

УДК 621.039.05:621.039.526

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.03>
Оригинальная статья / Original paper

Использование МОКС-топлива в реакторе БН-800

Б.А. Васильев¹, А.Н. Крюков¹, М.Р. Фаракин¹, С.Б. Белов¹, В.С. Шеряков¹,
А.Е. Кузнецов¹, И.А. Филин²

¹ АО «ОКБМ Африкантов»,
603074 Россия, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15

² Белоярская АЭС,
624250 Россия, Свердловская обл., г. Заречный, а/я 149

Реферат. В соответствии с принятой в Российской Федерации стратегией развития двухкомпонентной ядерной энергетики с замыканием ЯТЦ реакторы на быстрых нейтронах должны обеспечивать эффективное использование смешанного уран-плутониевого топлива на основе плутония, выделяемого из ОЯТ тепловых реакторов, а затем – из собственного ОЯТ. В первых отечественных реакторах БН использовалось освоенное к тому моменту топливо на основе диоксида обогащенного урана. Освоение смешанного уран-плутониевого оксидного (МОКС) топлива началось с облучения экспериментальных ТВС в исследовательском реакторе БОР-60, а также энергетических реакторах БН-350 и БН-600. Проект БН-800 был ориентирован уже на использование смешанного уран-плутониевого топлива. В связи с задержкой запуска промышленного производства МОКС-топлива, создаваемого на ФГУП «ГХК», БН-800 был запущен (2016 г.) с гибридной активной зоной, сформированной преимущественно из ТВС с урановым топливом. Доля ТВС с МОКС-топливом, изготовленных на опытных производствах АО «ГНЦ НИИАР» и ФГУП «ПО «МАЯК», составляла 16%. Гибридная активная зона эксплуатировалась до восьмой микрокампании. Переход на полную загрузку БН-800 МОКС-топливом был завершён к началу 13-й микрокампании (2023 г.). Для изготовления МОКС-топлива БН-800 используется плутоний разного изотопного состава, что обеспечивается за счет применения на производстве методики корректировки массовой доли плутония в топливе. В настоящее время осуществляется перевод активной зоны на ТВС с оболочками твэлов из более радиационно стойкой стали ЭК164-ИД, что впоследствии позволит приступить к работам по повышению выгорания топлива. При этом по сравнению с освоенным режимом работы активной зоны с оболочками твэлов из стали ЧС68-ИД планируется увеличить выгорание топлива с 9,5 до 12% т.а. по максимальному значению и с 66 до 86 МВт·сут/кг по среднему значению. В рамках освоения технологии выжигания минорных актинидов с 14-й микрокампании (2024 г.) в реакторе облучаются три ТВС, в состав которых входят по четыре твэла с добавлением америция (0,9%) и нептуния (0,6%).

Ключевые слова: реактор БН-800, МОКС-топливо, плутоний, изотопный состав, экспериментальное облучение, выгорание топлива, минорные актиниды.

Для цитирования: Васильев Б.А., Крюков А.Н., Фарахшин М.Р., Белов С.Б., Шеряков В.С., Кузнецов А.Е., Филин И.А. Использование МОКС-топлива в реакторе БН-800. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;3:45–59. DOI: <https://doi.org/10.26583/пре.2025.3.03>

Введение

Освоение смешанного уран-плутониевого топлива – основная задача, которая должна быть решена при реализации замкнутого топливного цикла двухкомпонентной ядерной энергетики.

Реактор БН-800 является первым отечественным реактором, ориентированным на использование смешанного оксидного уран-плутониевого (МОКС) топлива, обеспечивающего возможность достижения $K_{\text{eff}} > 1$. Особенностью уран-плутониевого топлива по сравнению с урановым является его повышенная радиоактивность, что требует специальных производств для его изготовления и соответствующего обращения с ним на энергоблоке.

Работоспособность МОКС-топлива в условиях активной зоны реактора БН-800 была обоснована по результатам облучения экспериментальных ТВС (ЭТВС) в реакторах БОР-60, БН-350 и БН-600. В том числе было установлено, что поведение МОКС-топлива под действием облучения подобно оксидному урановому топливу, а основным фактором, ограничивающим выгорание топлива, является радиационная стойкость конструкционного материала оболочек твэлов [1 – 3].

Промышленное производство МОКС-топлива для реактора БН-800 создано на ФГУП «ГХК». В связи с некоторым отставанием запуска этого производства относительно срока ввода в эксплуатацию реактора БН-800 стартовая загрузка активной зоны, сформированная в 2014 г., состояла преимущественно из ТВС с урановым топливом производства АО «МСЗ». Доля ТВС на основе МОКС-топлива, изготовленных на опытных производствах ФГУП «ПО «МАЯК» и АО «ГНЦ НИИАР», составляла 16% от общего количества сборок [4]. В период эксплуатации гибридной активной зоны доля ТВС с МОКС-топливом изменялась исходя из располагаемых возможностей по их изготовлению [5].

Переход на полную загрузку МОКС-топливом начался с восьмой перегрузки реактора в 2021 г. и был практически завершён к началу 11-й микрокампании (2022 г.), когда доля ТВС с МОКС-топливом в активной зоне составила 93%. Последние ТВС с урановым топливом были выгружены из активной зоны в 12-ю перегрузку. Таким образом, начиная с 13-й микрокампании (2023 г.) активная зона реактора сформирована только из ТВС с МОКС-топливом [4].

