



ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Разработка и обоснование ядерного топлива для быстрых реакторов в ПН «Прорыв»

Мочалов Ю.С., Грачев А.Ф., Жеребцов А.А., Забудько Л.М.

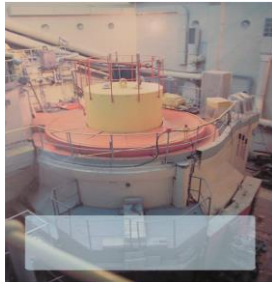
КРУГЛЫЙ СТОЛ «История и перспективы ядерного топлива»

АО «МСЗ», г. Электросталь, Московская область

14-15 сентября 2023 года

Отечественные быстрые реакторы

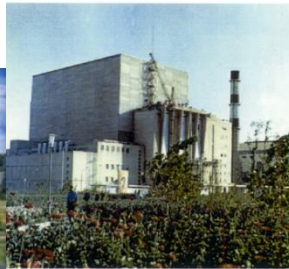
Россия (СССР): наибольший опыт эксплуатации быстрых натриевых реакторов (более 145 реакторо – лет): ~ 45% всего мирового опыта



БР-5/10
(1959-2002,
Обнинск)



БОР-60
(1969, Димитровград)



БН-350
(1972-1990, Актау,
Мангышлак)



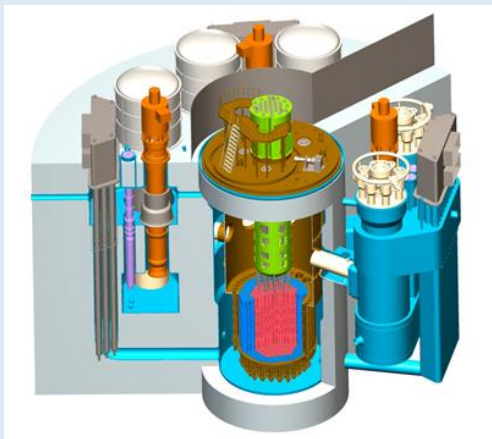
БН-600
(1980, Заречный)



БН-800
(2015, Заречный)

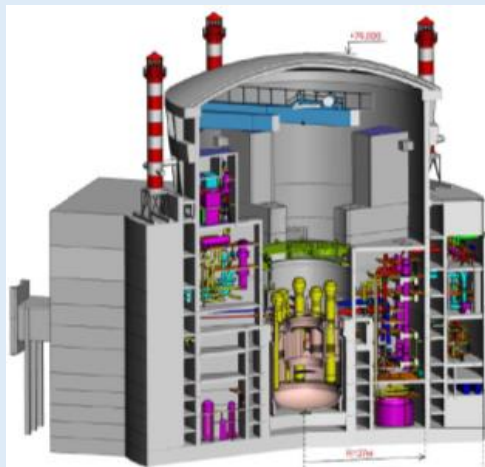
МБИР и БН-1200 с Na теплоносителем – стадия разработки
БРЕСТ-ОД-300 и БР-1200 со свинцовым теплоносителем – стадия строительства, разработки

Реакторные установки ПН «Прорыв»



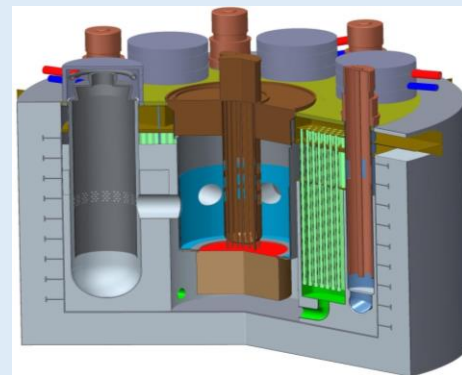
БРЕСТ-ОД-300
 $W_{\text{эл}} \text{ энергоблока} = 300 \text{ МВт}$,
первый бетон 8 июня 2021г.

2027г



БН-1200М
 $W_{\text{эл}} = 1250 \text{ МВт}$ -
разработка

2031



БР-1200
 $W_{\text{эл}} = 1255 \text{ МВт}$ -
разработка

2032

Критерии выбора топливной композиции

- Совместимость с конструкционными материалами и теплоносителем
- Высокая радиационная стойкость.
- Высокая теплопроводность (снижение запасенной энергии, снижение температуры и повышение запаса до плавления)
- Высокая температура плавления
- Высокая доля тяжелых атомов
- Наличие дешевых технологий регенерации и фабрикации

С точки зрения влияния на базовые характеристики активных зон и безопасность три свойства **топлива** играют существенную роль: **плотность, теплопроводность и удельное количество рассеивающих легких элементов (кислород, углерод и азот)**. Более высокая плотность топлива и меньшее количество легких элементов способствует росту коэффициента воспроизводства в активной зоне реактора (КВА) и интегральному коэффициенту воспроизводства (КВ) по РУ.



