



ВНИИНМ
РОСАТОМ

Смешанное уран-плутониевое топливо для реакторов на быстрых нейтронах

М.В. Скупов, А.Ю. Иванов, А.Е. Глушенков, М.В. Леонтьева-Смирнова

МНТК НИКИЭТ – 2023

Экспериментальное обоснование работоспособности ТВЭЛОВ с МОКС топливом

Исследования МОКС топлива в реакторе БОР-60

- максимальная повреждающая доза - до 65 сна
- максимальное выгорание - 17,1 % т.а.

с 1970 по 1992 г.

Исследования МОКС топлива в реакторе БН-350

- максимальная повреждающая доза - 53 сна
- максимальное выгорание - 10,0 % т.а.

4 ЭТВС 1988 г.

Исследование МОКС топлива в реакторе БН-600

- максимальная повреждающая доза - 79 сна
- максимальное выгорание - 11,8 % т.а.

39 ЭТВС
с 1988 по 2003 г.

Один из основных выводов по итогам исследований:

Поведение гомогенного МОКС топлива при облучении аналогично поведению уранового оксидного топлива

ЭТВС типа БН-800 для реактора БН-600 (твэл 311.305.000 ТП)

- максимальная повреждающая доза - 85 сна
- максимальное выгорание - 11,6 % т.а.

3 ЭТВС
с 2008 по 2014 г.

Варианты технологий на стадии разработки МОКС топлива

❖ «Гранат»

- ✓ Аммиачное соосаждение урана и плутония в присутствии ПАВ
- ✓ Прямое изготовление таблеток (без гранулирования)
- ✓ Опыт – 14 ЭТВС БН-600

❖ Золь-гель («Жемчуг»)

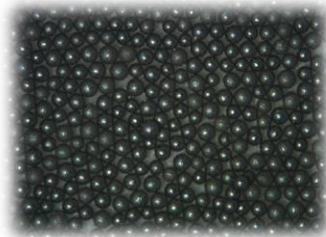
- ✓ Получение топливных микросфер
- ✓ Прямое изготовление таблеток
- ✓ Опыт – 2 ЭТВС БН-600 (потребовалось измельчение микросфер)

❖ Виброуплотнение

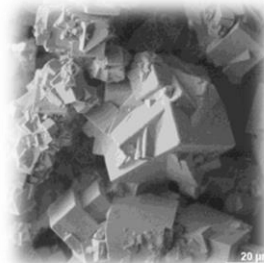
- ✓ Получение гранулированного порошка пирохимическим методом
- ✓ Смешивание нескольких фракций порошка с металлическим урановым геттером / прямое дозирование фракций
- ✓ Виброуплотнение порошка в твэле

❖ Механическое смешивание (вихревой размол)

- ✓ Смешивание индивидуальных оксидов или мастер-смеси с оксидом урана
- ✓ Изготовление таблеток



Топливные микросферы



Пирохимический гранулят

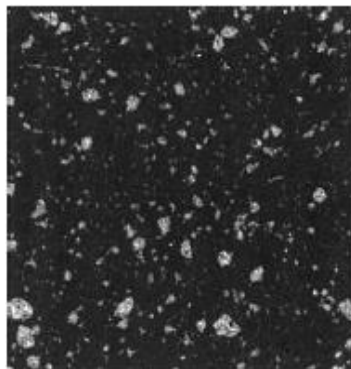


Порошок с иглами после смешивания

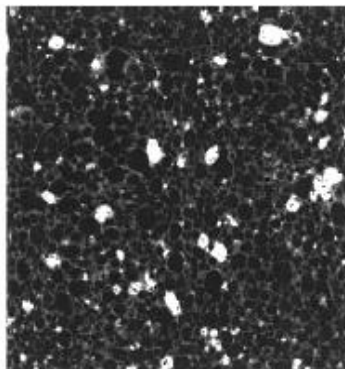
Сравнительная оценка равномерности распределения Pu

Топливные таблетки, полученные с использованием различных технологий смешивания исходных компонентов

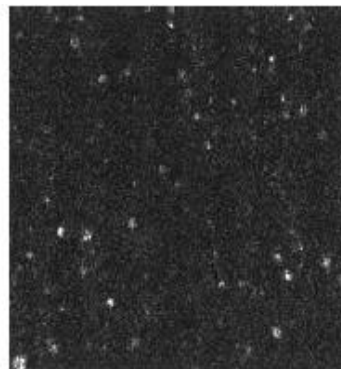
MIMAS – AUC¹



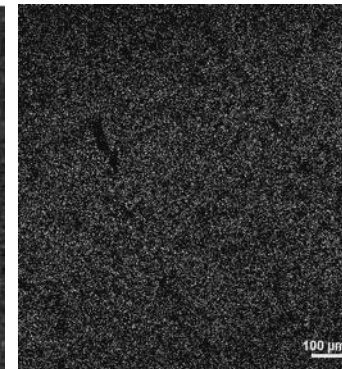
MIMAS - ADU¹



SBR¹



BP



Изображение поверхности шлифов таблеток в характеристическом рентгеновском излучении Pu

Размер участков – 1x1 мм

Белоярская АЭС, энергоблок №4 (БН-800)

❖ 1983 г. – Начало разработки реактора БН-800

❖ 12.2015 г. – Пуск, 11.2016 г. – промышленная эксплуатация реактора БН-800

Гибридная активная зона: 396 ТВС UO_2 и 162 ТВС МОКС

66 ТВС с таблеточным МОКС топливом (ПО «Маяк»), 96 ТВС СВУТ (НИИАР), $\text{UO}_2(\text{МСЗ})$