В связи с разными ядерными свойствами МОКС-топлива и уранового топлива в течение рассматриваемого периода эксплуатации реактора БН-800 происходили изменения нейтронно-физических характеристик активной зоны и условий облучения ТВС [5].

В статье представлена информация по экспериментальному обоснованию работоспособности МОКС-топлива и его использованию в реакторе БН-800, включая изменение условий облучения.

Опыт экспериментального облучения МОКС-топлива

Основной задачей создания первых отечественных реакторов БН было создание надежной конструкции реактора на быстрых нейтронах. Использование наиболее освоенного топлива на основе диоксида урана упрощало решение этой задачи – не требовалось создание нового топливного производства и было возможным в условиях наличия хорошо развитого производства по обогащению урана в нашей стране. Освоение МОКС-топлива началось с изготовления, облучения и послереакторных исследований экспериментальных тепловыделяющих сборок (ЭТВС).

Первые ЭТВС с МОКС-топливом были облучены в экспериментальном реакторе БОР-60. С 1970 по 1992 гг. были проведены испытания таблеточного МОКС-топлива в составе ЭТВС, содержащих по 19 твэлов типоразмера $\varnothing 6,9 \times 0,4$ мм. Содержание плутония в топливе составляло 15 – 30%. Достигнутые параметры облучения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры облучения твэлов с таблеточным МОКС-топливом в составе ЭТВС БОР-60 [6]

Параметр	Значение
Максимальная линейная нагрузка на твэл, кВт/м	от 47,0 до 50,0
Максимальное выгорание,% т.а.	17,1
Максимальная повреждающая доза, сна	до 65
Максимальная температура оболочки, °С	от 700 до 720

Твэлы после испытаний в реакторе БОР-60 сохранили запас работоспособности. Результаты послереакторных исследований твэлов позволили обосновать требования к МОКС-топливу для реакторов БН-350 и БН-600 и разработать технологические приемы изготовления топлива для снижения химического взаимодействия топлива с оболочкой.

В 1988 г. для проведения испытаний в реакторе БН-350 были изготовлены четыре ЭТВС с твэлами, содержащими МОКС-топливо и рассчитанными на выгорание 10% т.а. и более. В этих ЭТВС содержание плутония в топливе для обеспечения требуемых параметров облучения составляло 27,5%. Достигнутые параметры облучения приведены в табл. 2.

Результаты исследований твэлов ЭТВС БН-350 показали, что все твэлы имели запас работоспособности.

Таблица 2

Параметры облучения твэлов с таблеточным МОКС-топливом в составе ЭТВС БН-350 [7]

Параметр	Значение
Максимальная линейная нагрузка на твэл, кВт/м	48
Максимальное выгорание,% т.а.	от 9 до 10
Максимальная повреждающая доза, сна	53
Максимальная температура оболочки, °С	690

Наиболее представительные испытания были проведены в реакторе БН-600, где прошли испытания 42 ЭТВС с таблеточным МОКС-топливом. Все твэлы были с оболочкой из аустенитной стали ЧС68-ИД х.д. Из них 39 ЭТВС с твэлами конструкции типа БН-600 (с верхней торцевой зоной воспроизводства) и три ЭТВС типа БН-800 с верхней натриевой полостью и отдельным верхним поглощающим экраном в виде пучка пэлов, содержащих карбид бора. Соответственно в ТВС типа БН-800 применялись укороченные твэлы с повышенной повреждающей дозой на верхний сварной шов. Всего успешно испытано ~ 5 тыс. твэлов. Все ЭТВС отработали без замечаний и в течение всего времени облучения оставались герметичными. Максимальные параметры облучения ЭТВС с таблеточным МОКС-топливом, достигнутые в реакторе БН-600, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры облучения твэлов с таблеточным МОКС-топливом в составе ЭТВС БН-600 [8]

Параметр	Значение для ЭТВС	
	типа БН-600	типа БН-800
Максимальная линейная нагрузка на твэл, кВт/м	48,6	46,4
Максимальное выгорание, % т.а.	11,8	11,6
Максимальная повреждающая доза, сна	80	85
Максимальная температура оболочки, °С	704	697

Испытания ЭТВС типа БН-800 подтвердили работоспособность конструкции ТВС, выполненной с натриевой прослойкой между твэлами и верхним поглощающим экраном.

По результатам послереакторных исследований ЭТВС

- дополнительно к полученным ранее результатам было подтверждено, что таблеточное МОКС-топливо по совместимости с использованными оболочками из сталей аустенитного класса аналогично диоксиду урана в равных условиях облучения;
- спрогнозировано сохранение работоспособности твэлов с оболочками из стали ЧС68-ИД х.д., планируемой к использованию в реакторе БН-800, при повреждающих дозах до 90 сна.

Гибридная активная зона реактора БН-800

Как было отмечено выше, до запуска промышленного производства МОКС-топлива реактор БН-800 эксплуатировался с активной зоной, укомплектованной преимущественно ТВС с урановым топливом. Доля ТВС с МОКС-топливом в этот период не превышала 22%. С учетом особенностей комплектования активная зона, использовавшаяся в начальный период эксплуатации реактора, была названа гибридной активной зоной.

