние с обоснованием топлива (U,Pu)N по основным критериям: глубина выгорания и повреждающая доза

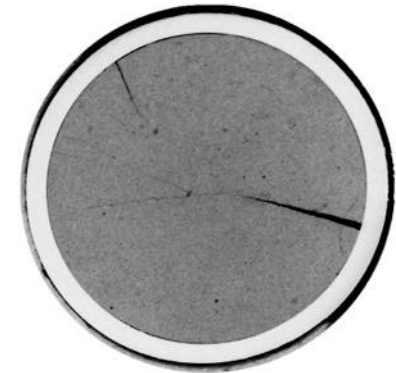




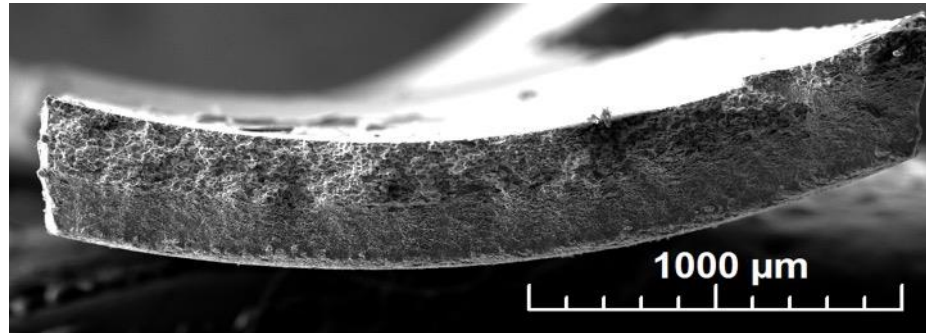
Послереакторные исследования КЭТВС-7 (4 мкк; 6,9x0,4 мм ЧС68; 7,5 % т.а.; 73,6 сна)



Центр таблетки



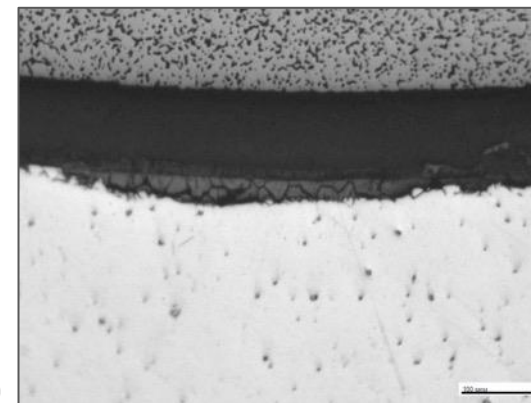
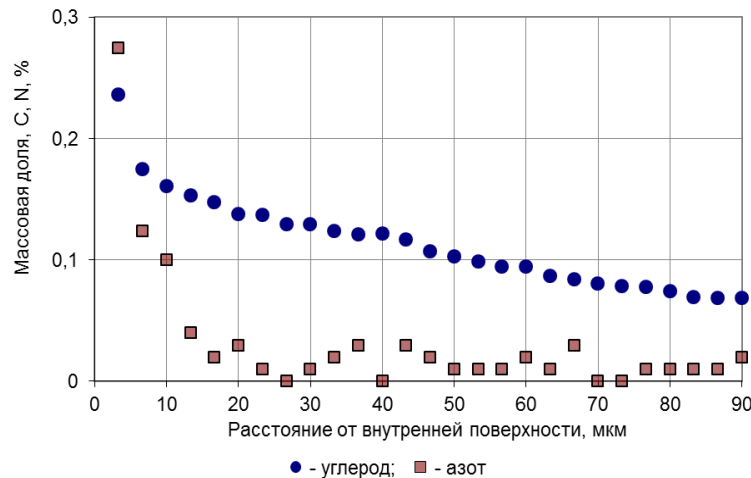
Центр топливного столба