MOX таблетки



СНУП таблетки

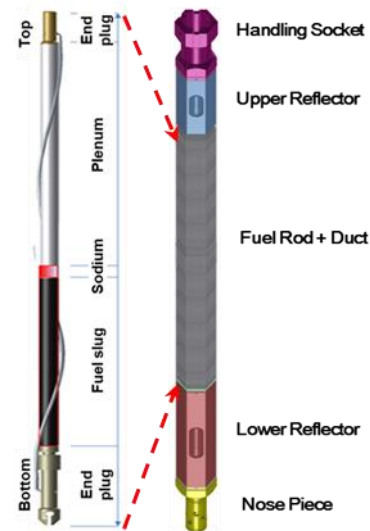


U-10Zr стержни

Требования к топливу реактора на быстрых нейтронах (РБН)

На начальных этапах разработки РБН наибольшее внимание уделялось высокому КВ. Однако для РУ БОР-60, БН-350, БН-600, БН-800 было выбрано оксидное топливо. Оксид использован в РУ Phenix, Super-Phenix (Франция), PFR (Великобритания), Joyo, Monju (Япония), CEFR (КНР) После аварий на EBR-I (1956 г.) и Fermi (1966г.) проекты РУ FFTF и Clinch River были переориентированы с металла на оксид и в США. Выбор был сделан в пользу оксида из-за высокой температуры плавления, радиационной стабильности и **технологической общности с топливом водо-водяных реакторов.**

В настоящее время на первое место вышли проблемы безопасности, в том числе, экологической, конкурентноспособности, накопления ОЯТ и РАО, нераспространения, оптимального использования природных ресурсов. **В качестве перспективы все страны – разработчики РБН рассматривают плотные виды топлива.**



PGSFR fuel rod and assembly

[SFR Advanced Fuel PMB meeting, 7-9 September 2021]

Отечественный и зарубежный опыт исследований плотных видов топлива реакторов БН



- Хотя металл имеет макс. теоретическую плотность, нитрид практически не уступает легированному металлическому топливу, в котором Zr и увеличенная пористость, необходимая для снижения распухания и увеличения ползучести, снижают его плотность.
- Фазовые переходы Me и особенно его взаимодействие со стальными оболочками с образованием легкоплавких эвтектик: 510°C для Pu – ниже температуры теплоносителя на выходе из активной зоны, 710°C для U, 750°C для (U+15%Pu+10%Zr) определяют малые запасы до разрушения в авариях с ростом температуры, либо требуют снижения температуры теплоносителя.
- По сравнению с Me, карбид и нитрид обладают лучшей совместимостью с оболочечными материалами, особенно, в аварийных условиях.
- И для металла, и для оксида характерен один общий недостаток – они работают при температурах топлива, близких к температуре плавления, то есть, запас до плавления у этих видов топлива невелик, в отличие от карбида и нитрида

См. Журнал РАН “Энергетика” №2, 2015 , стр. 3-15. Адамов Е.О., Забудько Л.М., Матвеев В.И., Рачков В.И., Троянов В.М., Хомяков Ю.С., Леонов В.Н. Сравнительный анализ преимуществ и недостатков использования металлического и нитридного смешанного уран-плутониевого топлива в быстрых реакторах

История создания нитридного топлива в России

Годы изготовление - облучение	Реактор	Топливо	Организация
Начало 1970х – 2002	БР-10	UN UPuN (эксп)	АО «ГНЦ РФ ФЭИ» (Обнинск)
Начало 1980х – 2005	БОР-60	UN; (U,Pu)N	АО«ГНЦ НИИАР» (Димитровград)
ПН «ПРОРЫВ» с 2011 г.	БН-600; БОР-60; МИР; ИВВ-2М	(U,Pu)N	БАЭС, АО«ГНЦ НИИАР», АО«ИРМ», АО«ВНИИНМ», АО«СХК», ФГУП «НИИ НПО «Луч»



Смешанное нитридное уран-плутониевое топливо в ПН ПРОРЫВ

- Позволяет создать равновесную активную зону - защита от реактивной аварии
- Уменьшает запасенную энергию - безопасность при тяжелых авариях
- Снижает рабочую температуру топлива существенно ниже температуры его плавления - запас по безопасности
- Положительный отечественный опыт по изготовлению и поведению под облучением нитридов



Создание смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива и твэлов: КПрЭО



- ❖ «Комплексная программа расчетно-экспериментального обоснования плотного топлива для реакторов на быстрых нейтронах» (КПрЭО).
- ❖ Цель - обоснование работоспособность твэлов со СНУП топливом **стартовых активных зон** РУ БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200.
- ❖ Работы по КПрЭО завершены в 2020г. (ФЦП ЯЭНП)

Изм. № 00-495 ПР

24.03.15

ИННОВАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ПРОЕКТА «ПРОРЫВ»
ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»
УДК 621.039.546; 621.039.526; 621.039.543.4

СОГЛАСОВАНО

Научный руководитель
ПН «Прорыв»

Е.О. Адамов
« 3 » 2015г.

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель Генерального директора-
директор блока по управлению инновациями
«Росатом»

В.А. Першуков
« 3 » 2015г.

КОМПЛЕКСНАЯ ПРОГРАММА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ОБОСНОВАНИЯ ПЛОТНОГО ТОПЛИВА
ДЛЯ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ
(2-Я РЕДАКЦИЯ)

Старший вице-президент ОАО «ТВЭЛ»

П.И. Лавренко
« 1 » 2015г.

Заместитель генерального
директора ОАО «Концерн Росэнергоатом»

В.Г. Асмолов
« 1 » 2015г.

Генеральный директор ОАО «ВНИИМ»

Исх. № 792/700-2 В.Б. Иванов
От 29.12.2014г.

Руководитель ОАО «ГНЦ НИИАР»

Исх. №64-1000/1986 С.В. Павлов
От 25.12.2014г.