В гибридной активной зоне с целью выравнивания распределения энерговыделения применено три типа урановых ТВС по обогащению топлива: центральная часть активной зоны сформирована из урановых ТВС с обогащением 18,5% (зона малого обогащения – ЗМО), средняя часть – с обогащением 21% (зона среднего обогащения – ЗСО), периферийная часть – с обогащением 24% (зона большого обогащения – ЗБО).

ТВС с МОКС-топливом с обогащением по плутонию (низкофоновому) 18,7 и 19,5% для таблеточного и виброуплотненного топлива соответственно расположены в периферийной части активной зоны исходя из оптимизации по условиям распределения энерговыделения и воздействия на натриевый пустотный эффект реактивности [9].

Массив топливных ТВС окружен одним рядом ТВС боковой зоны воспроизводства, содержащих диоксид обедненного урана. Далее размещаются сборки стальной и борной (на основе естественного карбида бора) защиты, за которыми находится внутриреакторное хранилище отработавших ТВС (ВРХ). В первый интервал работы реактора внутриреакторное хранилище было заполнено стальными имитаторами ТВС.

Для компенсации избыточной реактивности, регулирования и защиты реактора в активной зоне реактора БН-800 имеется 30 стержней СУЗ, в том числе два регулирующих стержня (РС) с естественным карбидом бора, 16 компенсирующих стержней (КС) с карбидом бора 60% обогащения по бору-10, девять стержней аварийной защиты (АЗ) с карбидом бора 92% обогащения по бору-10 и три гидравлически взвешенных стержня пассивной защиты (ПАЗ) также с карбидом бора 92% обогащения по бору-10.

В стержнях СУЗ, а также в сборках борной защиты применен горячепрессованный карбид бора.

В центре гибридной активной зоны располагался источник нейтронов – две ампулы с калифорнием интенсивностью по 10^9 н/см²·с, размещенные в стальной сборке.

В первом интервале между перегрузками в активной зоне размещались шесть постоянных компенсаторов реактивности (ПКР), конструктивно подобных сборкам борной защиты. ПКР компенсируют избыточную реактивность, обусловленную отсутствием в активной зоне продуктов деления (отсутствие ТВС с частично выгоревшим топливом, наличие которых характерно для режима стационарных перегрузок).

Картограмма гибридной активной зоны в первом интервале работы реактора приведена на рис. 1.

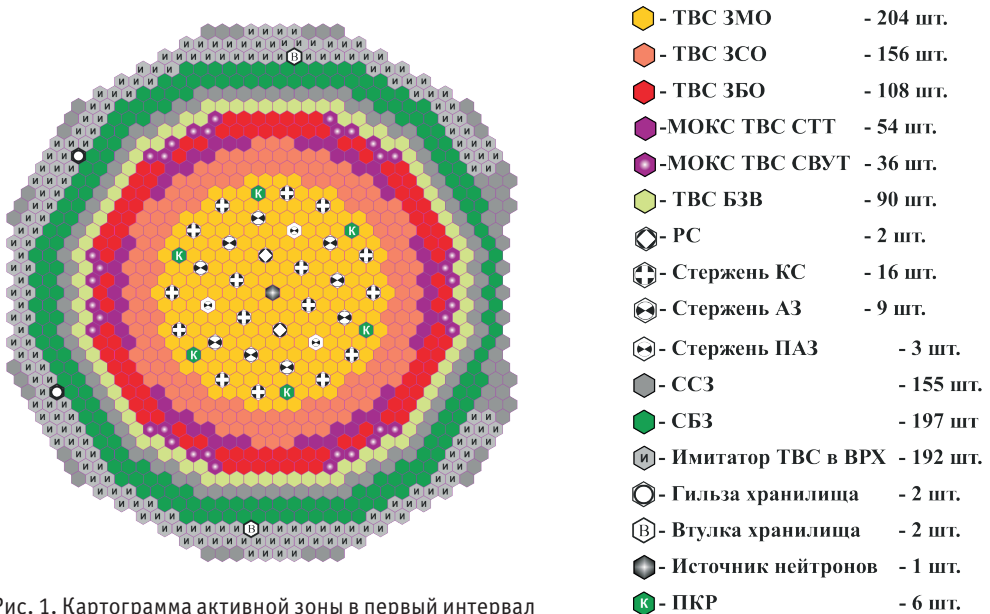


Рис. 1. Картограмма активной зоны в первый интервал работы реактора [9]

Конструкция ТВС с таблеточным МОКС-топливом, использовавшихся в гибридной активной зоне, подобна ТВС для целевой активной зоны с полной загрузкой МОКС-топливом – с верхней натриевой полостью и располагающимся над ней поглощающим экраном из карбида бора. ТВС с урановым и виброуплотненным МОКС-топливом имели традиционную, используемую в реакторе БН-600, конструкцию с верхней торцевой зоной воспроизводства. Высота топливного столба во всех ТВС гибридной активной зоны была одинаковая (900 мм) и соответствовала высоте активной зоны с полной загрузкой МОКС-топливом (рис. 2).