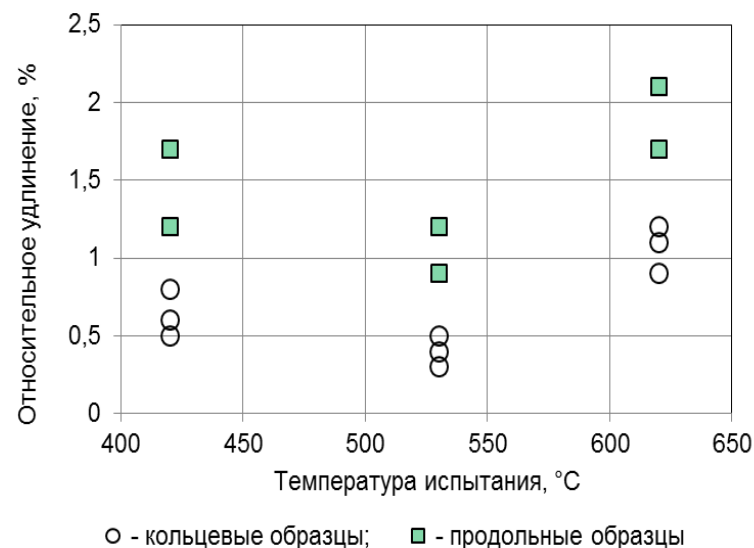
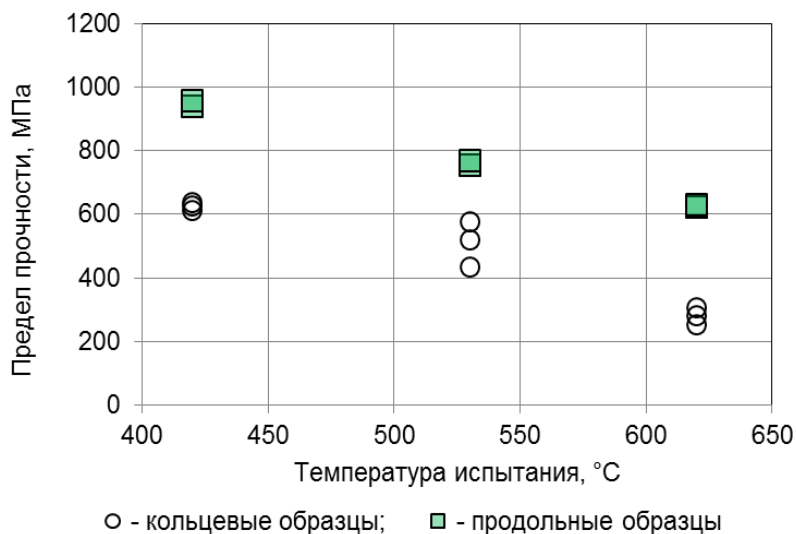
Верх топливного столба

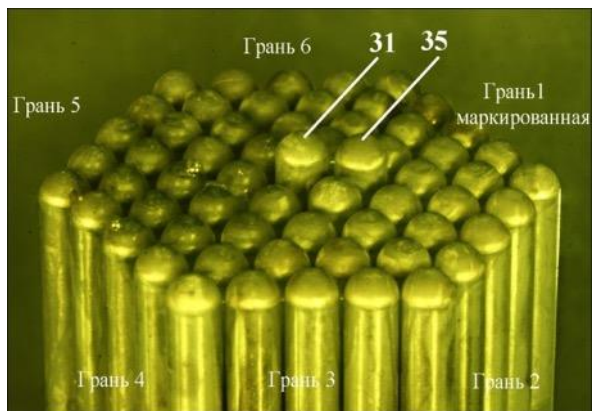
- Скорость набухания топлива в разных сечениях по высоте твэлов равна от 1,5 % до 2,1 % на 1 % тяж. ат. выгорания.
- Максимальное значение относительного увеличения диаметра твэлов со СНУП топливом равно 0,9 %, что меньше аналогичного значения для оксидных твэлов – 1,7 %