Главный конструктор РУ БН
АО «ОКБМ Африкантов»

Исх. №041-66.8/12660 Б.А. Васильев
От 26.12.2014г.

Заместитель Генерального
директора ФГУП «ГНЦ РФ ФЭИ»

Исх. № 224/29-89/4561к В.М. Поплавский
от 22.12.2014г.

Директор ИБРАЭ РАН

Исх. № 14407/61-0/45 Л.А. Большов
« 25 » 02 2015г.

Директор ИГЯТ НИЯУ «МИФИ»

Исх. №11-80/214 Э.М. Глазовский
От 23.12.2014г.

Главный инженер АО «ССК»

Исх. №11-80/01-12/1810 А.С. Козырев
От 24.12.2014г.

Научный руководитель РФЯЦ ВНИИТФ

Исх. № 195-3-47/42 Г.Н. Рыкованов
От 24.12.2014г.

Главный технолог ПН «Прорыв»

« 11 » 02 2014г.
В.М. Троянов

Научный руководитель НИОКР
ПН «Прорыв»

« 1 » 2014г.
В.И. Рачков

Главный конструктор ПН «Прорыв»

« 11 » 12 2014г.
А.В. Делуя

Главный конструктор проекта БН-1200
АО «ОКБМ Африкантов»

Исх. № 041-66.8/12660 С.Ф. Шенелев
от 26.12.2014г.

Главный конструктор РУ БРЕСТ
АО «НИКИЭТ»

« 21 » 12 2014г.
В.В. Лемехов

Заместитель директора ОАО «ВНИИИМ»,
руководитель ЦО «Разработка твэл и ТВС
со СНУП, технологий и оборудования для
их производства»

« 1 » 2014г.
М.В. Скупов

Главный специалист ИТЦП «Прорыв»,
НР ОП «Разработка твэл и ТВС
со СНУП, технологий и оборудования...»

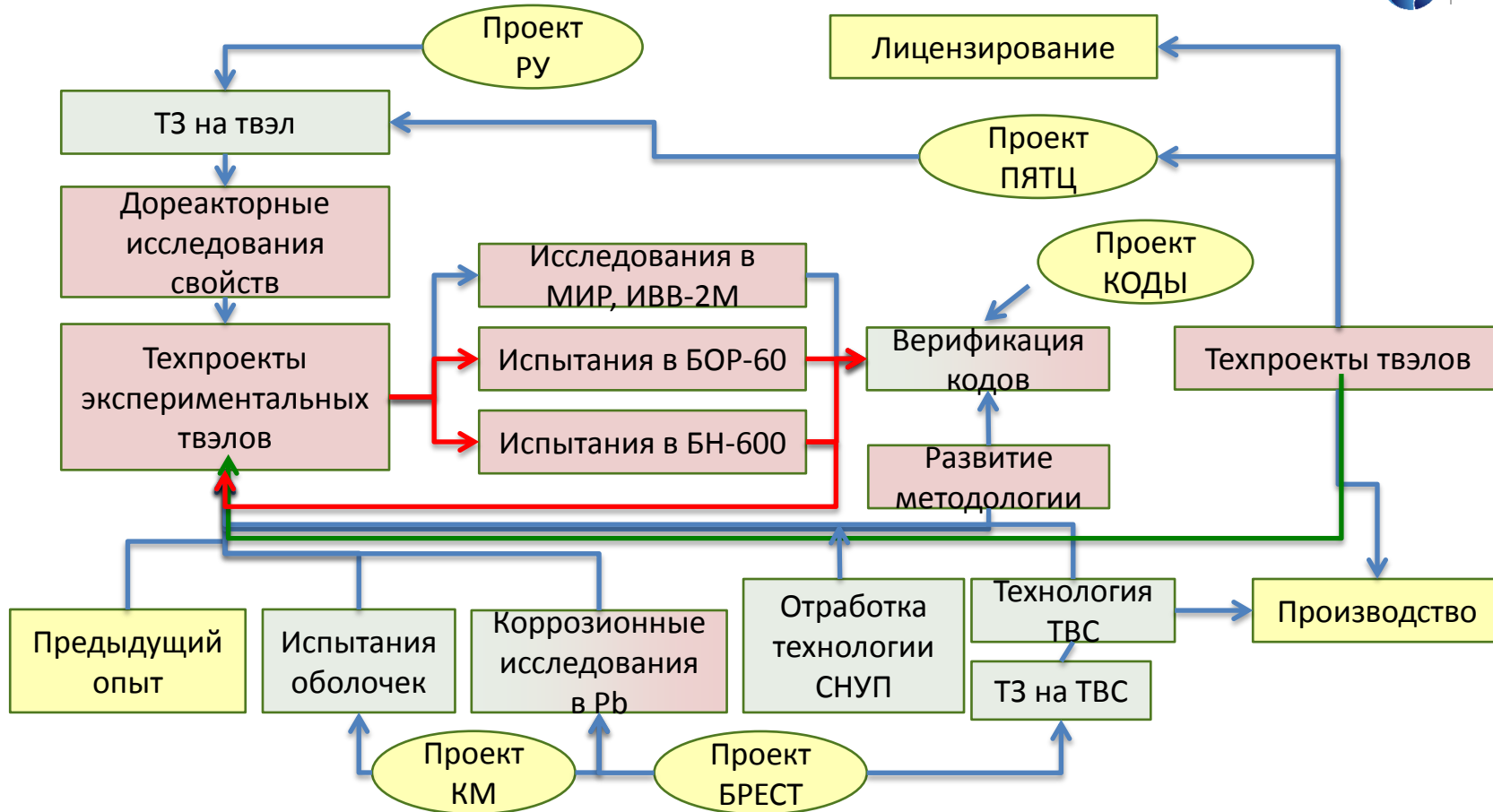
« 11 » 12 2014г.
Л.М. Забудько

Ведущий технолог ИТЦП «Прорыв»

