



# Цели и задачи разработок активных зон реакторов БН

**Васильев Борис Александрович**

Главный конструктор активных зон БН  
АО «ОКБМ Африкантов»

Всероссийская научно-техническая конференция  
«Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики»

г. Обнинск, 27-29 ноября 2019 г.

# Введение

---

- Основные цели при разработке активных зон реакторов БН:
  - ✓ создание конструкций активных зон с  $KВ > 1$
  - ✓ обеспечение безопасности реакторов
  - ✓ достижение высоких экономических показателей топливного цикла и реакторов
- Дополнительная цель:
  - ✓ выжигание младших актинидов, как минимум собственных

Задачи по разработке конструкций активных зон для достижения указанных целей менялись при переходе от проекта к проекту

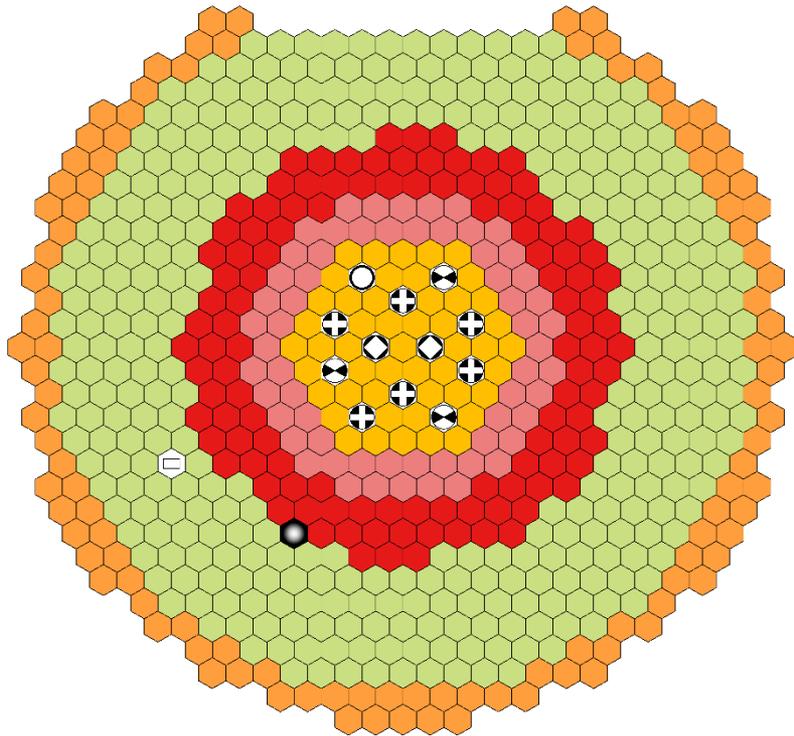
# Разработанные проекты

(реализованные и на уровне технических проектов)

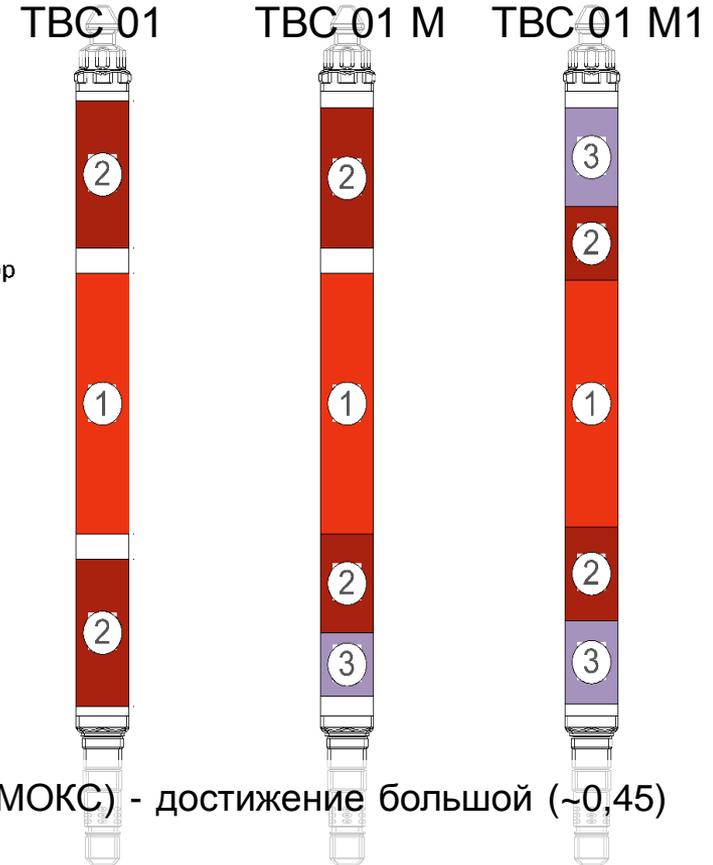
Реакторы	Активные зоны
1962 г. - БН-350, пуск в 1973 г. топливо $UO_2$	01 – базовая конструкция 01 М – первая модернизация 01 М1 – вторая модернизация
1967 г. - БН-600, пуск в 1980 г. топливо $UO_2$	01 – базовая конструкция 01 М – первая модернизация 01 М1 – вторая модернизация 01 М2 – третья модернизация
1996 г. (1976 г. – первый проект) - БН-800, пуск в 2016 г. топливо – МОКС, на начальном этапе также и $UO_2$	01 – базовая конструкция 1985г. 01 Г – гибридная активная зона (для начального этапа эксплуатации)
1981 г. - БН-1600, топливо – МОКС	01 – базовая конструкция (Для перспективы были проработаны активные зоны с перспективными видами топлива: $UPuC$ , $UPuN$ )
1992 г. - БН-1600М, топливо – МОКС	01 – базовая конструкция (Для перспективы были проработаны гетерогенные оксидно-металлические компоновки активных зон)
2014 г. - БН-1200, топливо – СНУП или МОКС	01 – активная зона со СНУП топливом 01 – активная зона с МОКС топливом

# Активная зона реактора БН-350

Главная задача - создание надежной конструкции активной зоны с высоким КВ



- - ТВС ЗМО
  - - ТВС ЗСО
  - - ТВС ЗВО
  - - ТВС БЗВ
  - ◇ - стержень РС
  - - температурный компенсатор
  - ⊕ - стержень АЗ
  - ⊕ - стержень КС
  - - ТВС БЗВ
  - - фото-нейтронный источник
  - ⊕ - технологическая сборка
- 
- ① - активная часть
  - ② - торцевая зона воспроизводства
  - ③ - газовая полость



Решения, принятые для обеспечения высокого КВ ( $\sim 1,35$  для МОКС) - достижение большой ( $\sim 0,45$ ) объемной доли топлива, использование топливных КС.