Максимальное коррозионное повреждение – до 60 мкм



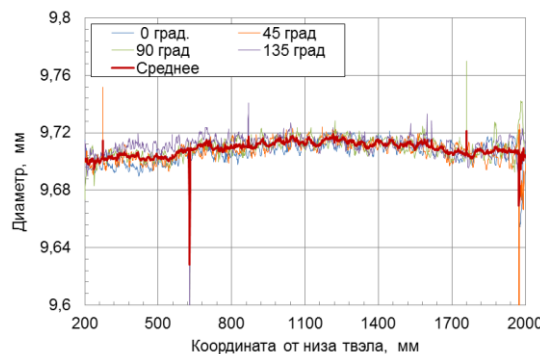
Типичная коррозия оболочек
ТВЭЛов с ЭК164



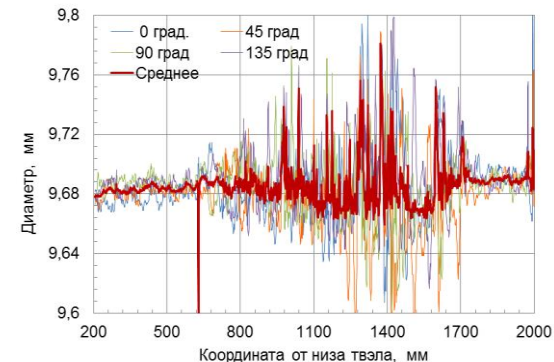


КЭТВС-3

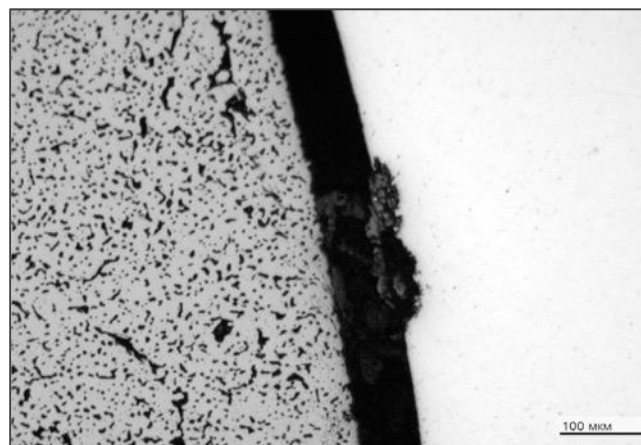
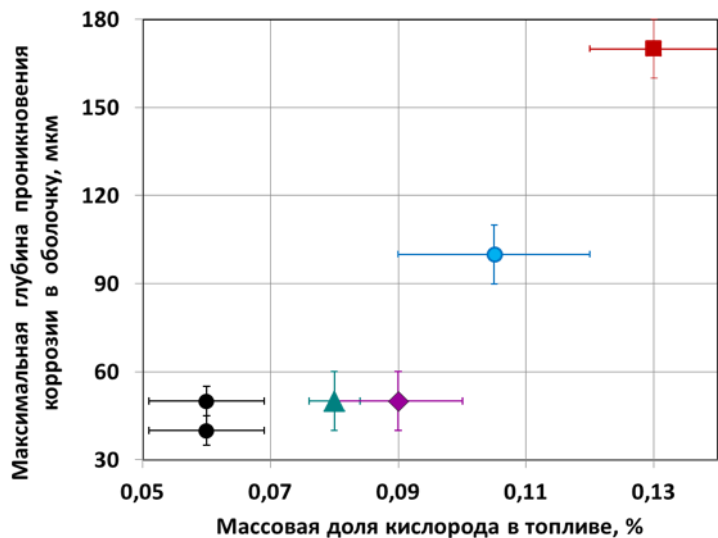
Эффект овализации твэлов ~50 мкм