« 11 » 12 2014г.
А.Ф. Грачев

г. Москва, 2015

Структура работ по обоснованию СНУП топлива



Разработка методов, кодов и критериев для обоснования работоспособности СНУП твэлов

Должны быть разработаны:

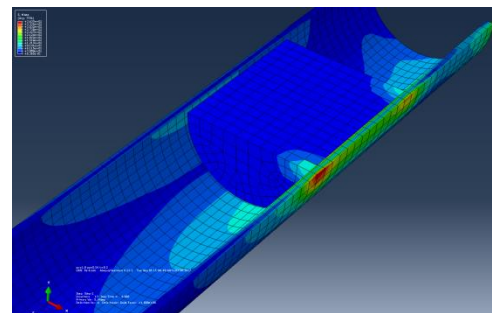
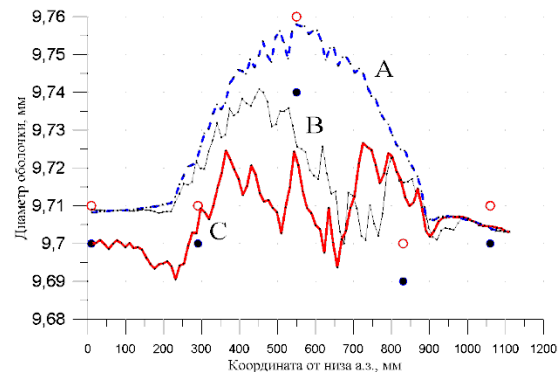
- методы и алгоритмы расчёта НДС и температурного состояния твэлов в проектных условиях (проект «КОДЫ») (КНП и Проектные коды)
- проектные критерии обоснования работоспособности и максимальный проектный предел повреждения твэлов.

Необходимы верификация методик и программных средств

Сроки выполнения работ должны обеспечивать :

- на I этапе - выполнить обоснование безопасности испытаний твэлов со СНУП топливом и оболочками твэлов из новых материалов в новой геометрии в составе экспериментальных ТВС в реакторе БН-600;
- на II этапе - выполнить обоснование твэлов в объёме ТП для стартовых активных зон РУ БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200 и получить разрешение Ростехнадзора на эксплуатацию этих РУ.

Созданы коды КОРАТ (АО «ВНИИНМ»), ДРАКОН (АО «ГНЦ РФ ФЭИ»), БЕРКУТ (У) – ИБРАЭ РАН



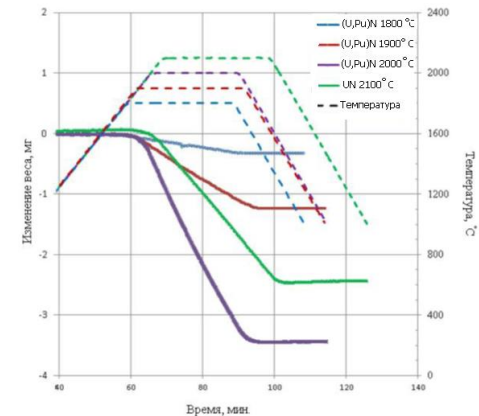
Разработка современных методик высокоточных исследований теплофизических и механических характеристик СНУП топлива.



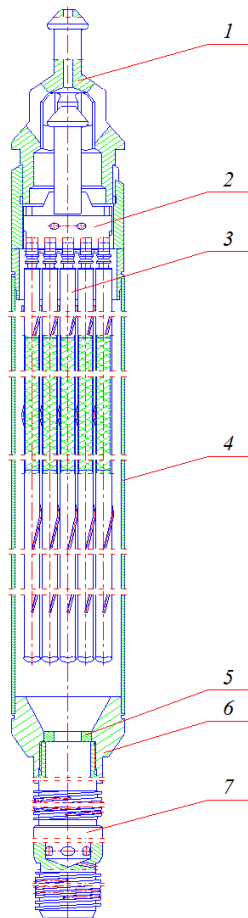
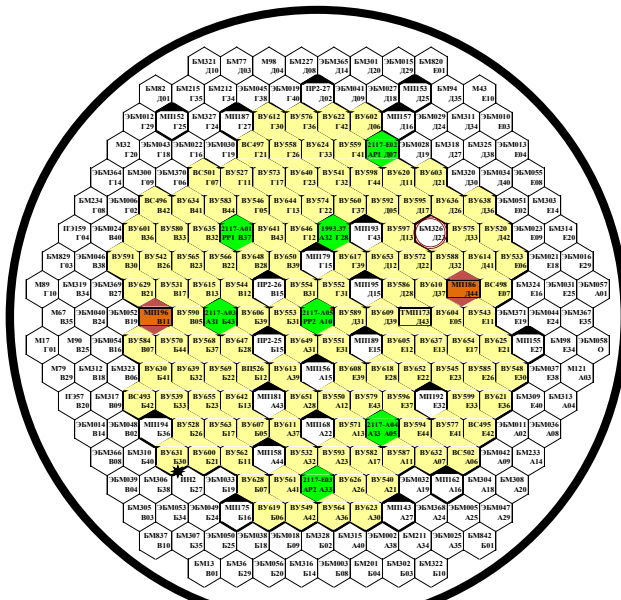
Созданы боксированные стенды и разработана методика для исследования термохимической стабильности, теплоемкости и теплопроводности; высокотемпературной ползучести; упругих свойств образцов СНУП топлива (ВНИИНМ, МИФИ, ВНИИТФ). Проведена аттестация и внедрение методик