В базовом варианте – отдельные пучки элементов для торцевых зон воспроизводства с целью обеспечения возможности отделения наработанного низкофонового плутония

# Основные характеристики активной зоны реактора БН-350

Тепловая мощность	1000 МВт по проекту (до 750 МВт фактически)
Температура натрия на входе/выходе	288/437°С (фактическая)
Высота	106 см → 100 см
Диаметр	155 см
Средняя теплонапряженность	~500 МВт/м <sup>3</sup> (по проекту)
Загрузка обогащенного диоксида урана	7,4 т → 7,8 т
Обогащение по U-235	17/26% → 17/21/26%

Основные изменения в процессе усовершенствования:

- укрупнение твэла: Ø6,1 → Ø6,9 мм
- объединение торцевых зон воспроизводства с активной частью с созданием в твэле газовых полостей
- переход с двухзонного на трехзонное выравнивания распределения энерговыделения
- применение более радиационноустойчивых конструкционных сталей

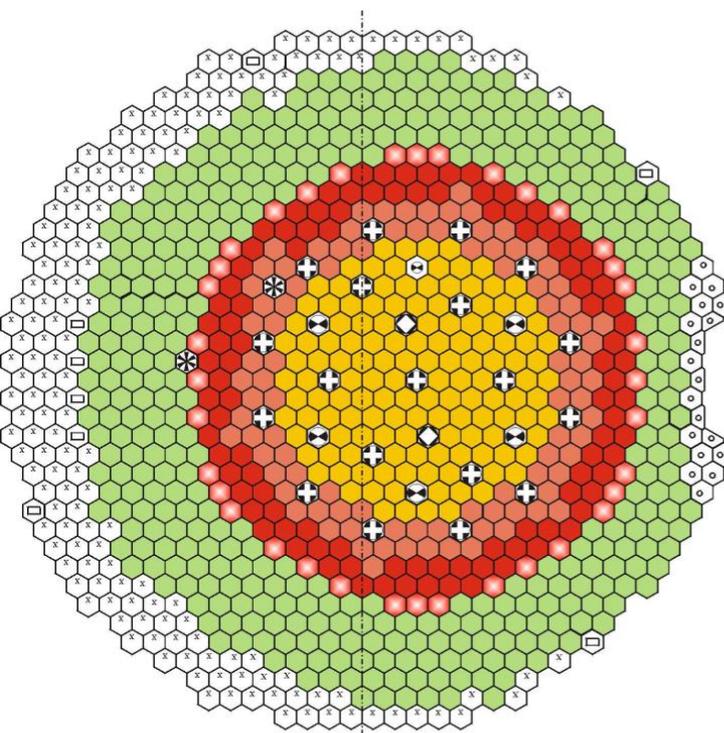
# Основные технические задачи, решенные при создании конструкции ТВС БН-350

(базовые технические решения для ТВС реакторов БН)

- Обеспечение фиксации сборок в напорной камере за счет собственного веса с применением гидравлической разгрузки (боковой вход теплоносителя в хвостовике)
- Минимизация возможных отклонений ТВС в радиальном направлении благодаря платикам (выступам) на головках ТВС, применение ограничивающей обечайки (нейтронной подпорки)
- Применение спиральных уплотнений на хвостовике ТВС для минимизации паразитных протечек натрия
- Обеспечение высокой надежности перегрузочных операций, в том числе благодаря угловой самоориентации ТВС при установке в ячейку активной зоны (соответствующая геометрия ТВС и нижнего переходника)
- Надежное дистанционирование твэлов в ТВС с помощью спирально навитой проволоки

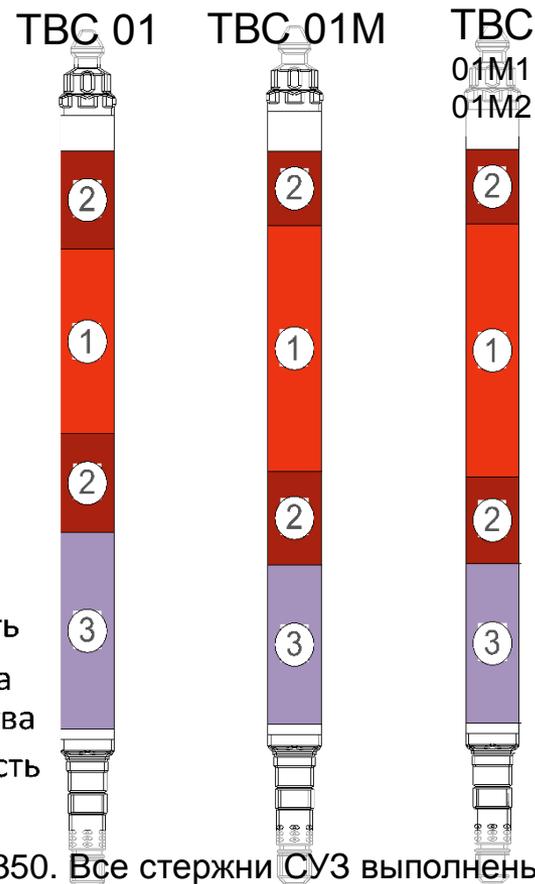
# Активная зона реактора БН-600

Главная задача – создание активной зоны с высокими тепловыми характеристиками



- - ТВС ЗМО
- - ТВС ЗСО
- - ТВС ЗБО
- - ТВС ЗБО (с увеличенной кампанней)
- - ТВС боковой зоны воспроизводства
- ⊠ - стержни АЗ
- ⊠ - стержень АЗ-П
- ⊠ - стержни КС
- ⊠ - стержни РС
- ⊠ - источник нейтронов
- ⊠ - отработавшие сборки в ВРХ
- ⊠ - сборки защиты элеватора
- ⊠ - сборки технологические

- ① - активная часть
- ② - торцевая зона воспроизводства
- ③ - газовая полость



За основу в проекте взята конструкция модернизированной ТВС реактора БН-350. Все стержни СУЗ выполнены на основе поглощающих материалов (европий, бор). КВ в пересчете на МОКС обеспечен на уровне 1,3.

Для достижения короткого времени удвоения (до 7 лет) принята высоконапряженная активная зона высотой 75 см.

# Основные характеристики активной зоны реактора БН-600

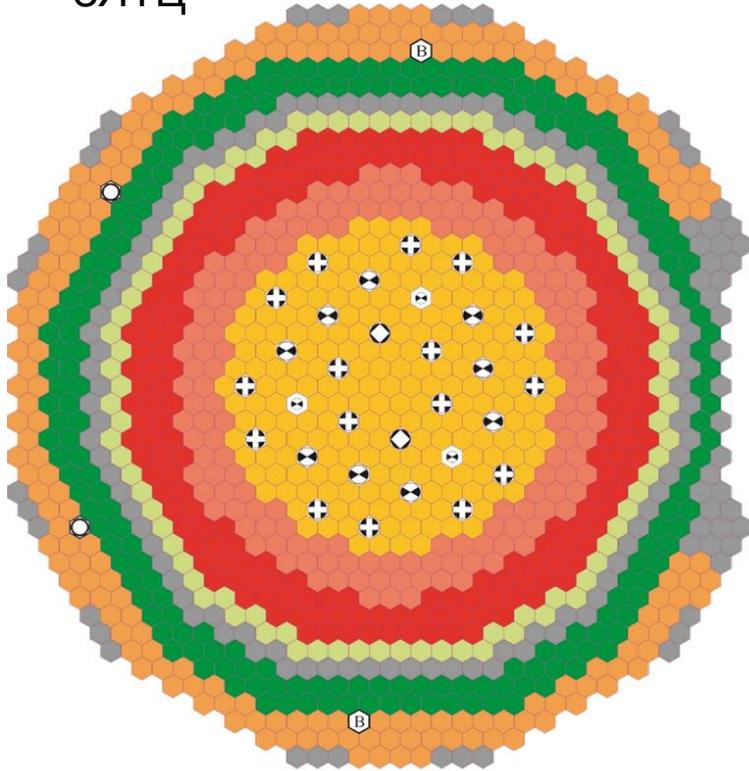
Тепловая мощность	1470 МВт
Температура натрия на входе/выходе	368/535°С
Высота	75 см → 100 см → 103 см
Диаметр	207 см
Средняя теплонапряженность	550 → 426 → 413 МВт/м <sup>3</sup>
Загрузка обогащенного диоксида урана	8,3 т → 11,6 т → 12,1 т
Обогащение по U-235	21/33% → 17/21/26%

Основные изменения в процессе усовершенствования:

- снижение теплонапряженности – увеличение высоты активной зоны
- отказ от перестановок ТВС в ЗБО, введение третьей зоны по обогащению для профилирования распределения энерговыделения
- применение более радиационноустойчивых материалов

# Активная зона реактора БН-800

Главная задача – освоение уран-плутониевого топлива (МОКС), отработка технологий ЗЯТЦ



- ⬡ - ТВС ЗМО
- ⬡ - ТВС ЗСО
- ⬡ - ТВС ЗБО
- ⬡ - ТВС БЗВ
- ⬡ - Стержень РС
- ⬡ - Стержень КС
- ⬡ - Стержень АЗ
- ⬡ - Стержень ПАЗ
- ⬡ - ССЗ
- ⬡ - СБЗ
- ⬡ - ТВС отработавшая
- ⬡ - Гильза хранилища
- ⬡ - Втулка хранилища

- ① - активная часть
- ② - торцевая зона воспроизводства
- ③ - газовая полость
- ④ - натриевая полость
- ⑤ - поглощающий экран

ТВС 01 (1985г.)