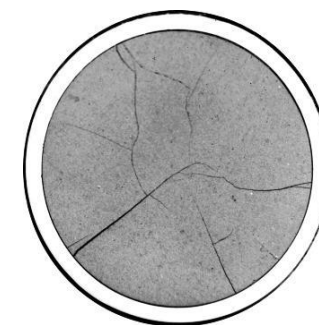
Таблетки UO₂



Таблетки (U,Pu)N

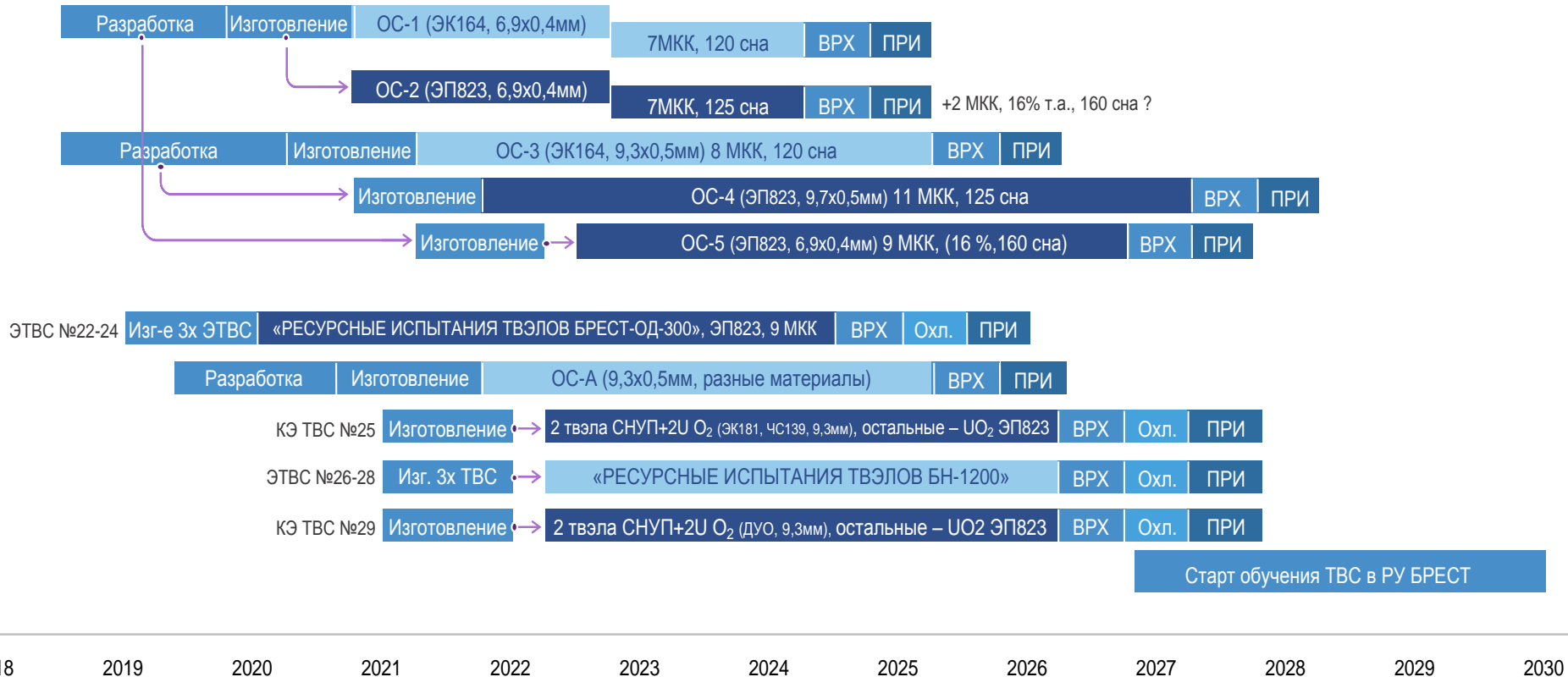


Характерный вид наблюдаемой коррозии (ЭТВС-5)