❖ 01.2020 г. – Первые серийные ТВС с МОКС топливом загружены в активную зону

❖ 01.2021 г. – Первая полная перегрузка БН-800 МОКС топливом

Активная зона переходного периода

Таблеточное МОКС топливо производства ГХК и ПО «Маяк»

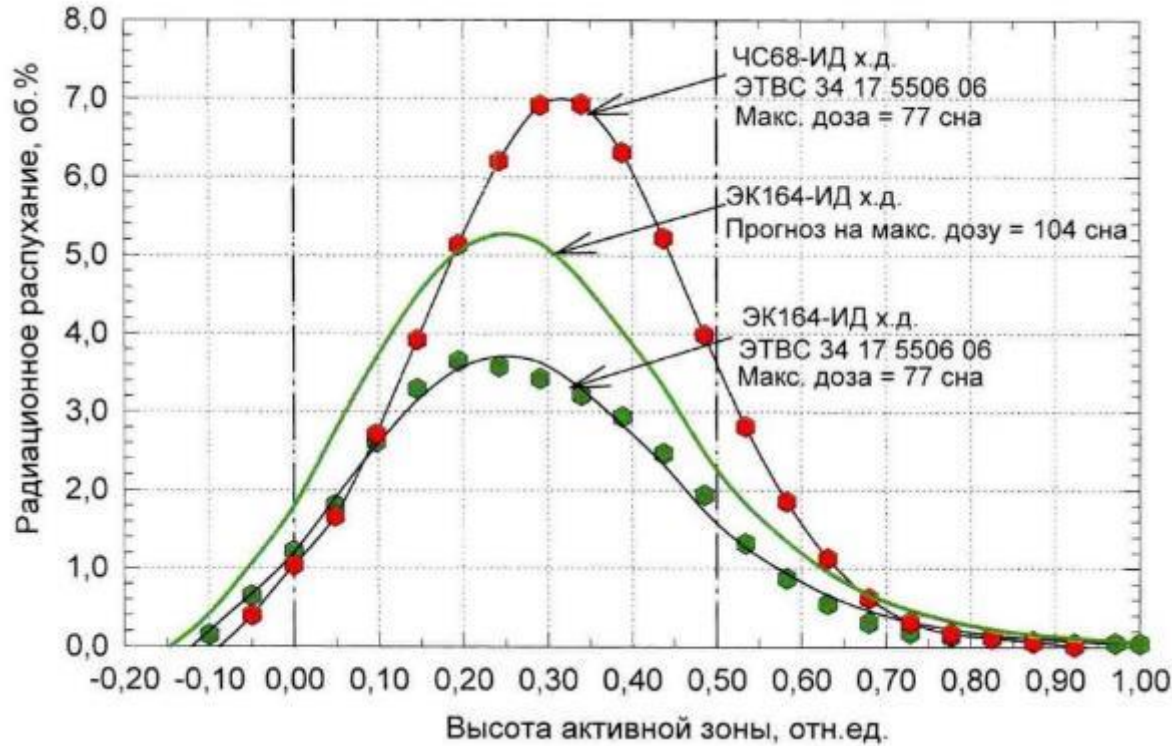
❖ 09.2022 г. – Полная загрузка АЗ ТВС с МОКС топливом

Активная зона с полной загрузкой МОКС топливом

Таблеточное МОКС топливо производства ГХК

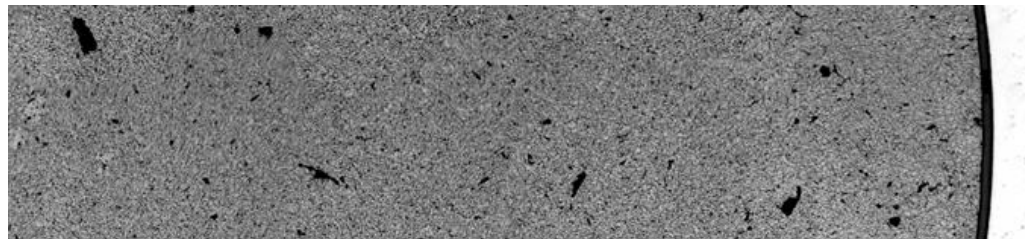
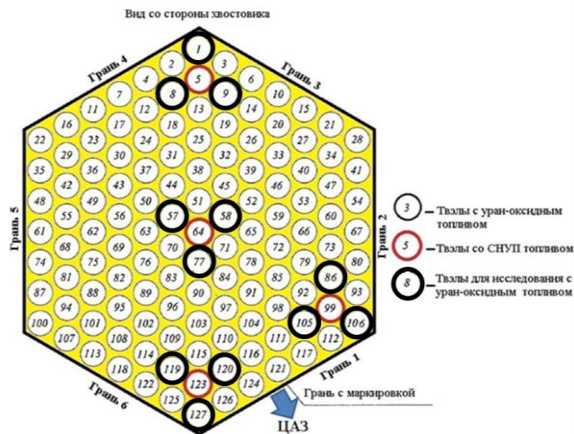
**Для перехода на полную загрузку МОКС топлива разработано
9 типов ТВЭлов и ТВС**

Переход твэлов БН-600 и БН-800 со стали ЧС68 на сталь ЭК164

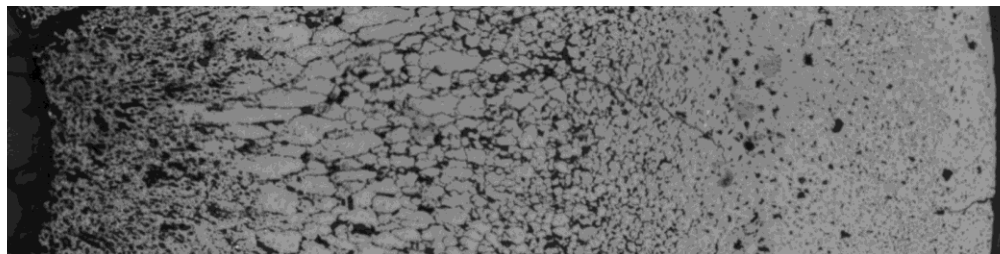


- Применена методика поэтапной оптимизации металлургического и трубного передела
- В БН-600 испытано 18 экспериментальных и 3 реперных ТВС
- Максимальная повреждающая доза на сегодня - 113 сна (выгорание 14,7 % т.а., топливо UO_2)
- Применение нового материала уже сегодня позволяет повысить ресурс твэла в 1,5 раза
- Реализуется программа увеличения глубины выгорания с переходом на новую ферритно-мартенситную оболочку