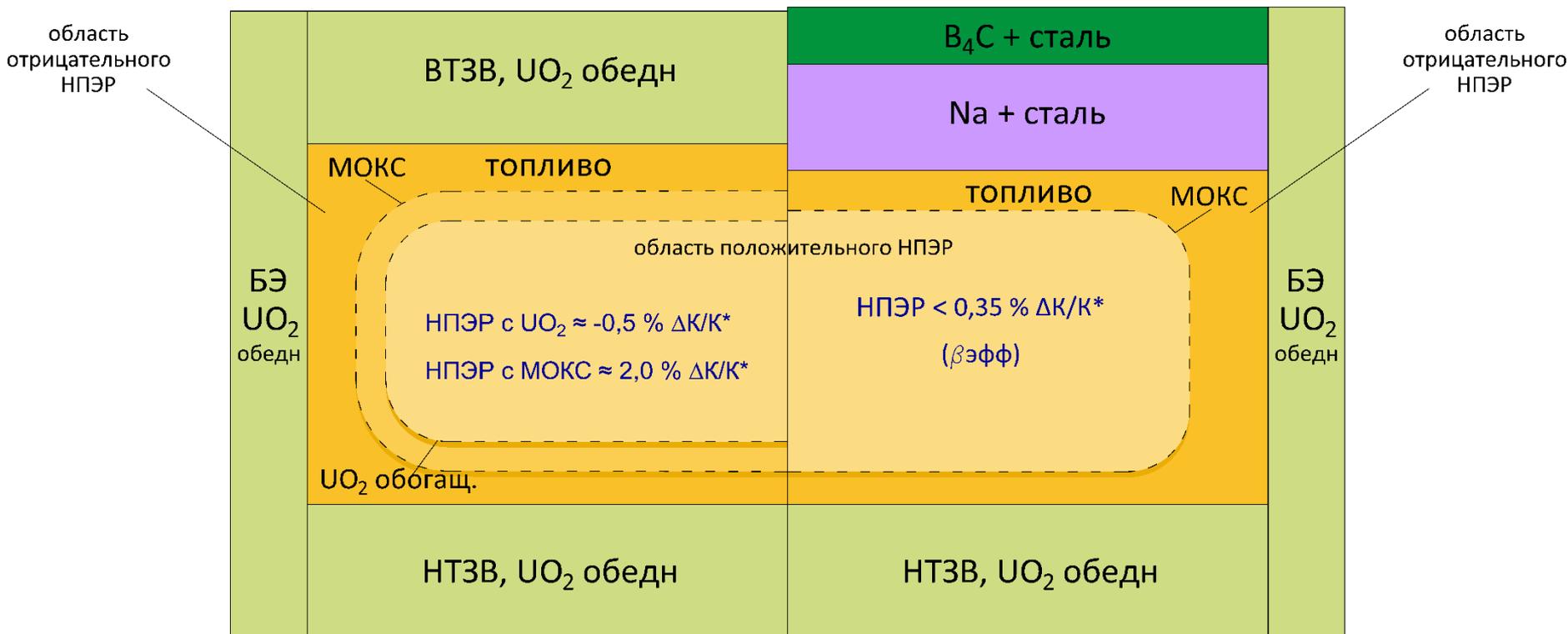
ТВС 01 (1995 / 2009 г.)



В связи с Чернобыльской аварией проект активной зоны был переработан для ограничения НПЭР величиной менее  $\beta_{эфф}$ . Введена верхняя натриевая полость. Дополнительно безопасность повышена путем введения системы гидравлически взвешенных пассивных стержней АЗ.

# Проблема НПЭР при переходе на МОКС-топливо

Верхняя натриевая полость – способ ограничения НПЭР



\* Оценка НПЭР дана для ТВС активной зоны в области: активная часть + верхняя часть ТВС, как области вероятного опустошения ТВС при вскипании натрия

## Требования по безопасности в нормативной документации, связанные с коэффициентами реактивности

---

### п. 3.4. НП-082-07 (ПБЯ РУ АС)

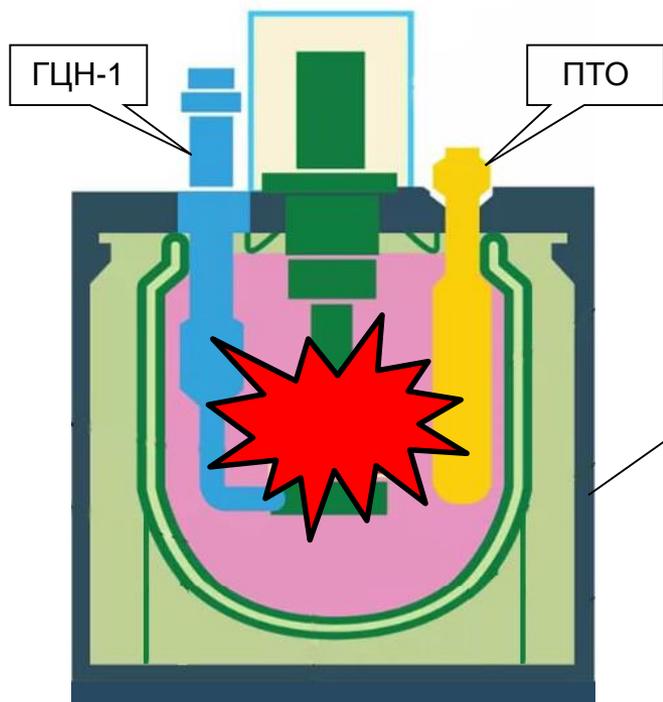
Значения коэффициентов реактивности по температуре и по мощности реактора, а также суммарного коэффициента реактивности по температуре теплоносителя и по температуре топлива должны быть отрицательными во всем диапазоне изменения параметров реактора при нормальной эксплуатации и при нарушениях нормальной эксплуатации, включая проектные аварии. Для запроектных аварий допустимый интервал значений натриевого пустотного эффекта должен быть обоснован в проекте РУ и АС.

### п. 4.2.3. ОПБ 88/97

Активная зона вместе со всеми ее элементами, влияющими на реактивность, должна быть спроектирована таким образом, чтобы любые изменения реактивности с помощью органов регулирования и эффектов реактивности в эксплуатационных состояниях и при проектных и запроектных авариях не вызывали неуправляемого роста энерговыделения в активной зоне, приводящего к повреждению ТВЭЛов сверх установленных проектных пределов.