ТВС с таблеточным МОКС-топливом



ТВС с виброуплотненным МОКС-топливом и урановым топливом

Рис. 2. Схема ТВС: 1 – топливная часть; 2 – торцевая зона воспроизводства; 3 – газовая полость; 4 – натриевая полость; 5 – поглощающий экран [9]

Реактор БН-800 эксплуатировался с гибридной активной зоной с первой по восьмую микрокампании реактора. В этот период ее состав менялся относительно стартовой компоновки с учетом объема поставок ТВС с МОКС-топливом. После четвертого и пятого интервалов работы вместо отработавших ТВС с таблеточным МОКС-топливом в активную зону устанавливались ТВС ЗСО. Все ТВС с МОКС-топливом размещались в границах ЗБО. Границы зон по обогащению топлива гибридной активной зоны в восьмом интервале работы и активной зоны с полной загрузкой МОКС-топливом почти одинаковые – различие заключается в несколько большем (на 36 ТВС) размере ЗСО.

Основным проектным режимом работы реактора является установившийся режим перегрузок, характеризующийся одинаковым количеством ТВС, перегружаемых в одну перегрузку, и одинаковой длительностью интервала между перегрузками. При принятой равномерно-частичной схеме перегрузок ТВС в активной зоне одновременно находятся сборки с разным временем облучения, равномерно распределенные по активной зоне. В основной части активной зоны (480 ТВС) сформированы три таких группы, в периферийной части (84 ТВС) – четыре группы. Это сделано таким образом, чтобы избежать существенного азимутального и радиального перераспределения содержания делящихся элементов топлива при перегрузках ТВС.

На начальном этапе эксплуатации реактора БН-800 использовался особый режим перегрузок, обеспечивающий вывод активной зоны в установившийся режим, в котором из активной зоны выгружались не полностью выработавшие свой ресурс ТВС. Для минимизации потерь от невыработки энергии тепловыделяющими сборками по возможности использовалась схема с возвратом в активную зону для дожига ранее отгруженных в ВРХ невыработавших свой ресурс ТВС. В каждой микрокампании активная зона формировалась таким образом, чтобы обеспечить запас реактивности, достаточный для отработки 155 эфф. сут с учетом выполнения соответствующих

нормативных требований по балансу реактивности. В итоге к началу четвертой микрокампании распределение ТВС на группы по количеству отработанных интервалов практически соответствовало проектному установившемуся режиму перегрузок.

Данные по количеству сборок различного типа в гибридной активной зоне в период ее эксплуатации приведены в табл. 4.

Таблица 4

Состав гибридной активной зоны [4]

Микрокампания	Количество ТВС для типа топлива, шт		
	Урановое	МОКС таблеточное	МОКС виброуплотненное
1	468 (204/156/108)*	54	36
2	474 (210/156/108)*	54	36
3	447 (210/156/ 81)*	54	63
4	441 (210/156/ 75)*	54	69
5	494 (210/200/ 84)*	10	60
6	546 (210/210/126)*	–	18
7	538 (210/192/136)*	18	8
8	538 (210/192/136)*	18	8

* Значения в скобках указаны в формате ЗМО/ЗСО/ЗБО

Проектная кампания ТВС с гибридной активной зоной была принята такой же, как для ТВС с активной зоной с полной загрузкой МОКС-топливом:

- 465 эфф. сут (три микрокампании по 155 эфф. сут) для основного массива ТВС;
- 620 эфф. сут (четыре микрокампании по 155 эфф. сут) для ТВС ЗБО периферийного ряда за исключением ТВС с виброуплотненным МОКС-топливом, продолжительность кампании которых по условиям эксплуатации была ограничена тремя микрокампаниями.

В соответствии с условиями эксплуатации реактора и имевшимися возможностями продления микрокампаний и кампании ТВС длительность пятой микрокампании была увеличена на 19 эфф. сут.

Формирование активной зоны с полной загрузкой МОКС-топливом

Переход от гибридной активной зоны к активной зоне с полной загрузкой МОКС-топливом начался в восьмую перегрузку реактора (перед началом девятой микрокампании) в январе 2021 г. и осуществлялся посредством последовательной замены урановых ТВС, отработавших назначенный ресурс, на свежие ТВС с таблеточным МОКС-топливом [4]. Начиная с 13-й микрокампании (с осени 2023 г.) топливная загрузка реактора БН-800 состоит только из ТВС с МОКС-топливом.

Изменение состава активной зоны при переходе к активной зоне с полной загрузкой МОКС-топливом представлено в табл. 5. Картограмма активной зоны с полной загрузкой МОКС-топливом представлена на рис. 3.

Особенностью параметров облучения ТВС в составе активной зоны с полной загрузкой МОКС-топливом по сравнению с гибридной активной зоной является больший (на 15%) уровень нейтронного потока. Это связано с ядерно-физическими особенностями

Изменение состава активной зоны при переходе на полную загрузку МОКС-топливом [4]

Микро-компания	Состав активной зоны							Примечание
	ЗМО		ЗСО		ЗБО			
	UO ₂	МОКС табл.	UO ₂	МОКС табл.	UO ₂	МОКС табл.	МОКС вибро.	
8	210	–	192	–	136	18	8	Гибридная активная зона, ~5% ТВС с МОКС-топливом
9	144	66	135	43	95	63	18	Начало перехода (~34% ТВС с МОКС-топливом)
10	71	139	77	95	70	102	10	~61% ТВС с МОКС-топливом
11	3	207	10	147	25	152	20	~93% ТВС с МОКС-топливом
12	–	210	–	156	2	183	13	~100% ТВС с МОКС-топливом
13	–	210	–	156	–	188	10	100% ТВС с МОКС-топливом