Послереакторные исследования твэлов (комбинированная ЭТВС БН-600). Сравнение оксида и нитрида



Нитридное топливо (выгорание 5,5 % т.а.)



Оксидное топливо (выгорание 7,0 % т.а.)

В нитридном топливе не происходит быстрой перестройки микроструктуры

Целевые параметры твэлов со СНУП топливом первых загрузок создаваемых РБН

Активная зона	Максимальная линейная мощность, кВт/м	Максимальная температура ² , °C	Максимальная глубина выгорания, МВт*сут/кг (% т.а.)	Максимальная повреждающая доза на оболочке, сна	Ресурс твэлов, эфф.сут.
БРЕСТ-ОД-300¹	42	670	58 (6,0)	89 (ЭП823-Ш)	1350/1950 (ЦЗ/ПЗ)
БН-1200М СНУП	52	700	(8,6)	105 (ЭК164х.д.-ИД)	920-1380
БР-1200	48	670	(12,5)	169 (ЭП823-Ш)	1200/1800 (ЦЗ/ПЗ)

¹ - Для твэла БРЕСТ-ОД-300 выпущен технический проект с экспериментальным обоснованием

²- С учетом факторов перегрева

Комплексная отработка технологии при изготовлении экспериментальных ТВС со СНУП топливом

Изготовлено:

- ❖ **Более 1760 твэлов** со СНУП топливом для испытаний в БН-600
- ❖ **29 ЭТВС** уникальной конструкции с твэлами конструкции БН-600, БРЕСТ-ОД-300, БН-1200
- ❖ Оработано изготовление комплектующих и твэлов с трубами следующих типоразмеров:
 - 6,9 x 0,4 мм ЧС68 (КЭТВС-1, -6, -7)
 - 6,9 x 0,4 мм ЭП823 (ЭТВС-16-18)
 - 6,9 x 0,4 мм ЭК164 (ЭТВС-19-21)
 - 9,3 x 0,6 мм ЭК164 (КЭТВС-2)
 - 9,3 x 0,5 мм ЭК164 (ЭТВС-4, -8, -10)
 - 9,7 x 0,5 мм ЭП823 (КЭТВС-3, ЭТВС-5, -9, -11, 22-24, 30-32)
 - 10,5 x 0,5 мм ЭК164 (ЭТВС-12, -14)
 - 10,5 x 0,5 мм ЭП823 (ЭТВС-13, -15)
 - 9,2 x 0,55 мм ЭК164 (ЭТВС-26-28)

Площадки изготовления:

- ❖ **Твэлы:**
 - ВНИИНМ (КЭТВС со СНУП топливом, 20 шт.)
 - МАЯК (КЭТВС-2 с МОКС топливом, 57 шт.)
 - СХК (все виды твэлов, всего 1572 шт.)
- ❖ **ЭТВС:**
 - НИИАР (КЭТВС);
 - СХК (КЭТВС, ЭТВС, ОС)



ЭТВС БН-600 на ХМЗ СХК

Главная особенность - система обеспечения инертной атмосферы

- На КЭУ-2 реализована и отработана система обеспечения и контроля инертной атмосферы для изготовления СНУП топлива, удовлетворяющего требованиям ТУ по кислороду (менее 0,15 % с уменьшением до 0,1%)
- Рабочие параметры атмосферы боксов КЭУ-2:
 - <100 ppm по влаге
 - <200 ppm по кислороду
- На боксе №2 воспроизведена и отработывается прототипная система вентиляции с промышленной арматурой и адекватными МФР масштабами
- Продемонстрирована возможность работы промышленных образцов оборудования в сухой бескислородной среде
- Для обоснования работоспособности СНУП топлива на АО «СХК» создано масштабируемое пилотное производство



Обобщенная диаграмма испытаний СНУП топлива в БН-600



ВНИИНМ
РОСАТОМ

→ КЭТВС-1; (ЧС68, 6,9x0,4 мм, UO₂+СНУП) 3 МКК; 5,5 % т.а. в нитридах, 7,3 % т.а. в оксидах

→ Охл. ПРИ КЭТВС-2; (ЭК164, 9,3x0,6 мм, МОКС+СНУП) 4 МКК; 5,1 % т.а. в нитридах, 7,0 % т.а. в оксидах

→ ВРХ О. ПРИ КЭТВС-3; (ЭП823, 9,7x0,5 мм) 5 МКК; 4,5 % т.а.

→ ПРИ КЭТВС-6; (ЧС68, 6,9x0,4 мм) 2 МКК; 4 % т.а.

→ ВРХ Охл. ПРИ КЭТВС-7; (ЧС68, 6,9x0,4 мм) 4 МКК; 7,5 % т.а.

→ ВРХ Охл. ПРИ ЭТВС-4; (ЭК164, 9,3x0,5 мм) 4 МКК; 5,0 % т.а.

→ ВРХ Охл. ПРИ ЭТВС-5; (ЭП823, 9,7x0,5 мм) 4 МКК; 3,8 % т.а.