# Изменение подхода к обоснованию безопасности реактора в запроектной аварии с проявлением НПЭР (ULOF)

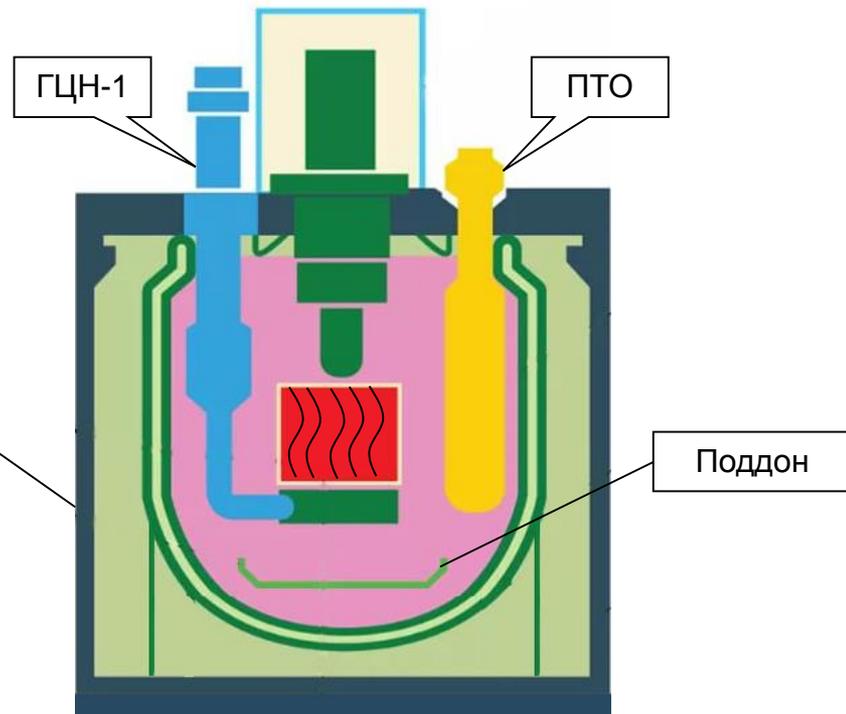
До Чернобыльской аварии



Ограничение радиоактивных выбросов.

Сохранение целостности корпуса реактора при взрывном выделении энергии

После Чернобыльской аварии



Ограничение радиоактивных выбросов.

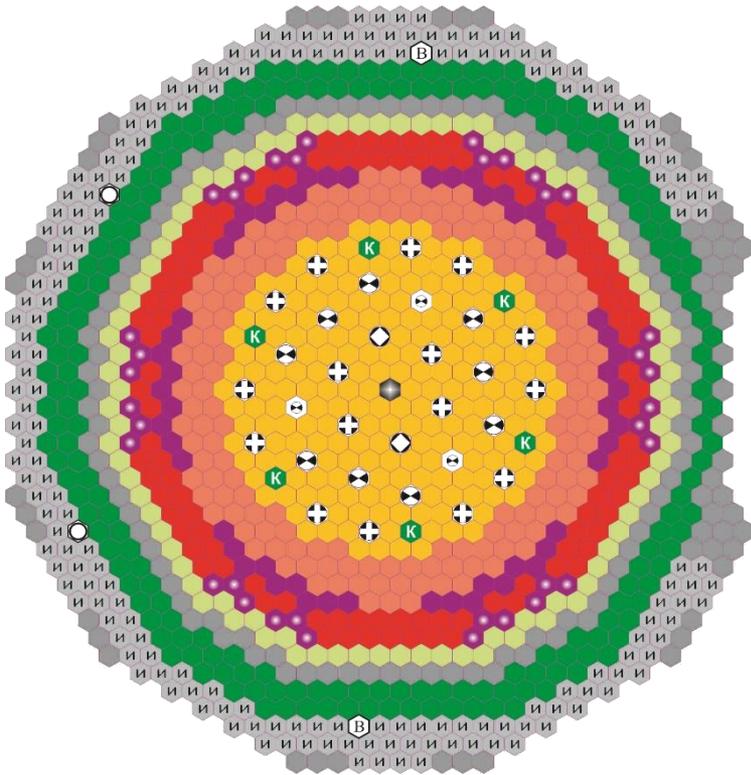
Исключение взрывного разрушения активной зоны. Допускается только плавление топлива

# Основные характеристики активной зоны реактора БН-800

Тепловая мощность	2100 МВт
Температура натрия на входе/выходе	354/547 °С
Высота	90 см
Средняя теплонапряженность	450 МВт/м <sup>3</sup>
Загрузка МОКС-топлива	16,4 т.
Содержание в/ф плутония в топливе	18,2% / 20,1 % / 23 %
Коэффициент воспроизводства	1,0

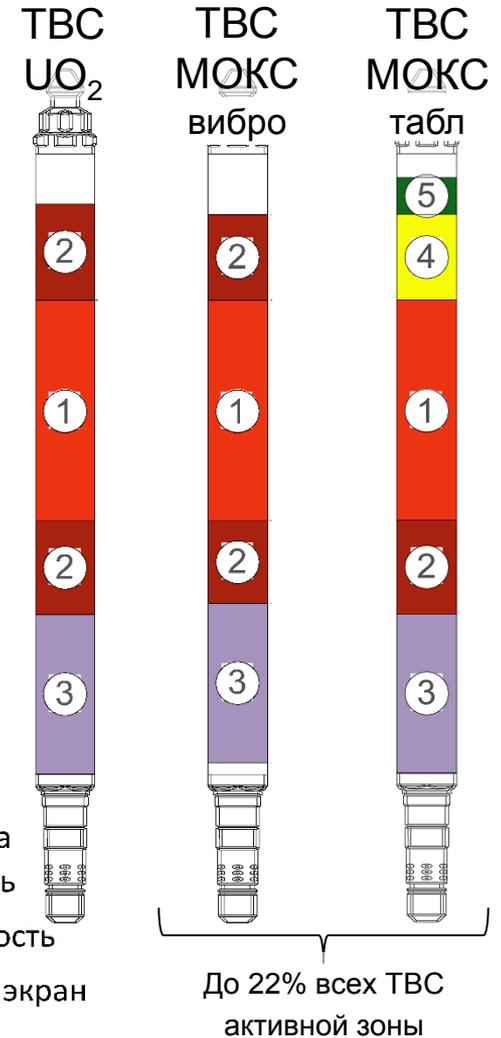
- ❑ Коэффициент воспроизводства ограничен величиной ~1 с учетом требований СУОП между РФ и США. Реактор должен был обеспечить утилизацию 34 т плутония оружейного качества.
- ❑ Для обеспечения реактора таблеточным МОКС-топливом создано производство на ФГУП ГХК (взамен комплекса 300 на ФГУП «ПО «МАЯК»). В ноябре 2019 г. в реактор загружена первая партия ТВС производства ГХК.