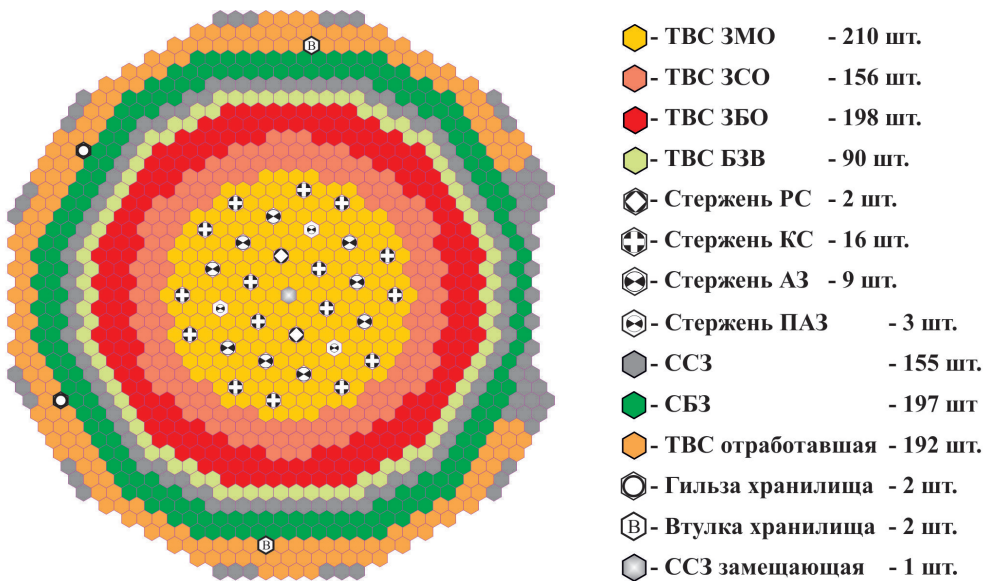


Рис. 3. Картограмма активной зоны с полной загрузкой МОКС-топливом [10]

плутония по отношению к урану-235, что обуславливает его лучшие размножающие свойства и, соответственно, меньшую загрузку по делящимся изотопам.

В период эксплуатации гибридной активной зоны с целью оптимизации поля тепловыделения ТВС с МОКС-топливом устанавливались в границах ЗБО: ТВС с таблечным МОКС-топливом устанавливались в первый ряд ЗБО, ТВС с виброуплотненным МОКС-топливом с учетом ограничений по параметрам эксплуатации – в ячейки периферийного ряда. С учетом указанного выше различия в уровне нейтронного потока для активных зон с урановым и уран-плутониевым топливом в период эксплуатации гибридной активной зоны ТВС с МОКС-топливом характеризовались относительно

невысокими параметрами облучения, которые были ниже значений, достигнутых на экспериментальных сборках, и значений, соответствующих облучению в условиях полной загрузки активной зоны МОКС-топливом. С целью обоснования работоспособности ТВС при параметрах облучения, соответствующих эксплуатации активной зоны с полной загрузкой МОКС-топливом, продолжительность эксплуатации 34-х ТВС с таблеточным МОКС-топливом была увеличена на одну микрокампанию. В итоге на наиболее напряженной ТВС были достигнуты повреждающая доза ~ 90 сна и выгорание 10% т.а. Все твэлы данной сборки сохранили герметичность по итогам облучения.

Период перехода к активной зоне с полной загрузкой МОКС-топливом характеризовался поэтапным, по мере увеличения доли ТВС с МОКС-топливом в составе топливной загрузки, повышением плотности нейтронного потока и, соответственно, основных параметров эксплуатации твэлов, определяющих их работоспособность – линейная тепловая мощность, повреждающая доза на оболочку и выгорание топлива.

Значения эксплуатационных параметров твэлов с МОКС-топливом в начальный период эксплуатации реактора БН-800 (от гибридной активной зоны до окончания перехода на полную загрузку МОКС-топливом) приведены в табл. 6.

Таблица 6

Изменение параметров облучения твэлов с МОКС-топливом при переходе на активную зону с полной загрузкой МОКС-топливом [4]

Характеристика	Значение для интервала работы					
	Гибридная зона	Переходная зона		Зона с полной загрузкой МОКС-топливом		
		2 – 8*	9	10	11	12
Доля ТВС МОКС,%	5 – 22	34	61	93	~ 100	100
Максимальная плотность потока нейтронов, см ⁻² ×с ⁻¹ ·10 ¹⁵	7,1	7,4	7,7	8,1	8,1	8,2
Максимальная линейная мощность твэлов для ТВС МОКС, кВт/м	39,5	41,5	45,4	46,8	46,9	47,0
Максимальная повреждающая доза, сна	73**(90***)	71	–	81	85	87
Максимальное выгорание топлива,% т.а.	8,1*(10,0***)	8,0	–	8,6	9,1	9,5