→ ЭТВС №8 ВРХ Охл. ПРИ (ЭК164, 9,3x0,5 мм) 5 МКК; 5,9 % т.а.

→ 9 ВРХ Охл. ПРИ 4 МКК; 4 % т.а.

→ ЭТВС №10 ВРХ Охл. ПРИ (ЭК164, 9,3x0,5 мм) 5 МКК; 6,0 % т.а.

→ ЭТВС №11 (ЭП823, 9,7x0,5 мм) ВРХ Охл. ПРИ 10 МКК; 9 % т.а.

→ ЭТВС №12 (ЭК164, 10,5x0,5 мм) ВРХ Охл. ПРИ 6 МКК; 5 % т.а.

→ ЭТВС №13 (ЭП823, 10,5x0,5 мм) ВРХ Охл. ПРИ 6 МКК; 4,5 % т.а.

→ ЭТВС №14 (ЭК164, 10,5x0,5 мм) ВРХ Продолжение испытаний ВРХ Охл. ПРИ 10 МКК; 8,2 % т.а.

→ ЭТВС №15 (ЭП823, 10,5x0,5 мм) ВРХ Продолжение испытаний ВРХ Охл. ПРИ 11 МКК; 8,7 % т.а.

→ ЭТВС №16 (ЭП823, 6,9x0,4 мм) Охл. ПРИ 3 МКК; 6 % т.а.

→ ЭТВС №17 (ЭП823, 6,9x0,4 мм) ВРХ Охл. ПРИ 4 МКК; 7,5 % т.а.

→ ЭТВС №18 (ЭП823, 6,9x0,4 мм) ВРХ Охл. ПРИ 4 МКК; 7,5 % т.а.

→ ЭТВС №22-24 (ЭП823, 9,7x0,5 мм) Продление на 9 мкк ВРХ Охл.

→ ЭТВС №30-32 (ЭП823, 9,7x0,5 мм) Продление на 9 мкк ВРХ

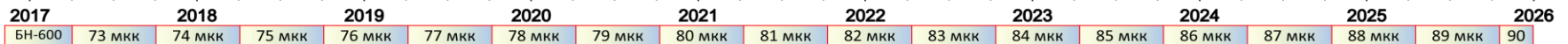
Испытания твэлов в выемных контейнерах на глубину выгорания до 12 % т.а. средн. к 2030 году →

6 МКК с возможностью продления на 7 МКК →

ОС-1-5 (испытания до достижения предельных параметров 12 % т.а. ср.)

→ ЭТВС №26-28 (ЭК164, 9,2x0,55 мм)

→ КЭТВС №25 (ЭК181/ЧС139, Нр, ЭК164)



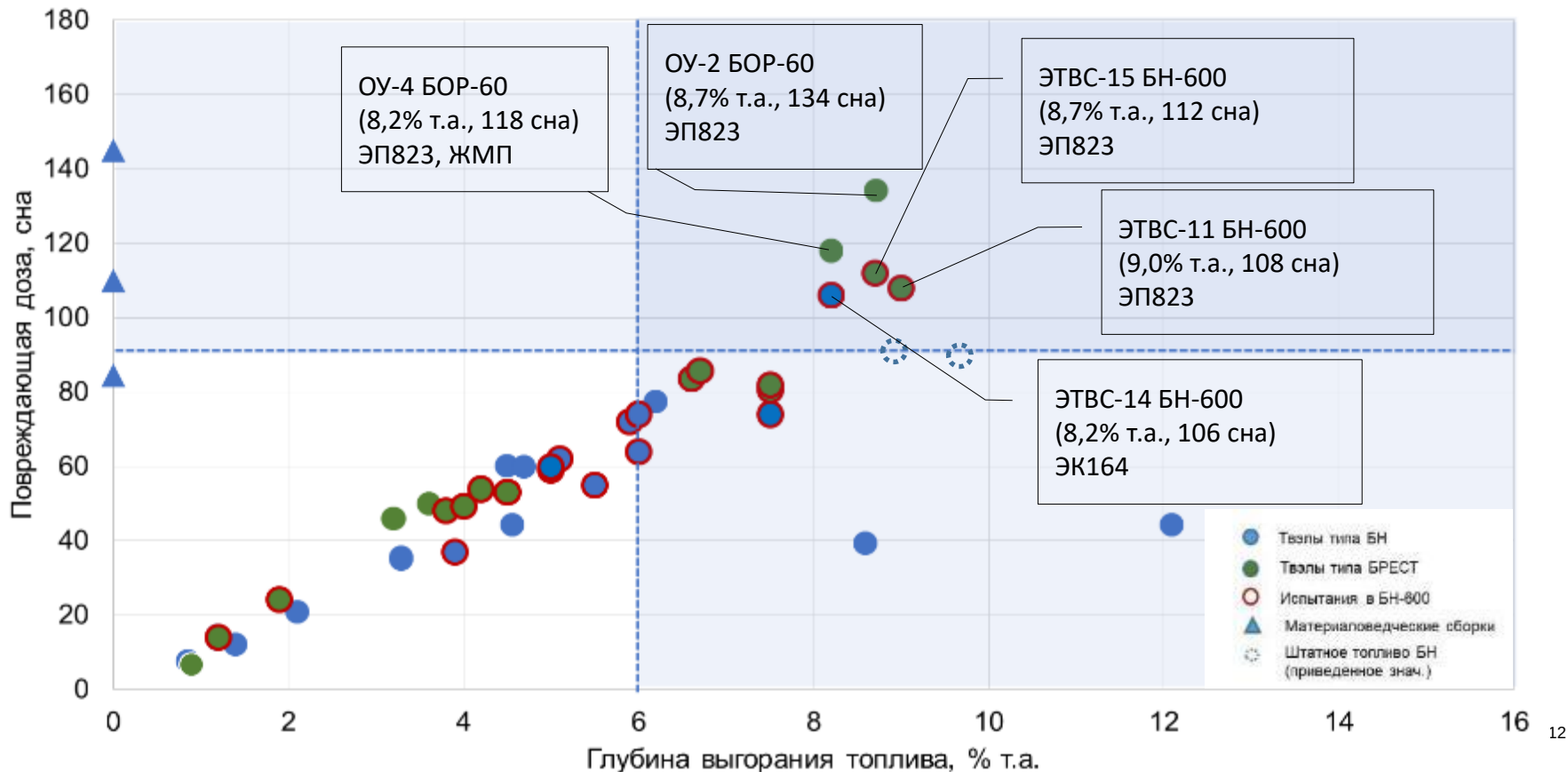
Завершены:

- испытания и сборок №1-18, 32
- ПРИ сборок №1-14, 16-18

Всего облучены/облучаются:
1566 твэл, 29 ЭТВС

В специальных облучательных сборках (ОС) запланировано достижение предельной глубины выгорания 12 % т.а. (средн.) к 2030 году. Результаты могут быть использованы для обоснования испытаний ЭТВС на предельный ресурс уже непосредственно в РУ БРЕСТ.

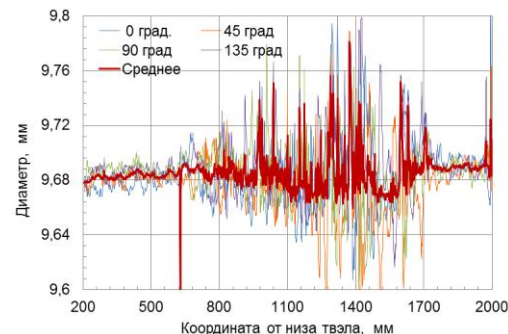
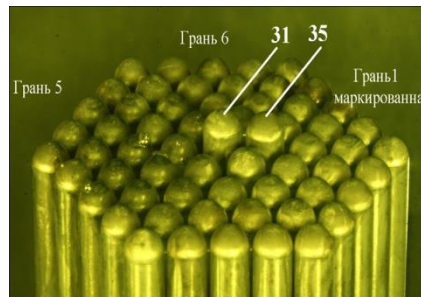
Текущие позиции: достигнутое выгорание СНУП топлива и повреждающей дозы на оболочках ТВЭлов



Эффекты, выявленные на ТВЭлах со СНУП топливом

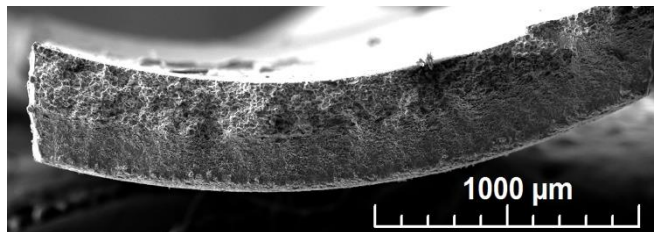
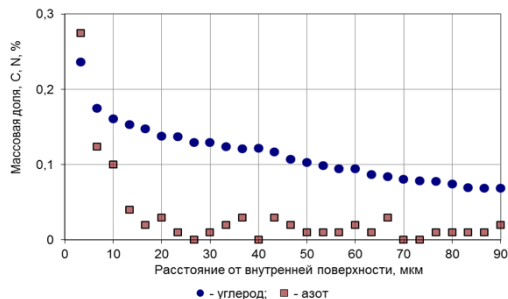
➤ Удлинение/овализация ТВЭла

- ✓ Механическое воздействие топлива на оболочку при переходных режимах удлиняет ТВЭл на несколько миллиметров
- ✓ Характерно для всех типов нитридных ТВЭЛОВ



➤ Науглероживание/азотирование

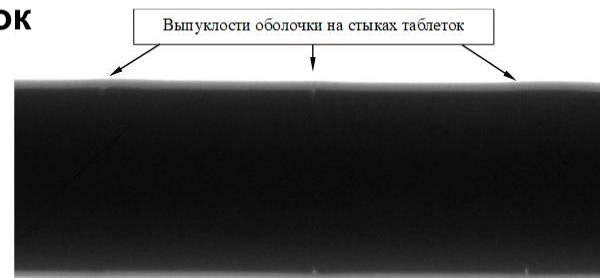
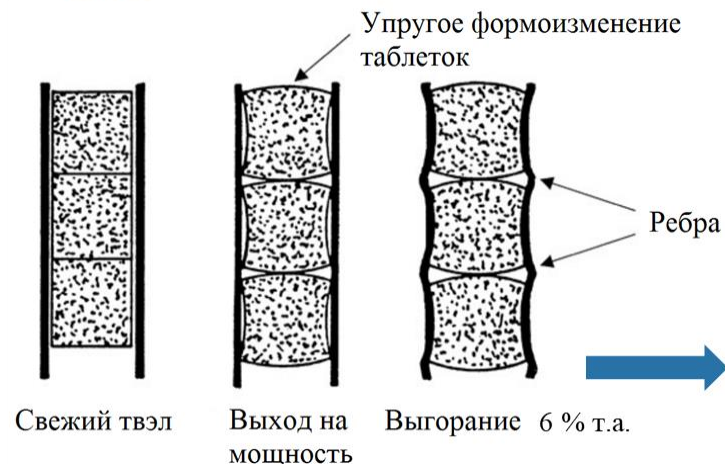
- ✓ Азотирование до 15 мкм
- ✓ Науглероживание до половины толщины оболочки, характерно для ТВЭЛОВ типа БН-1200 с аустенитной оболочкой