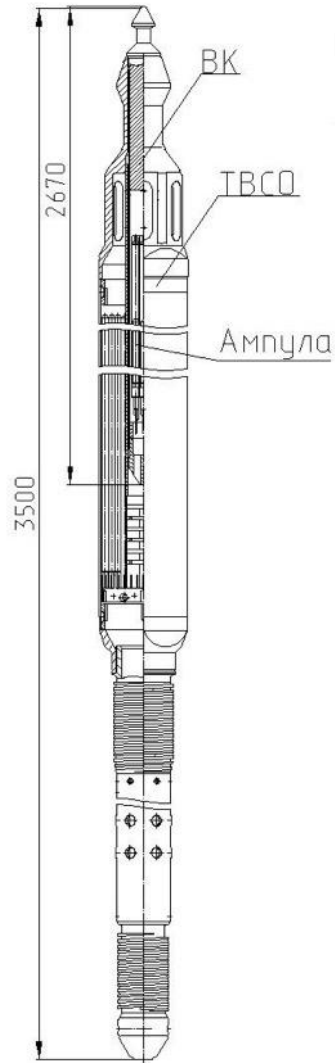


Среднее сечение (~4% т.а.)

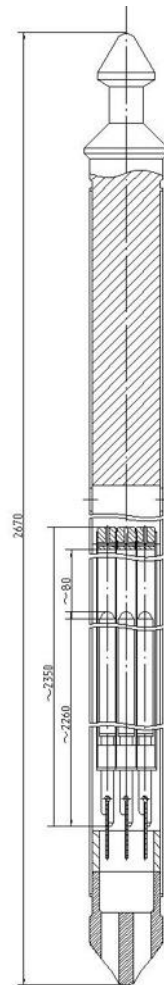
Осуществляется переход к новой методике испытаний, предусматривающей работу твэлов до предельных параметров



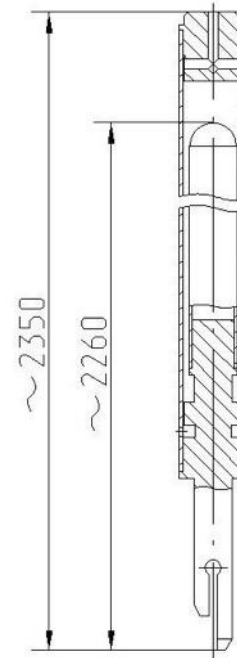
Облучательная сборка



Выемной контейнер



Ампула с твэлом



Использование узла негерметичности отработано на ПЭЛах реакторов БН

- Перспективные разработки твэлов нацелены на принципиальное улучшение показателей безопасности работы активных зон энергетических реакторов различного типа, основные проекты – «Толерантное топливо», «Плотное топливо».
- Проект, нацеленный на новые рыночные возможности, - «Ремикс топливо»
- Разработки ведутся высокими темпами, сопровождаются всеми типами экспериментального обоснования, включая реакторные испытания.
- Главные тенденции основных разработок – исключение или минимизация взаимодействия материалов твэлов с теплоносителем и снижение количества запасенного тепла в активной зоне.
- По направлению БРЕСТ получены весомые результаты по новым типам оболочечных труб: твэлы с оболочками из биметалла уже испытываются, а ДУО-стали и ванадиевые сплавы готовятся к испытаниям в БОР-60. Завершаются испытания материаловедческой сборки для достижения дозы 145 сна на ЭП823 и ДУО-сталях.
- Из соображения безопасности испытаний повышение глубины выгорания СНУП топлива в твэлах с новыми материалами в БН-600 будет осуществляться с использованием комбинированных ЭТВС и новых инструментов обоснования твэлов, включая облучательные сборки с выемной центральной частью.
- Следующим шагом в разработке твэлов прогнозируется создание топлива и технологий вовлечения МА в топливный цикл, НИР по которым уже ведется.