* В связи с установкой ПКР первый интервал работы характеризовался особым распределением поля потока нейтронов, поэтому ТВС облучавшиеся в составе стартовой загрузки в данной выборке не учитывались

**Значения повреждающей дозы и выгорания указаны для сборок, облучавшихся в составе топливной загрузки пятой микрокампании, продолжительность которой была увеличена на 19 суток относительно номинальной

*** В скобках указаны значения для ТВС, продолжительность облучения которой была увеличена на одну микрокампанию для получения экспериментального подтверждения работоспособности твэлов с МОКС-топливом в условиях облучения активной зоны с полной загрузкой МОКС-топливом

В настоящее время проводятся работы по переводу активной зоны на использование ТВС с оболочками твэлов из более радиационно стойкой стали аустенитного класса ЭК164, работоспособность которых прогнозируется при значениях повреждающей дозы на оболочку твэлов ~ 115 сна [11]. Переход на использование такой стали позволяет рассчитывать на достижение максимального выгорания топлива 12% т.а. и увеличение кампании ТВС с 465 до 620 эфф. сут.

Опыт применения МОКС-топлива на основе плутония разного изотопного состава

Исходными материалами для изготовления МОКС-топлива являются диоксиды плутония и обедненного урана. В соответствии с действующими техническими условиями допускается разное содержание изотопов плутония и урана в исходных материалах.

Технический проект активной зоны с полной загрузкой МОКС-топливом разработан исходя из использования для изготовления топлива плутония фиксированного (базового) изотопного состава, соответствующего плутонию, выделяемому из ОЯТ ВВЭР (содержание ^{239}Pu 67%). Для обеспечения возможности использования сырьевых материалов с разным изотопным составом при изготовлении МОКС-топлива используется методика корректировки массовой доли плутония в смеси урана и плутония [5]. Данная методика основана на принципе обеспечения критических параметров реактора в конце интервала работы между перегрузками. При таком подходе обеспечивается запас реактивности, необходимый для работы реактора в течение проектной длительности интервала между перегрузками. Расчеты показали, что при такой корректировке массовой доли плутония в топливе характеристики активной зоны и условия эксплуатации ТВС остаются в рамках установленных проектных ограничений при любом сочетании ТВС с разным изотопным составом.

Указанная процедура корректировки массовой доли плутония была внедрена как на опытных производствах ФГУП «ПО «МАЯК» и АО «ГНЦ НИИАР», так и на промышленном производстве ФГУП «ГХК». Тем самым была обеспечена возможность использования для изготовления МОКС-топлива плутония любого изотопного состава и обеспечена возможность совместного применения ТВС, различающихся изотопным составом топлива.

Для изготовления топлива гибридной активной зоны на опытных производствах ФГУП ПО «МАЯК» и АО «ГНЦ НИИАР», а также в период отработки промышленного изготовления топлива на вновь созданном производстве во ФГУП «ГХК» использовался низкофонозный плутоний (с массовой долей изотопа ^{239}Pu в плутонии не менее 92%) [5]. Такой материал характеризуется относительно малым радиационным воздействием на персонал. В 2020 г. для производства МОКС-топлива во ФГУП «ГХК» началось использование высокофонового диоксида плутония. Первая партия ТВС с МОКС-топливом на основе высокофонового плутония (массовая доля изотопа ^{239}Pu в плутонии составляла от 68 до 86%), наработанного из ОЯТ реакторов ВВЭР, была загружена в реактор в 10-ю перегрузку (летом 2022 г.) [5].

В дальнейшем планируется изготовление МОКС-топлива только на основе высокофонового плутония. При использовании высокофонового плутония со склада ФГУП ПО «МАЯК» необходима его переочистка от америция, накопленного за время хранения плутония. Достигнутая в настоящее время производительность установки переочистки плутония (УПП) на ФГУП «ГХК» не позволяет обеспечить сырьем две программы – по обеспечению МОКС-топливом реактора БН-800 и по наработке СНУП-топлива для реактора БРЕСТ-ОД-300. В связи с этим планируется полностью перевести производство МОКС-топлива на использование свеженаработанного высокофонового диоксида плутония (СВФДП) без переочистки на УПП, т.е. без выделения накопленного америция. Первая партия сборок с таким топливом была загружена в активную зону перед началом 14-й микрокампании, которая началась в июле 2024 г.

В настоящее время в рамках реализации «Комплексной программы по обоснованию выжигания минорных актинидов» применительно к реактору БН-800 рассматривается возможность использования топлива с добавлением минорных актинидов – америция и нептуния. Для получения экспериментального подтверждения работоспособности такого топлива с 14-й микрокампании в реакторе облучаются три ТВС, в состав которых входят по четыре твэла с добавлением америция и нептуния в количестве 0,9 и 0,6% от массы тяжелого металла соответственно.

Заключение

Освоение МОКС-топлива для использования в реакторах БН началось с облучения ЭТВС в экспериментальном реакторе БОР-60 и первых энергетических реакторах БН-350 и БН-600. На основании опыта облучения ЭТВС была получена информация по поведению твэлов под облучением, определены критерии сохранения работоспособности и фактор, ограничивающий выгорание – повреждающая доза на оболочку твэла.