Корректировка конструкции

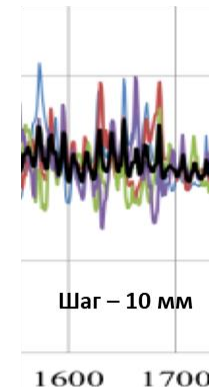
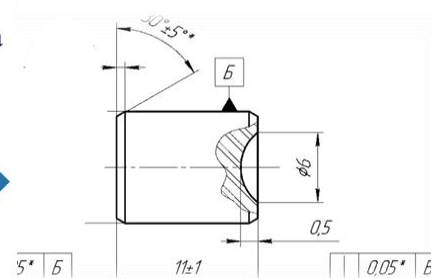
Корректировка конструкции в части таблеток

- ✓ Таблетка измененной формы - фаски и лунки на торцах
- ✓ Лунка будет внедряться на следующих поколениях твэлов



5 мкк; ЭК164; 5,9 % т.а. 71,7 сна

Твэл ЭТВС-8

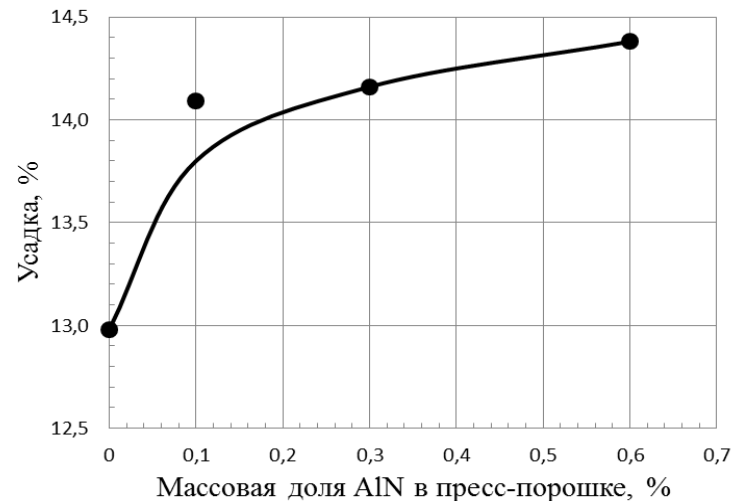
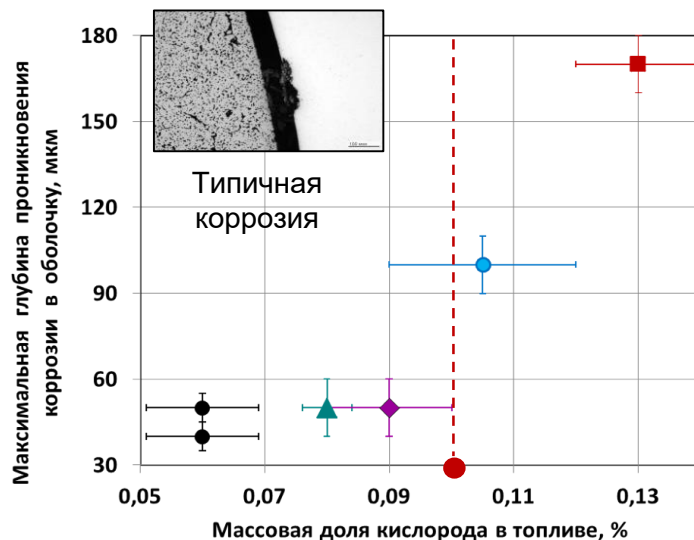


- ✓ Изменение в конструкции учтены в твэлах, проходящих ресурсные испытания (ЭТВС-22-24, ЭТВС-30-32)
- ✓ Обнаруженные эффекты учтены в расчетных кодах

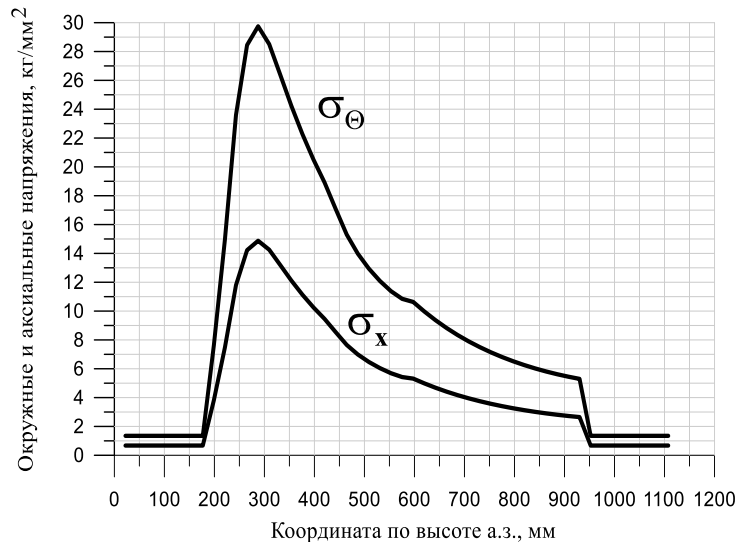
Расчеты и опыт эксплуатации показывает, что корректировка позволит снизить «раннее» воздействие топлива на оболочку