# Гибридная активная зона реактора БН-800 – временное решение по условиям топливообеспечения реактора



- - ТВС ЗМО
- - ТВС ЗСО
- - ТВС ЗБО
- - ТВС МОКС табл.
- - ТВС МОКС вибро.
- - ТВС БЗВ
- ⬠ - Стержень РС
- ⊕ - Стержень КС
- ⊗ - Стержень АЗ
- ⊞ - Стержень ПАЗ
- ⬠ - ССЗ
- - СБЗ
- ⬠ - имитатор ТВС в ВРХ
- ⊙ - Гильза хранилища
- ⊞ - Втулка хранилища
- ⬠ - ПИН
- ⬠ - ПКР

- ① - активная часть
- ② - торцевая зона воспроизводства
- ③ - газовая полость
- ④ - натриевая полость
- ⑤ - поглощающий экран



# БН-800 – исключительно важный этап в освоении реакторов БН

Почти все оборудование РУ БН-800 изготовлено на российских предприятиях. Привлечено более 25 крупных заводов, общее количество предприятий - более 60



4-й блок Белоярской АЭС

- ❑ Реализация проекта БН-800 предотвратила критический разрыв в освоении быстрых натриевых реакторов
- ❑ Введение в строй БН-800 обеспечило наращивание компетенций разработчиков и эксплуатационного персонала

# Путь к коммерческому реактору БН

---

Коммерческий реактор – реактор, предназначенный для массового серийного сооружения (реактор большой мощности)

**Важнейшее требование к коммерческому реактору – обеспечение высоких экономических показателей**

Основные задачи по активной зоне – увеличение выгорания топлива и длительности кампании ТВС

**Этапы разработки коммерческого реактора**

1981 г. – БН-1600, технический проект – было предусмотрено сооружение головного реактора в составе 3-ей очереди Белоярской АЭС наряду с БН-800

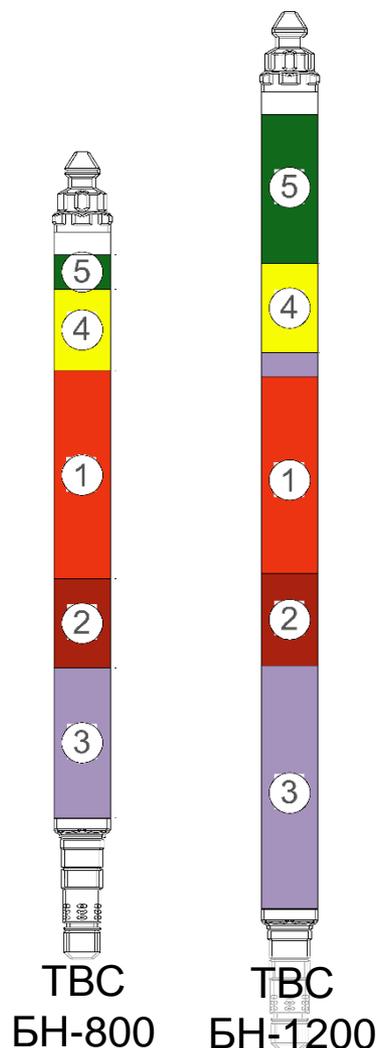
1992 г. – БН-1600М, технический проект

2006 г. – БН-1800, техническое предложение

2014 г. – БН-1200, технический проект

(Ведется оптимизация технических решений с целью дополнительного улучшения технико-экономических характеристик)

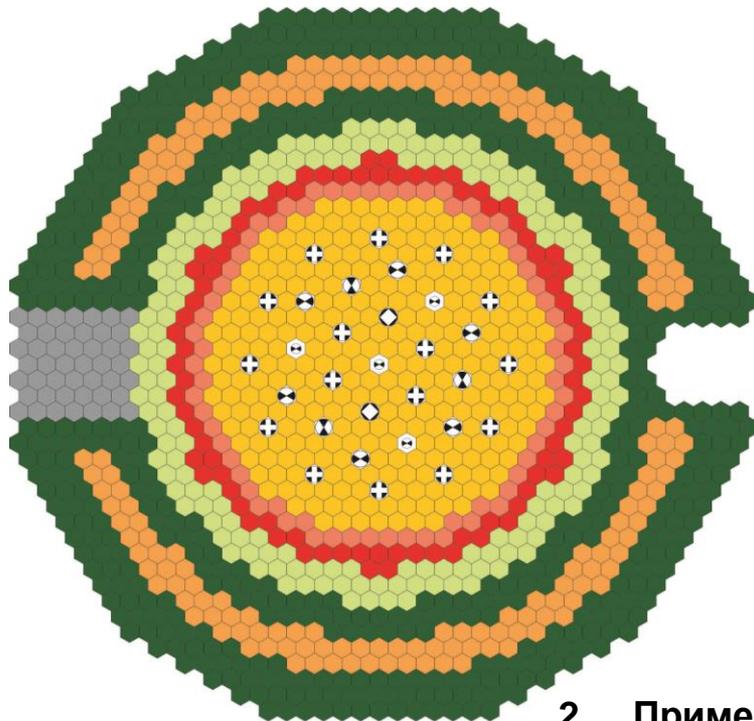
# Принципиальные отличия в конструкции ТВС БН-1200



Параметр	БН-800	БН-1200
Размер под ключ и толщина чехла, мм	96 x 2	181 x 3,5
Диаметр и толщина оболочки твэла, мм	6,9 x 0,4	9,3 x 0,6
Длина твэла, мм	2040	2450
Длина ПЭЛов верхнего экрана, мм	150	645
Длина ТВС, мм	3500	4700

- Укрупнение твэлов обеспечивает увеличение кампании ТВС
- Удлинение твэлов с целью увеличения газовой полости направлено на достижение глубокого выгорания топлива
- Удлинение ТВС с созданием эффективной радиационной защиты в составе ПЭЛов ТВС снижает объем необходимой внутриреакторной защиты

# Особенности компоновочных решений активной зоны БН-1200



- - ТВС основного массива
- - ТВС предпоследнего ряда
- - ТВС последнего ряда
- - ТВС БЗВ или ССЗ
- ⬠ - Стержень РС
- ⊕ - Стержень КС
- ⊖ - Стержень АЗ
- ⊕ - Стержень ПАЗ-Г
- ⊖ - Стержень ПАЗ-Т
- - ССЗ
- - СБЗ
- - ОТВС в ВРХ

## 1. Использование одного типа ТВС по содержанию Pu

- Упрощает организацию производства твэлов и ТВС, экономически наиболее выгодно
- Обеспечивает максимальную эффективность стержней СУЗ, расположенных в пределах ограниченного радиуса по конструкционным условиям реактора

## 2. Применение дополнительной системы стержней пассивной аварийной защиты на температурном принципе срабатывания (ПАЗ-Т)