БН-800 стал первым отечественным реактором БН, в котором штатно использовались ТВС с МОКС-топливом. В связи с некоторой задержкой с вводом эксплуатацию промышленного производства МОКС-топлива в начальный период эксплуатации реактора с 2015 по 2021 гг. использовалась гибридная активная зона, сформированная преимущественно из ТВС с урановым топливом. Доля ТВС с МОКС-топливом в этот период составляла от 3 до 22%.

Переход к активной зоне с полной загрузкой МОКС-топливом был начат летом 2021 г. с восьмой перегрузки реактора, когда в активную зону вместо отработавших назначенный ресурс была загружена первая крупная партия ТВС с МОКС-топливом. К началу 11-й микрокампании реактора (лето 2022 г.) доля ТВС с МОКС-топливом составляла 93%. Последние ТВС с урановым топливом были выгружены из активной зоны реактора БН-800 после 12-й микрокампании.

В связи с различием нейтронно-физических свойств уранового и смешанного уран-плутониевого топлива условия облучения твэлов с МОКС-топливом в период перехода на полную загрузку МОКС-топливом значительно менялись, но оставались в проектных пределах при номинальной мощности реактора.

Для топливообеспечения реактора БН-800 используется плутоний различного качества в диапазоне от низкофонового (с содержанием изотопа ^{239}Pu не менее 92%) до высокофонового с высоким содержанием высших изотопов плутония. Для обеспечения возможности использования плутония разного изотопного состава на производстве внедрена процедура корректировки массовой доли плутония в зависимости от фактического содержания изотопов в сырьевом материале. Эта процедура основана на обеспечении запаса реактивности реактора, необходимого для работы реактора в течение интервала номинальной продолжительности (155 эфф. сут).

Начаты работы по последовательной замене ТВС с оболочками твэлов из стали ЧС68 (повреждающая доза на оболочки твэлов до 87 сна) на ТВС с оболочками твэлов из более радиационно стойкой стали аустенитного класса ЭК164 (повреждающая доза до 116 сна), что позволит увеличить кампанию с 465 до 620 эфф. сут и достичь максимального выгорания топлива 12% т.а.

В настоящее время ведутся работы по оценке возможности использования БН-800 для выжигания минорных актинидов (нептуния и америция) за счет гомогенного введения этих долгоживущих нуклидов в состав МОКС-топлива. В 2024 г. началось облучение трех комбинированных ТВС, содержащих наряду со штатными элементами по четыре твэла с добавлением америция и нептуния. По результатам испытаний этих твэлов планируется получить экспериментальное подтверждение их работоспособности, необходимое для реализации промышленного выжигания минорных актинидов.

Литература

1. Vasiliev B.A., Zverev D.L., Yershov V.N. et al. Development of Fast Sodium Reactor Technology in Russia. Proc. of the Int. Conf. on Fast reactors and related fuel cycles FR13, Paris, France, 4–7 March 2013. IAEA CN199-26. 1, p. 249–263. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1665Vol1Web-68441300.pdf> (дата обращения 21.06.2025).
2. Васильев Б.А., Кузавков Н.Г., Мишин О.В. и др. «Опыт и перспективы модернизации активной зоны реактора БН-600». *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2011;1:158–168. URL: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2011/01.pdf> (дата обращения 21.06.2025).
3. Кинёв Е.А. Структура таблеточного оксидного топлива и его коррозионное воздействие на оболочку твэла реактора БН-600. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2011;1:169–176. URL: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2011/01.pdf> (дата обращения 21.06.2025).
4. Belov S., Vasiliev B., Kuznetsov A., Mumrenkov E., Farakshin M. Distinctive features of the BN-800 core in the course of transition to complete MOX-fuel loading. Proc. of the Intern. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles FR22. Vienna, 19–22 April 2022. IAEA-CN291-209. URL: <https://conferences.iaea.org/event/218/contributions/18834/> (дата обращения 21.06.2025).
5. Белов С.Б., Васильев Б.А., Кузнецов А.Е. и др. Реализация задач БН-800 в отработке элементов замкнутого ЯТЦ. *Атомная энергия*. 2025;138(1-2):31–37. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5467> (дата обращения 21.06.2025).
6. Гаджиев Г.И., Ефимов В.Н., Жемков И.Ю. и др. Обзор экспериментальных работ на реакторе БОР-60. Сборник докладов семинара «30 лет эксплуатации реактора БОР-60», Дмитровград, ГНЦ РФ НИИАР, 2000.
7. Poplavsky V.M., Zabudko L.M. Current status of studies on FR Fuel and structural materials in the Russian Federation. Influence of high dose irradiation on core structural and fuel materials in advanced reactors. IAEA-TECDOC-1039. Vienna, Austria, 1998, pp. 7–14. URL: <https://inis.iaea.org/records/xencr-ds831> (дата обращения 21.07.2025).
8. Баканов М.В., Васильев Б.А., Фаракшин М.Р. и др. Облучение экспериментальных ТВС с уран-плутониевым топливом в реакторе БН-600. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2005;1:82–86. URL: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2005/01.pdf> (дата обращения 21.06.2025).
9. Kuznetsov A.E., Vasiliev B.A., Farakshin M.R., Krukov A.N., Belov S.B. Selecting the Lay out for the hybrid core of the BN-800 reactor. Proc. of the Intern. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles FR17. Yekaterinburg, 26–29 June, 2017. IAEA-CN245-406. URL: <https://inis.iaea.org/records/0qvbt-kdd62> (дата обращения 21.06.2025).
10. Kuznetsov A., Vasiliev B., Farakshin M., Belov S., Sheryakov V. The BN-800 core with MOX fuel. Proc. of the Intern. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles FR17. Yekaterinburg, 26–29 June, 2017. IAEA-CN245-405. URL: <https://inis.iaea.org/records/akgf9-hqw21> (дата обращения 21.06.2025).
11. Никитина А.А., Агеев В.С., Леонтьева-Смирнова М.В. и др. Развитие работ по конструкционным материалам активных зон быстрых реакторов». *Атомная энергия*. 2015;119(5):292–300.