➤ Ключевые позиции корректировки технологии топлива

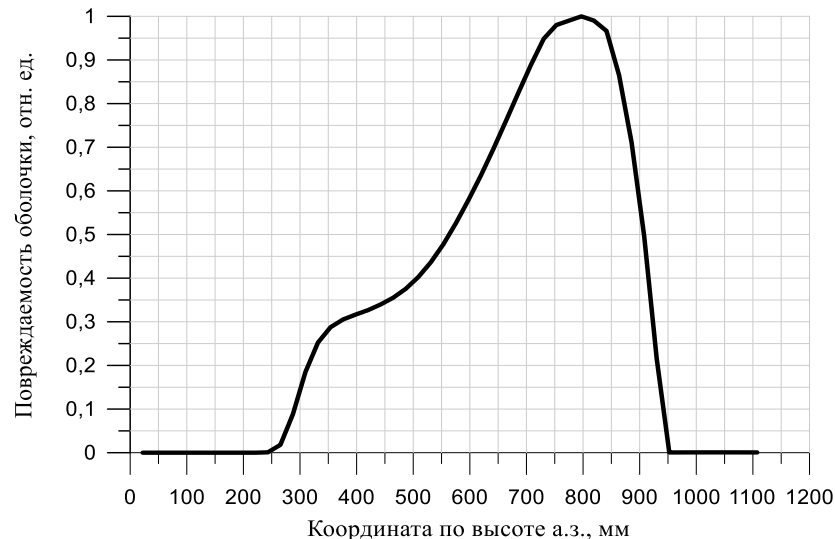
- ✓ Обеспечение содержания кислорода не более 0,1 %
- ✓ Обеспечение доли открытой пористости более 50 %
- ✓ Следующий этап - добавление до 0,3 % AlN в СНУП топлива для снижения температуры спекания



Критические параметры твэла при достижении выгорания ~10 % т.а. макс.



Осевое распределение максимальных окружных σ_{Θ} и осевых σ_x напряжений в оболочке твэла ЭТВС-13

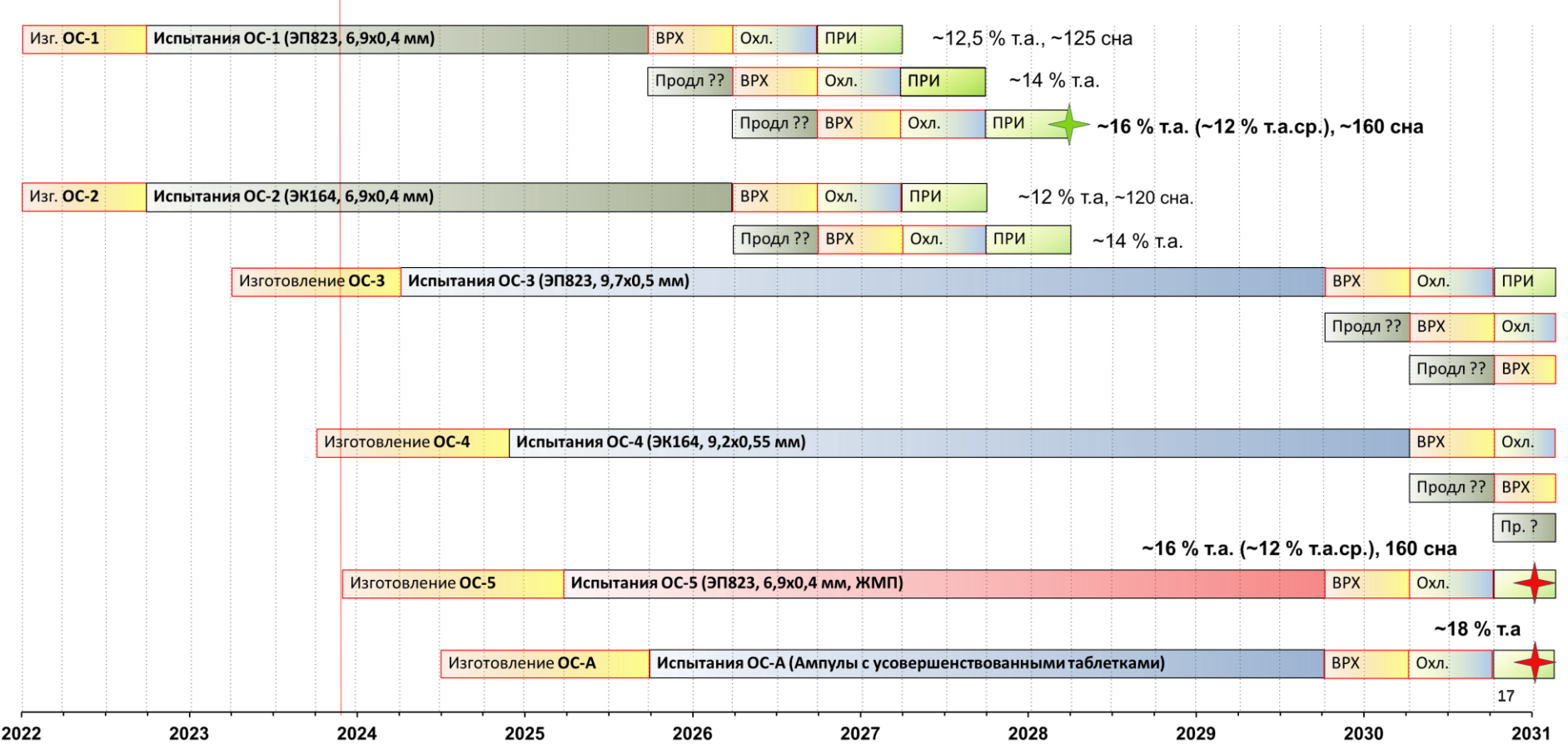


Осевое распределение повреждаемости оболочки ЭТВС-13

Реализация КПРЭО и расчетные исследования показали пути увеличения глубины выгорания топлива:

- Увеличение зазора топливо-оболочка/снижение распухания топлива: применение ЖМП
- Повышение жаропрочности оболочки твэла: применение ДУО

Планы испытаний облучательных сборок (ОС) в БН-600 для достижения предельных параметров