Получено

- Модули Юнга и Пуассона, КЛТР нитридов плотностью 80% -89% т.п., Pu (0 – 15)% масс., температуры (100°C -1600°C). Рекомендованы необходимые для расчетов зависимости
- Теплоемкость и теплопроводность: плотность 75% - 95%, Pu (0 -50)% масс; 1600°C. Рекомендованы расчетные зависимости.
- Скорость термической ползучести: плотность 77-90%, Pu (0-20%), T=1150°C-1450°C при $\sigma=(10 - 40)$ МПа. Исследования продолжаются
- Термохимическая стабильность UN, PuN, UPuN с Pu = 9,8%, 12%, 20%, 50%, T_{макс} = 2100°C, в вакууме и аргоне с добавкой азота. Исследования продолжаются.



Испытания в реакторе БОР-60 (ОУ)



Разборное облучательное устройство (ОУ) БОР-60.

В соответствии с КПрЭО, начиная с 2012 г. по 2015 г. в БОР-60 загружено 9 ОУ Со СНУП топливом разных составов, плотностей, типоразмеров и материалов оболочки.

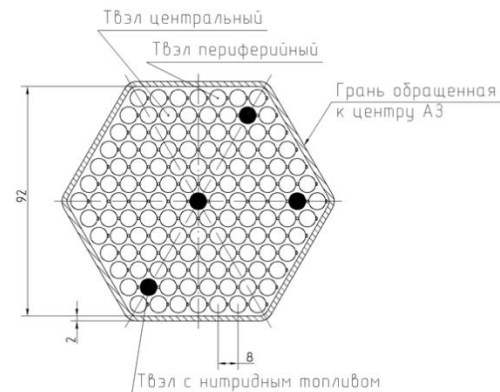
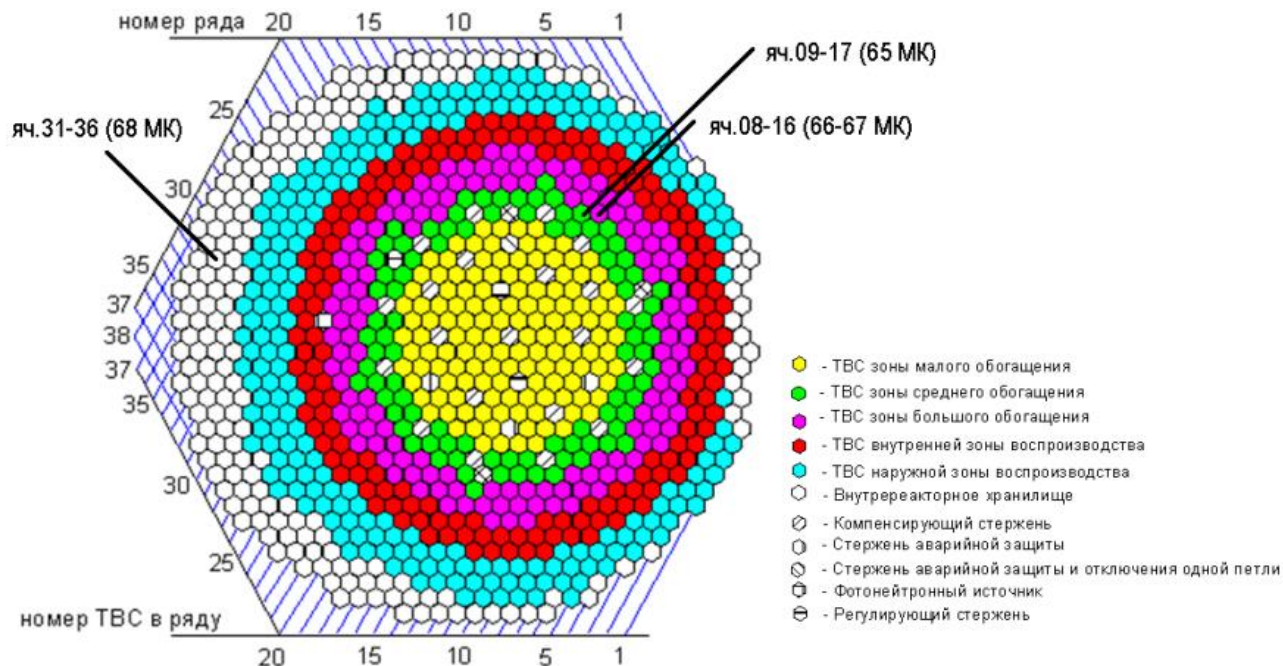
ОУ-10 с 19-ю твэлами типоразмера 6.9x 0,4 мм с ф-м оболочками ЭК181 и ЧС139 и **ОУ-16** с 7-ю твэлами типа БРЕСТ, СНУП топливо с Np и Am , загружены в конце 2018г.