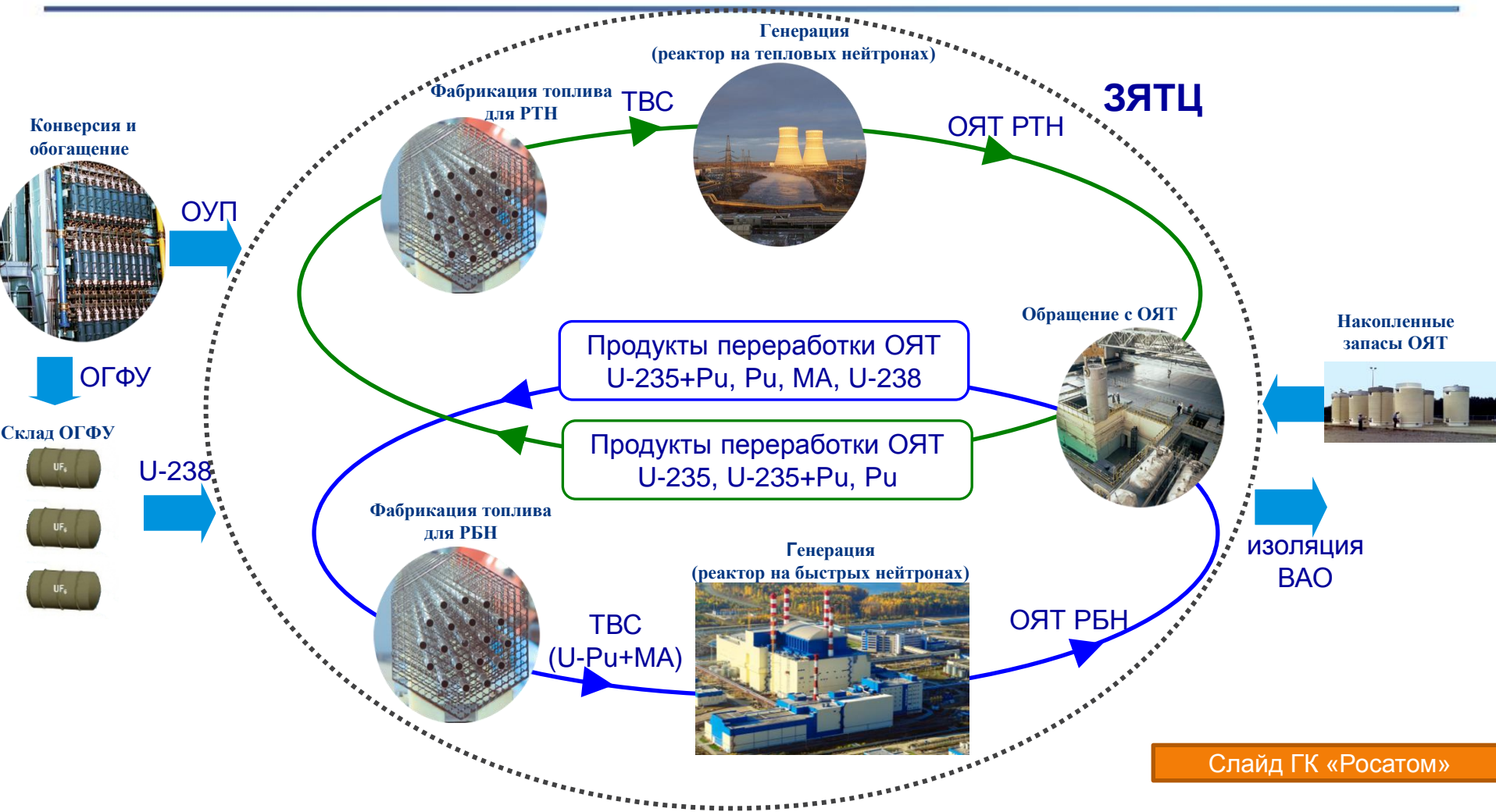


Спасибо за внимание!



РОСАТОМ

Принципиальная схема двухкомпонентной атомной энергетики (система РБН и РТН)



Слайд ГК «Росатом»

Эффективность ЗЯТЦ возрастает по мере вытеснения из него топлива на основе урана-235 уран-плутониевым топливом