## 3. Большая периферийная часть активной зоны, что обеспечивает возможности:

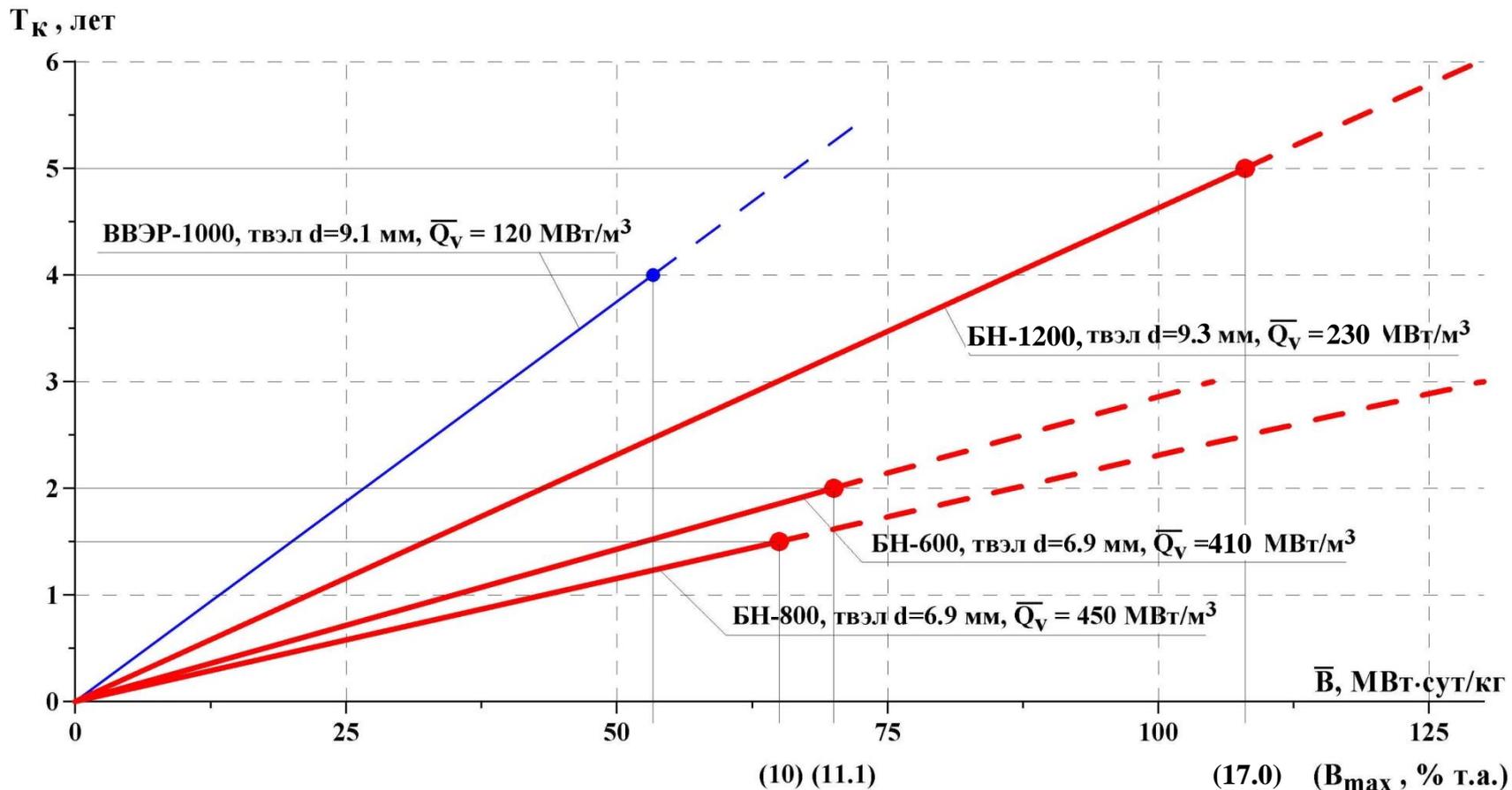
- Создания внутриреакторного хранилища для выдержки ТВС в течение 2 интервалов между перегрузками, исключается необходимость натриевого барабана отработавших ТВС
- Эффективной защиты обечайки, ограничивающую массив сборок активной зоны (нейтронной подпорки)

# Основные характеристики активной зоны реактора БН-1200

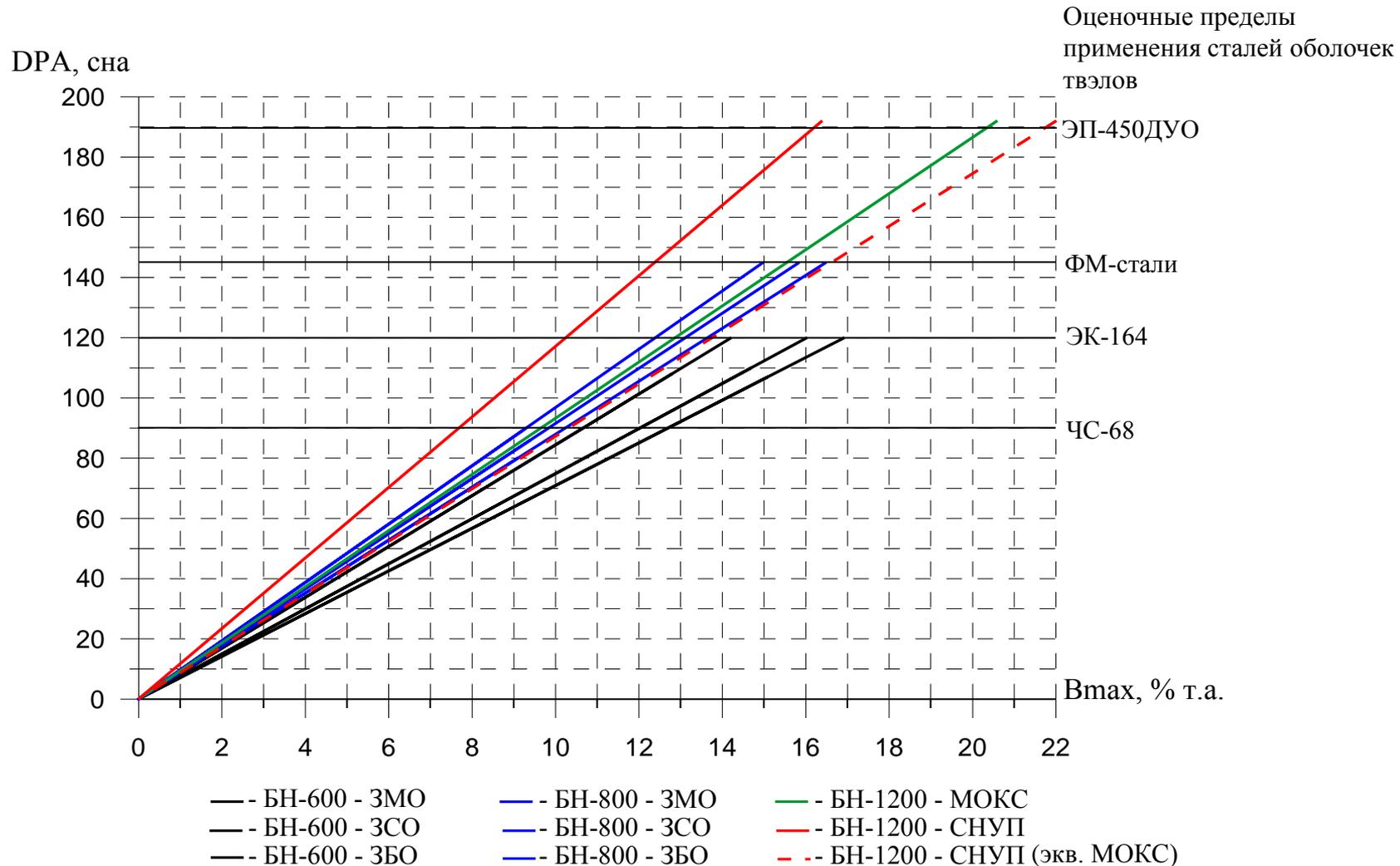
Тепловая мощность	2800 МВт
Температура натрия на входе/выходе	410/550 °С
Высота	85 см
Средняя теплонапряженность	230 МВт/м <sup>3</sup>
Загрузка МОКС-топлива	47,2 т.
Содержание в/ф плутония в топливе	17,2 %
Коэффициент воспроизводства	1,19
в том числе,	
активной зоны	0,92
торцевой зоны воспроизводства	0,16
боковой зоны воспроизводства	0,11*

\* Целесообразность применения боковой зоны воспроизводства на начальном этапе работы первых реакторов БН-1200 будет определяться с учетом экономических предпосылок

# Зависимость кампании ТВС от выгорания при различной теплонапряжённости активной зоны



# Соотношение выгорания топлива и повреждающей дозы в реакторах БН



# Освоение выгорания оксидного топлива в реакторах БН.

$B_{\max}$  (% т.а.) /  $\bar{B}$  (МВт\*сут/кг)

Реактор, топливо	Материал оболочки твэл / материал чехла ТВС				
	X18H10T/ ЭИ-847	X16H11M3 МТО/ ЭИ-847	X16H11M3 х.д./ ЭИ-847 х.д.	ЭП-450/ ЧС-68 х.д.	ЭП-450/ ЧС-68 х.д. усовершен.
БН-350 UO <sub>2</sub>	С 1973 г. 5,7 / 38	С 1979 г. 9,0 / 54	С 1989 г. 10 / 58		
БН-600 UO <sub>2</sub>		С 1980 г. 7,2 / 42,5	С 1987 г. 8,3 / 44,5	С 1993 г. 10 / 60	С 2004 г. 11,2 / 72  С 2017 г. 11,8 / 74
БН-800 UO <sub>2</sub> , МОКС					С 2016 г. 10 / 66

Ближайшая перспектива увеличения выгорания (на ~25%) в реакторах БН-600, БН-800 связана с ведущимся переходом на использование оболочечной тали ЭК-164 х.д.