В связи с финансовой оптимизацией в 2018г. принято решение остановить облучение всех ОУ, кроме **ОУ-2,-4,-10.**

ОУ-16 выгружена по плану. ОУ-5 выгружена ранее из-за разгерметизации (перекрытие проходных сечений в ОУ).

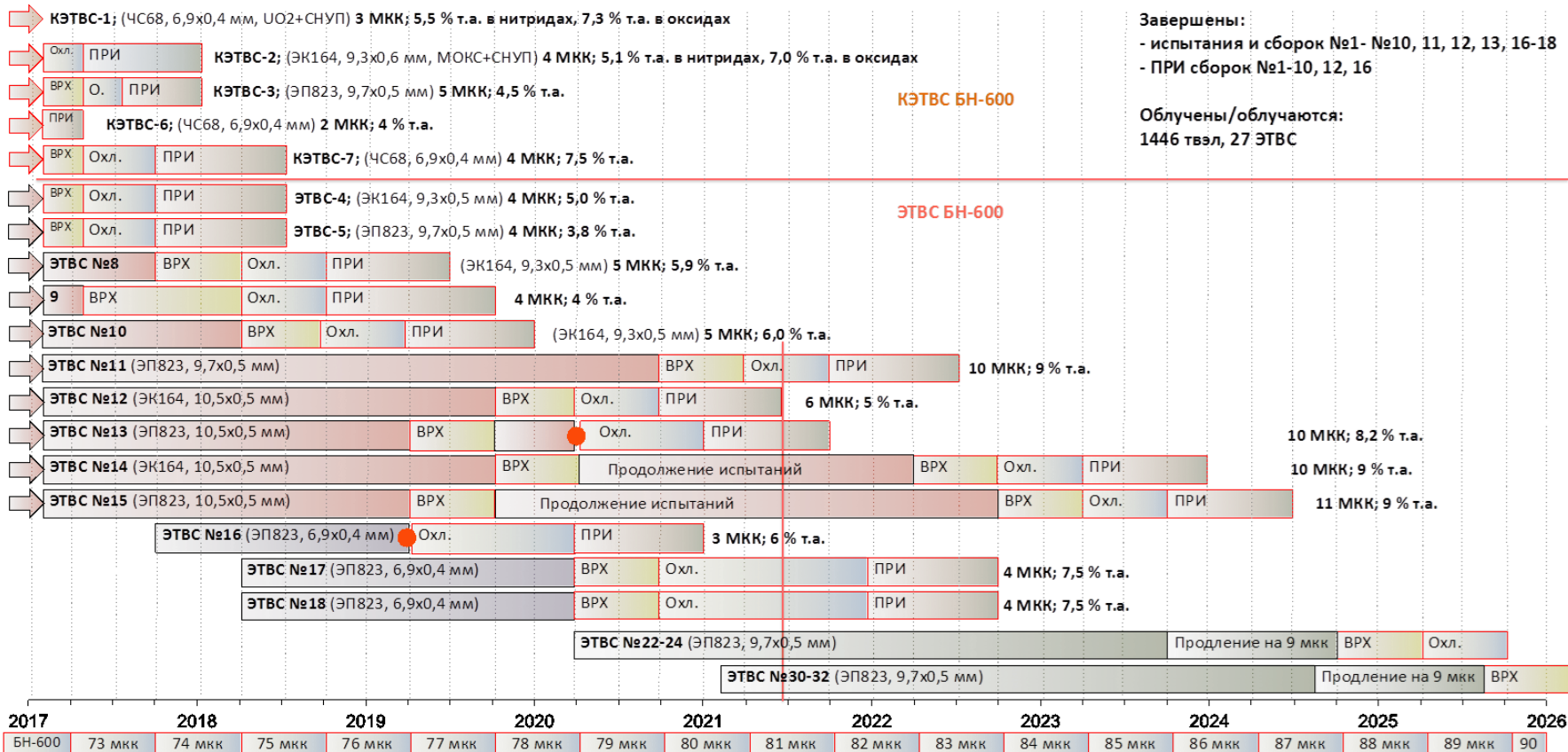
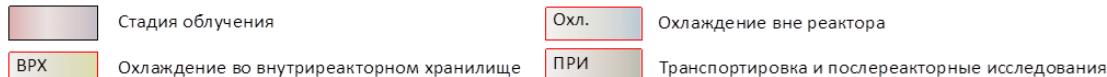
В 2020-2021 загружены **ОУ-11** с решетками и **ОУ-20** с усовершенствованным топливом.