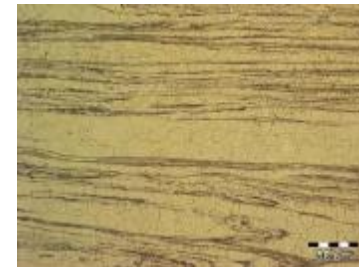
Развитие ДУО-сталей для оболочек твэлов: новый проект

➤ Улучшение микроструктурных параметров

- ✓ Достижение изотропности свойств
- ✓ Достижение размера оксидных частиц менее 25 нм

➤ Создание возможностей для изготовления твэлов с оболочками из ДУО-сталей в требуемом объеме

- ✓ Создание в 2027 г. пилотного участка, обеспечивающего производство не менее 1000 м труб в год
- ✓ Доработка технологий сварки применительно к ДУО-материалам
- ✓ Обоснование в 2030 г. применения ЭП823-ДУО и ЭП450-ДУО для БР-1200 и БН-1200М соответственно
- ✓ Получение свойств в диапазоне температур до 800 °С, **обоснование работы до 750 °С**
- ✓ Разработка оболочки твэла из Fe-Cr-Al в ДУО модификации (ФП-4)



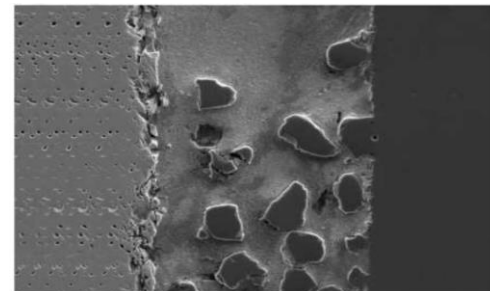
Варианты распределения оксидных частиц



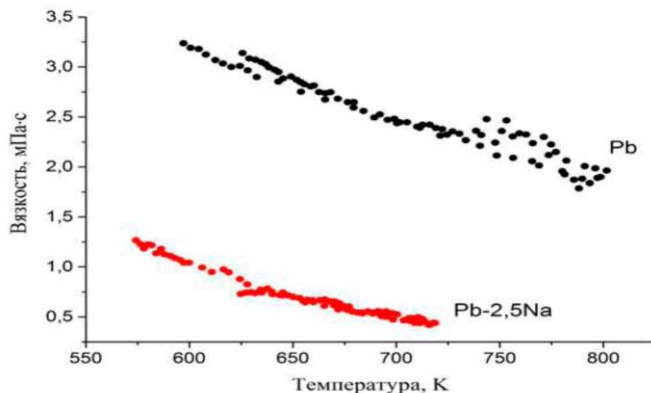
Развитие твэлов с жидкометаллическим подслоем (ЖМП)

➤ Изменение состава ЖМП принципиально меняет перспективу применения такого твэла

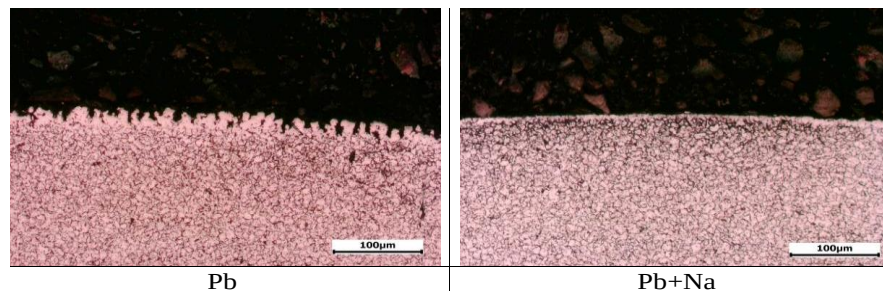
- ✓ Снижение вязкости при переходе к эвтектическому сплаву Pb-2,5Na позволяет снаряжать твэлы с ЖМП по существующей технологии
- ✓ Снижение растворимости ЭП823 в усовершенствованном ЖМП в сочетании с защитными мерами позволяет увеличить ресурс твэла



Главная проблема –
воздействие ЖМП на оболочку



Легирование свинца снизило
вязкость в 3 раза



Лучший комплексный эффект защиты оболочки –
свинец с натрием в присутствии X

Заключение

- ❖ Переходу БН-800 на полную загрузку МОКС топливом предшествовали 50 лет исследований и ОКР
 - Таблеточное МОКС топливо испытано до глубины выгорания 11,8 % т.а. в БН-600
 - Для реализации программы обоснования на ПО «Маяк» создан пилотный опытно-промышленный участок «Пакет», производительность которого доведена до 100 комплектов твэлов (для ТВС) в год
- ❖ По результатам реализации КПРО выпущен технический проект твэла со СНУП топливом для первой загрузки БРЕСТ-ОД-300
 - Для реализации программы обоснования СНУП топлива на АО «СХК» создан пилотный опытно-промышленный участок, производительность которого достигает 10 ЭТВС в год (для БН-600/БН-800)
 - По результатам выполнения комплексной программы обоснования выпущен технический проект твэла первой загрузки для БРЕСТ-ОД-300 (выгорание 6 % т.а., повреждающая доза - 89 сна)
- ❖ Целевой с экономической точки зрения глубины выгорания 12 % т.а. (средн.) планируется достичь за счет изменения конструкции твэла
 - Снижение механического воздействия топлива на оболочку планируется достичь за счет введения усовершенствованного жидко-металлического свинцово-натриевого подслоя
 - Экстремально больших ресурсов твэла планируется достичь путем применения дисперсно-упрочненных материалов оболочек, обладающих повышенной жаропрочностью

Спасибо за внимание

Скупов Михаил Владимирович

Заместитель генерального директора – директор отделения АО «ВНИИНМ»

Тел.: +7 (499) 190 89 99, доб. 8400

Эл. почта: MVSkupov@bochvar.ru

www.bochvar.ru