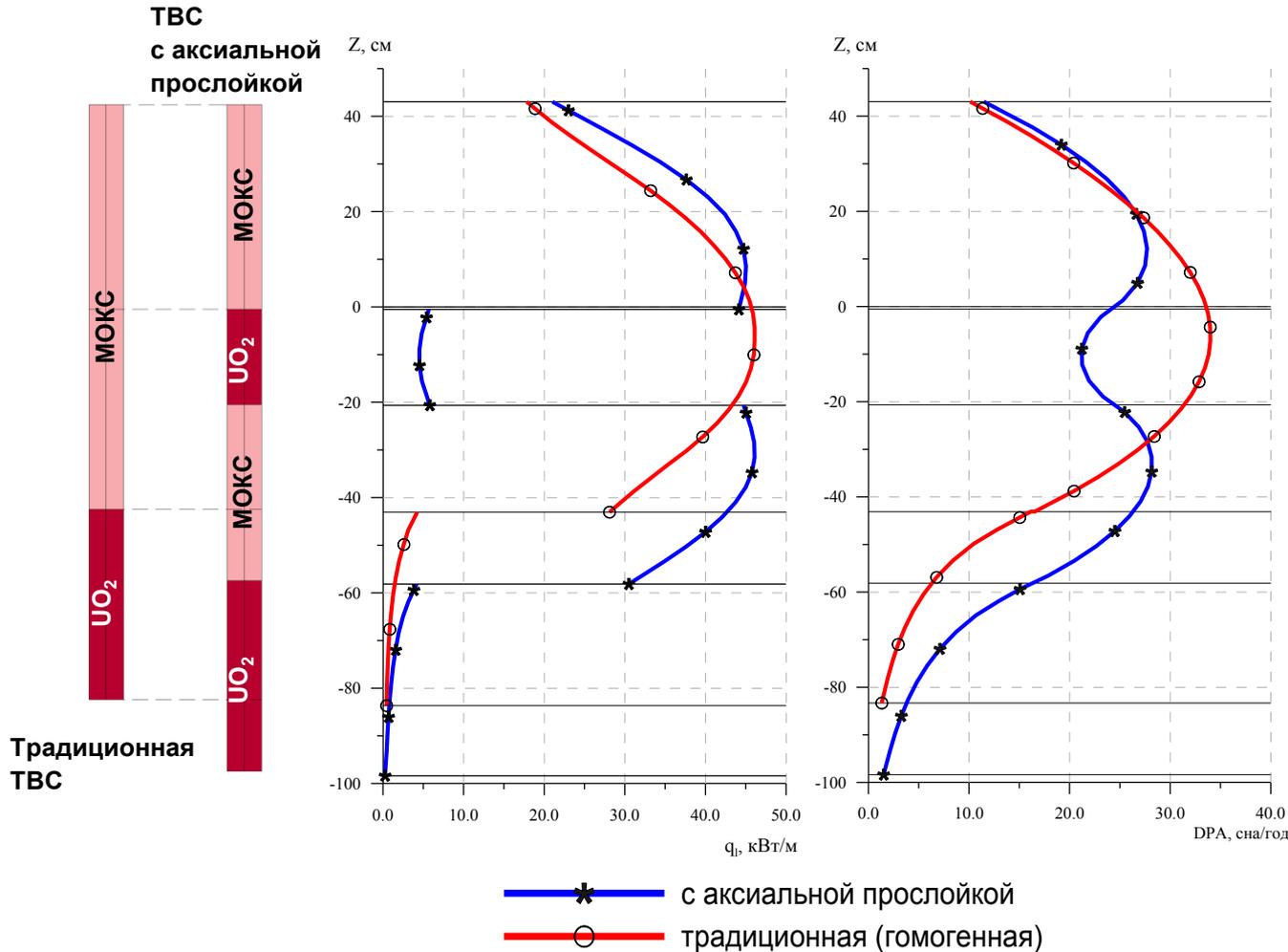
# Увеличение длительности интервала между перегрузками и кампании ТВС в реакторах БН

Кратность перегрузки  $\times$  интервал (эфф.сутки)

БН-350	БН-600	БН-800	БН-1200
<b>4-6 x 83</b>	<b>2-3 x 100</b>	<b>3-4 x 155</b>	4-6 x (230-265)
↓	↓	↓	↓
<b>4-6 x 106</b>	<b>3-4 x 165</b>	4-5 x 150 или 3-4 x 200	4-6 x 330
↓	↓	↓	↓
<b>4-6 x 100</b>	<b>4-5 x 146</b>		5-7 x 330
	↓		↓
	<b>4-5 x 200</b>		

Примечание: жирным выделены освоенные параметры

# Эффективность применения аксиальной воспроизводящей прослойки



По сравнению с традиционной активной зоной обеспечивается:

- снижение скорости набора повреждающей дозы на конструкционные материалы ТВС на 18 %;
- снижение потери реактивности за годовой интервал работы реактора (330 эфф.сут.) с 2.0% $\Delta k/k$  до 0.9%  $\Delta k/k$ .

## Основные требования к характеристикам активной зоны быстрых реакторов на различных этапах развития атомной энергетики

Время	Документ	Требования		
		КВ	$g_{Pu}$ Т/ГВт (э)	Выжигание МА
1970 год	Отчёты по системным исследованиям ФЭИ, экспертная оценка ИАЭ (КИ)	максимум	минимум	Не предъявляются
1984 год	Экспертная оценка ИАЭ (КИ)	$\geq 1,5$	Требования нет	Не предъявляются
2000 год	Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века	$\geq 1,0$	Рекомендуется низкая теплонапряжённость (большая удельная нагрузка)	Выжигание собственных МА
2012 год	О стратегии ядерной энергетики России до 2050 г., КИ	1,2 → 1,4	4,17 → 2,83	Рассматривается без конкретизации, обсуждаются другие варианты, в том числе ЖСР
2012 год	Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в XXI веке, НИКИЭТ (концепция ПН «Прорыв»)	$\geq 1,0^*$	Рекомендуется низкая теплонапряжённость (большая удельная нагрузка)	Выжигание собственных МА

\* Значение КВ более 1 должно быть обеспечено в активной зоне при использовании нитридного топлива, необходимость применения внешних зон воспроизводства определяется в перспективе с учетом стратегических задач

# Характеристики разработанных активных зон реактора БН большой мощности после 1990 г.

Время	Проект	КВ*	$q_V$ МВт/м <sup>3</sup>	$g_{дел}$ т/ГВт (э)	Выжигание МА
1992 г.	БН-1600М, МОКС нитрид карбид	1,11	300	3,4	Не предусмотрено
		1,31	310	3,8	
		1,36	330	3,4	
2013 г.	БН-1200 нитрид, гомогенная	1,09 (без экранов)	255	4,4	Предусмотрено выжигание собственных МА
		1,36 (с экранами)			
2013 г.	БН-1200 МОКС, гомогенная	1,19	237	4,1	Предусмотрено выжигание собственных МА
2017 г.	БН-1200 МОКС, гетерогенная (акс. прослойка)	1,25	232	4,7	Предусмотрено выжигание собственных МА