Испытания в реакторе БН-600 (КЭТВС, ЭТВС)

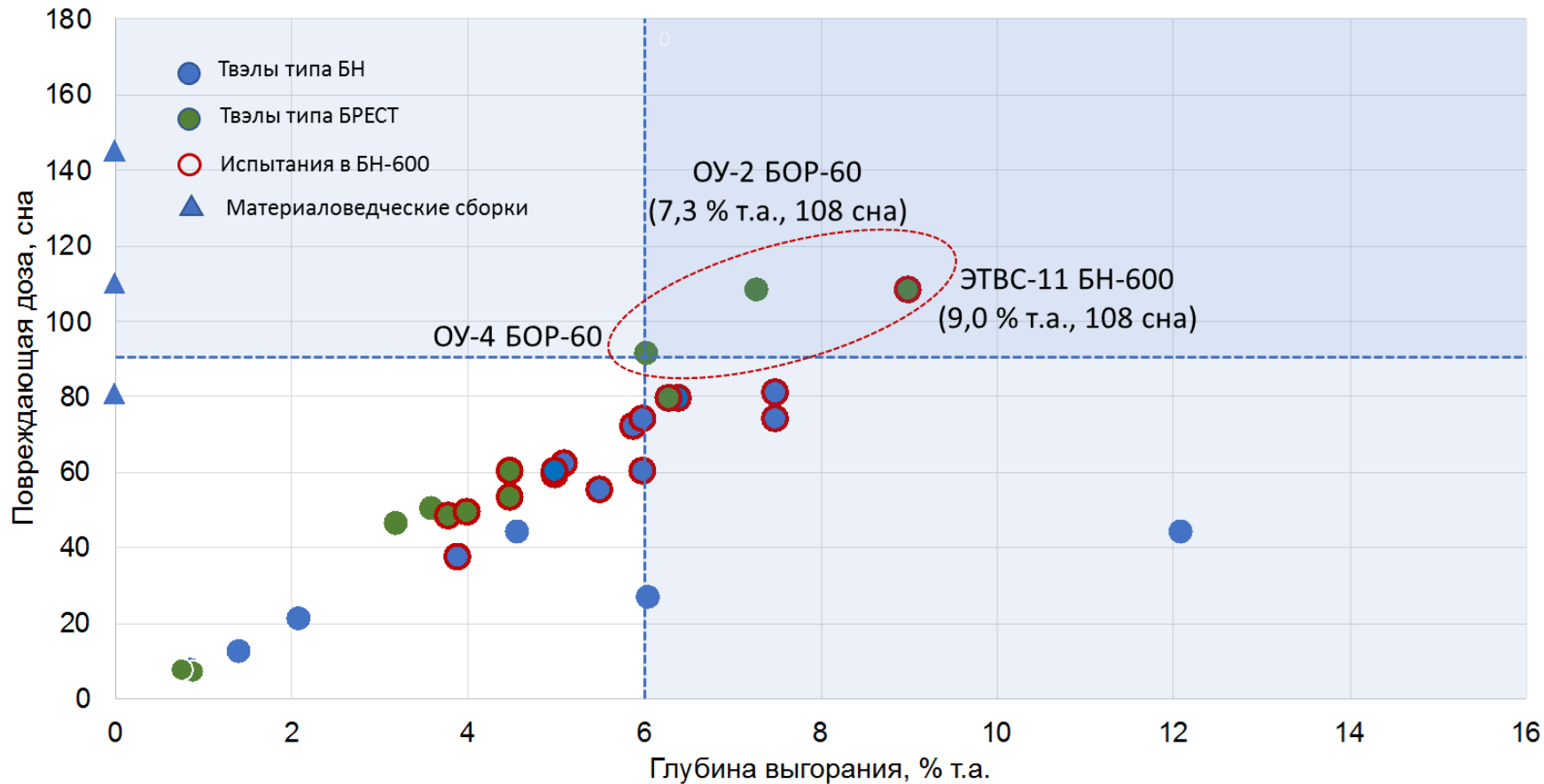


КЭТВС-1 БН-600

Статус испытаний СНУП топлива в БН-600 и ПРИ



Достигнутые показатели испытаний СНУП топлива (2021г)



Результаты выполнения КПрЭО



ТЕХНОЛОГИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА

- Созданы лабораторные установки для изготовления и исследования смешанного нитрида:

АО «ВНИИНМ» – топливо и ТВЭЛы для реакторов БН-600, МИР, ИВВ-2М, БОР-60;

АО «ГНЦ НИИАР» – топливо и ТВЭЛы с МА, а также ЭТВС БОР-60, послереакторные исследования.

- Созданы экспериментальная и пилотная установки для изготовления топлива, ТВЭЛОВ и ЭТВС БН-600 (до 12 ТВС/год) на АО«СХК»



Конструкторская и технологическая документация на изготовление СНУП топлива, а также методики аналитического и материаловедческого сопровождения изготовления СНУП топлива подтверждены метрологической экспертизой ГНМЦ ГК «Росатом»

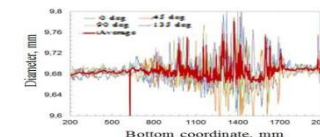
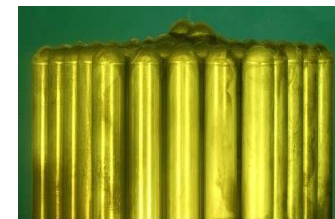
Результаты выполнения КПрЭО



**ДОСТИГНУТЫ
ПОСТАВЛЕННЫЕ
В КПрЭО ЦЕЛИ**

Обеспечена реализация без отклонений Программа загрузки СНУП-топлива в БН-600. С весны 2013 г. по весну 2021 г. в активную зону БН-600 загружены 24 ЭТВС (1560 ТВЭЛОВ с различной геометрией и материалами оболочки).

- В 2022 году завершены ПРИ 14-ти ЭТВС БН-600 и твэлов 3-х ОУ БОР-60. Получены экспериментальные данные по исходным свойствам СНУП топлива и по влиянию облучения, необходимые для верификации топливных кодов, а также для оценки работоспособности экспериментальных твэлов, для получения разрешения на облучение в реакторе БН-600 до выгорания $\geq (8-9) \%$ т.а., повреждающая доза ~ 110 сна.
- Проведен анализ данных ПРИ, сформулированы потенциально опасные для целостности твэла факторы (*формоизменение оболочки из-за локального взаимодействия с таблеткой, коррозия, охрупчивание оболочки*), даны рекомендации по совершенствованию конструкции твэла и таблетки, состава топлива, а также получены аргументы, необходимые для продления облучения ЭТВС в БН-600.
- Проведены претестовые расчеты всех исследованных твэлов КЭТВС-1,-2,-3,-4,-6,-7, ЭТВС-4,-5,-8,-9,-10,-11,-12,-13,-14, -16 до завершения их ПРИ, результаты направлены в АО «ГНЦ НИИАР».
- Продолжается облучение 5ти ЭТВС, топливные таблетки с фасками.



[F.N. Kryukov et al Nuclear Engineering and Design, Volume 384, 2021, 111463, ISSN 0029-5493]



Результаты выполнения КПрЭО



ОБОСНОВАНИЕ СТАРТОВОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ БРЕСТ –ОД-300

На базе расчетно-экспериментального обоснования разработан Технический проект «Элемент тепловыделяющий ТВС реакторной установки БРЕСТ-ОД-300»

- Обоснование работоспособности твэла БРЕСТ проведено с использованием модернизированной версии кода **КОРАТ** при поддержке аттестованного кода **ДРАКОН-М 2.0** (независимые параллельные расчеты).
- Максимальное выгорание смешанного топлива $\geq 6\%$ т.а. в твэлах с оболочкой из стали ЭП823-Ш достигнуто в твэлах ОУ-2 БОР-60, ЭТВС-11, ЭТВС-15, ЭТВС-16, ЭТВС-17, ЭТВС-18 БН-600, общее количество твэлов – более 300.
- В результате верификации и модернизации топливных кодов **КОРАТ** (АО «ВНИИНМ»), **ДРАКОН** (АО «ГНЦ РФ ФЭИ», **БЕРКУТ** (ИБРАЭ РАН) по результатам ПРИ снят консерватизм, что позволяет обосновать возможность увеличения ресурса ЭТВС БН-600, по сравнению с КПрЭО (успешно реализовано при продлении облучения ЭТВС-11 (9% т.а, 108 сна), ЭТВС-15 (8,7% т.а., 112 сна) типа БРЕСТ, ЭТВС-14 (8,2% т.а, 106 сна) типа БН-1200.

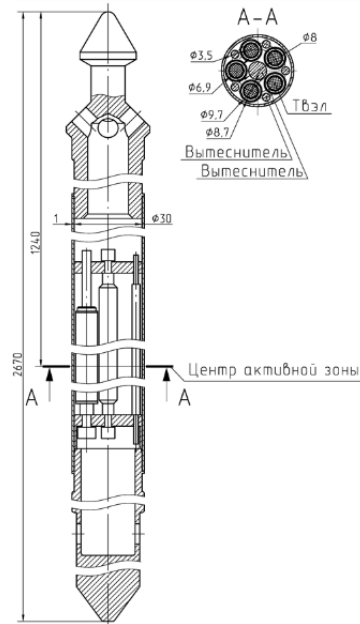


Программа 12% т.а. (ср)



Для достижения целей ПН «ПРОРЫВ» по обеспечению конкурентных преимуществ разрабатываемых энергоблоков создана Программа НИОКР «Разработка смешанного нитридного уран-плутониевого СНУП топлива со средним выгоранием 12%т.а.»

Разработка облучательных сборок (ОС) БН-600 для испытаний твэлов до предельных параметров.



Выемные контейнеры ОС-1 и ОС-2

Развитие технологий твэлов с легированным свинцовым подслоем.



Завершены ПРИ 2х твэлов с 6% т.а, 93 сна. Получены положительные результаты облучения твэлов в составе ОУ-4 БОР-60.

Разработана технология формирования подслоя, имеющая промышленный потенциал.

Итоги выполнения НИОКР по СНУП топливу и оборудованию МФР



- **Достигнутая глубина выгорания СНУП-топлива в реакторе БН-600 9,0 % т.а. превышает глубину выгорания, запланированную для первых загрузок активной зоны реактора БРЕСТ-ОД-300.**

- **Апробированные технологические и конструкторские решения служат исходными данными и основой для разработки как промышленных технологий, так и проектных решений производства СНУП топлива для РУ БРЕСТ-ОД-300.**

- **С 2011 г. пройдены стадии от лабораторных исследований до промышленной реализации, включая отработку опытных образцов оборудования на пилотной технологической линии.**

- **Созданы уникальные автоматизированные экспериментальные комплексы, позволяющие изготавливать нитридное уран-плутониевое топливо в условиях полностью осушенной азотной внутрибоксовой атмосферы.**

- **В настоящее время осуществляется монтаж технологических линий в АО «СХК», в 2023 году начаты пуско-наладочные работы, а в 2024 году начнётся фаза освоения производства топлива на МФР.**



ПРОРЫВ
РОСАТОМ

**Спасибо
за внимание**