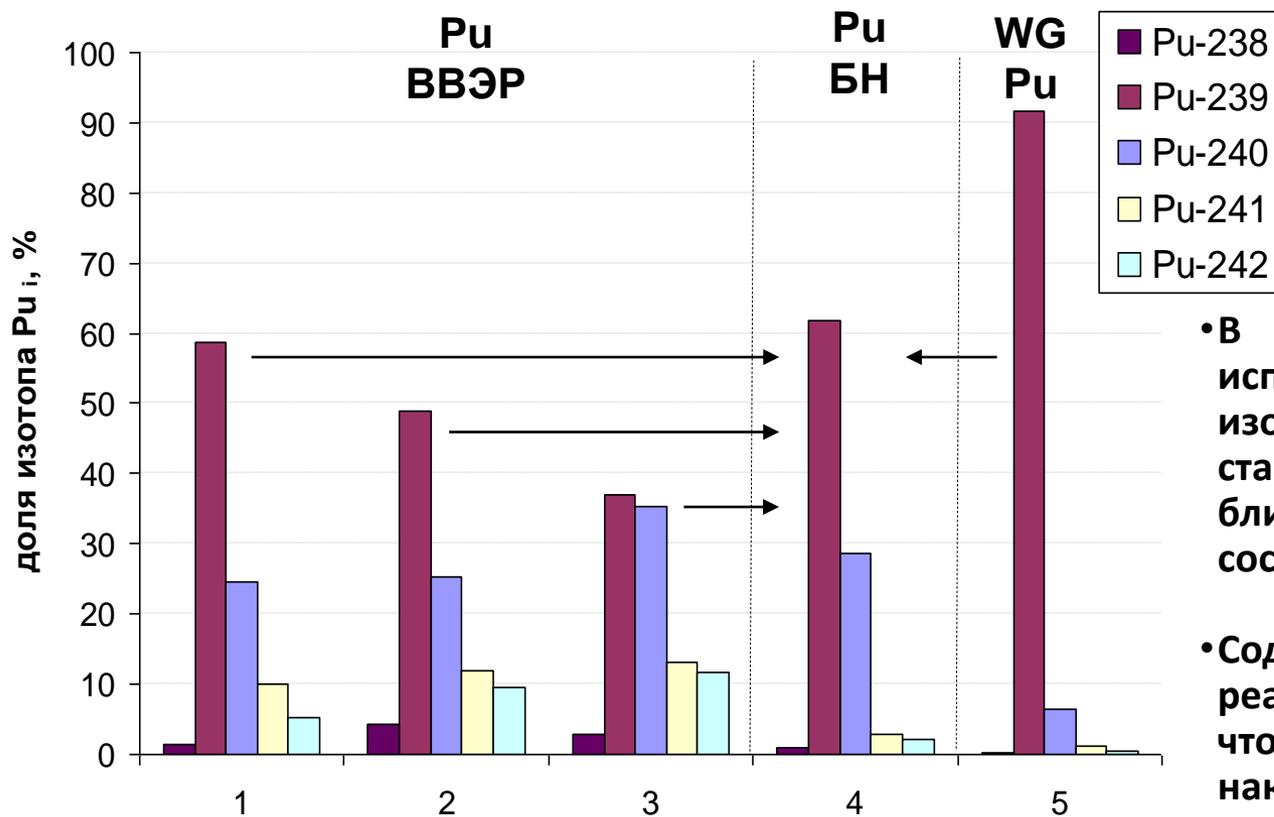
\* Потеря в КВ в связи с исключением верхней торцевой зоны воспроизводства при введении натриевой прослойки ~ 0,15

# Разработка активной зоны реактора БН-1200 с нитридным (СНУП) топливом

---

- Для перспективных быстрых реакторов СНУП-топливо в нашей стране рассматривается как основное
- Основная задача освоения СНУП-топлива – обеспечение надежности твэлов при экономически приемлемом выгорании
- Исследования работоспособности твэлов со СНУП-топливом ведутся с проведением реакторных испытаний в реакторах БОР-60, БН-600. Максимально достигнутое выгорание в ЭТВС БН-600 – 7,5% т.а. (эквивалентно 10% МОКС-топлива по энергоспроизводке ТВС)
- Для дальнейших исследований предлагается использовать также БН-800
- Разработан технический проект активной зоны БН-1200 со СНУП-топливом для возможного применения уже на начальном этапе эксплуатации головного энергоблока БН-1200. Ведутся работы по оптимизации ТП.

# Дополнительные особенности быстрых реакторов (кроме КВ>1), важные для эффективной работы в ЗЯТЦ



- В реакторе БН возможно использование Pu любого изотопного состава и возможна стабильная работа в режиме, близкому к равновесному по составу PU

- Содержание МА в быстром реакторе также стабилизируется, что позволяет исключить их накопление при введении МА в топливо

1 - Pu ВВЭР (выгорание - 33 МВт·сут/кг)

2 - Pu ВВЭР (выгорание - 60 МВт·сут/кг)

3 - Pu ВВЭР (МОКС после 1-го рецикла)

4 - Pu собственного равновесного состава

(после многократного рециклирования в БН)

5 - Pu оружейного качества

## О выжигании младших актинидов

---

### Накопление Pu и МА (Np, Cm, Am) на ГВт(э)-год

ВВЭР – 230 кг Pu,

~ 25 кг МА, в основном Np, но после выгрузки из реактора за счёт распада Pu-241 с  $T_2=14,5$  лет образуется америций, который представляет наибольшую опасность.

БН – 150 кг и более избыточного Pu,

~ 20-40 кг МА в зависимости от изотопного состава Pu

(~ 0,4 % в топливе в равновесном режиме)

### Соотношение радиотоксичности актинидов в выгружаемом ОЯТ:

Pu ~ 90 %, МА ~ 10 %

### Возможность выжигания МА в БН -1200

По физике и обращению с ОЯТ возможно введение в топливо всего Np и до 2% Am, что обеспечивает выжигание более 50 кг Am в год. Возможно также гетерогенное размещение МА в составе специальных сборок бокового экрана.

Проблема обеспечения выжигания МА в БН связана с созданием соответствующих топливных технологий и экономической целесообразностью. Ведутся и запланированы соответствующие исследования

# Заключение

---

- За прошедший 60-летний период освоения реакторов БН решены основные задачи по созданию для них активных зон, отвечающих требованиям надежности и безопасности
- Завершается промышленное освоение МОКС-топлива для реакторов БН-800, что является ключевым начальным этапом освоения ЗЯТЦ двухкомпонентной атомной энергетики
- Главные задачи дальнейших работ:
  - достижение глубокого выгорания МОКС-топлива
  - освоение перспективного СНУП-топлива
  - отработка конструкции ТВС реактора БН-1200
  - определение оптимального варианта организации выжигания МА

# Заключение

---

- За прошедший 60-летний период освоения реакторов БН решены основные задачи по созданию для них активных зон, отвечающих требованиям надежности и безопасности
- Завершается промышленное освоение МОКС-топлива для реакторов БН-800, что является ключевым начальным этапом освоения ЗЯТЦ двухкомпонентной атомной энергетики
- Главные задачи дальнейших работ:
  - достижение глубокого выгорания МОКС-топлива
  - освоение перспективного СНУП-топлива
  - отработка конструкции ТВС реактора БН-1200
  - определение оптимального варианта организации выжигания МА

Спасибо за внимание!