URL: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/793/772> (дата обращения 21.06.2025).

Поступила в редакцию 10.07.2025

После доработки 08.08.2025

Принята к опубликованию 20.08.2025

Авторы

Васильев Борис Александрович, советник генерального директора по топливному циклу быстрых реакторов, к.т.н.,

E-mail: bavasiliev@okbm.nnov.ru

Крюков Александр Николаевич, заместитель главного конструктора РУ БН,

E-mail: ankrukov@okbm.nnov.ru

Фарақшин Мансур Рахимжанович, начальник отдела, к.т.н.,

E-mail: farakshin@okbm.nnov.ru

Белов Сергей Борисович, начальник бюро,

E-mail: belovsb@okbm.nnov.ru

Шеряков Владимир Сергеевич, ведущий инженер-конструктор,

E-mail: vssheryakov@okbm.nnov.ru

Кузнецов Артем Евгеньевич, ведущий инженер-конструктор,

E-mail: kuznetsov_ae@okbm.nnov.ru

Филин Илья Александрович, заместитель главного инженера Белоярской АЭС,

E-mail: filin@belnpp.ru

UDC 621.039.54:621.039.526

Use of MOX Fuel in BN-800 Reactor

Vasiliev B.A.¹, Kryukov A.N.¹, Farakshin M.R.¹, Belov S.B.¹, Sheryakov V.S.¹, Kuznetsov A.E.¹, Filin I.A.²

¹ Afrikantov OKBM JSC,

15 Burnakovskiy proezd, 603074 Nizhny Novgorod, Russia

² Beloyarsk NPP,

Post office box 149, 624250 Zarechny, Sverdlovsk reg., Russia

Abstract

In accordance with the strategy for the development of two-component nuclear energy with NFC closure adopted in the Russian Federation, fast neutron reactors must ensure the effective use of mixed uranium-plutonium fuel based on plutonium extracted from SNF of thermal reactors, and then from their own SNF. The first domestic BN reactors used fuel developed by that time based on enriched uranium dioxide. The development of mixed uranium-plutonium oxide (MOX) fuel began with the irradiation of experimental fuel assemblies (FAs) in the research reactor BOR-60, as well as power reactors BN-350 and BN 600. The BN-800 design was already focused on the use of mixed uranium-plutonium fuel.

Due to the delay in the launch of industrial production of MOX fuel created at the Mining and Chemical Combine, the BN-800 was launched (2016) with a hybrid core formed mainly from FAs with uranium fuel manufactured at MSZ JSC. The share of FAs with MOX fuel manufactured at the pilot production facilities of JSC SSC NIIAR and the Production

Association MAYAK was 16%. The hybrid core was operated until the eighth operation cycle. The transition of BN-800 core to a full loading with MOX fuel was completed by the beginning of the 13th operation cycle (2023).

The period of transition to the core with a full loading with MOX fuel was characterized by a step-by-step increase, with an increase in the share of MOX FAs in the core, in the neutron flux density and, accordingly, the main operating parameters of fuel pins that determine their performance: linear thermal power, damaging dose to the cladding and fuel burnup.

For fabrication of MOX fuel, plutonium of different isotopic composition is used, which is ensured by the method implemented at the production site for adjusting the mass fraction of plutonium in the fuel. Currently, the core is being transferred to FAs with fuel cladding from more radiation-resistant steel EK164-CWAt that, which will subsequently allow starting work to increase fuel burnup. At that, compared with current core operation mode with the use of ChS68-CW steel for pin cladding, it is planned to increase fuel burnup from 9.5% h.a. up to 12% h.a. by the maximum value and from 66 MW·d/kg to 86 MW·d/kg by the average value. As part of the development of the technology for burning out minor actinides from the 14th operation cycle (2024), three FAs are irradiated in the reactor, which include four fuel elements each with the addition of americium (0.9%) and neptunium (0.6%).

Keywords: MOX fuel, fast neutron reactor, EFA, BN-800, hybrid core, plutonium, isotopic composition, minor actinides, burnup.

For citation: Vasiliev B.A., Kryukov A.N., Farakshin M.R., Belov S.B., Sheryakov V.S., Kuznetsov A.E., Filin I.A. Use of MOX Fuel in BN-800 Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;3:45–59. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.03> (in Russian).

References

1. Vasiliev B.A., Zverev D.L., Yershov V.N., Kalyakin S.G., Poplavsky V.M., Rachkov V.I., Sarayev O.M. Development of Fast Sodium Reactor Technology in Russia. Proc. of the Intern. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles FR13, Paris, France, 4–7 March 2013, IAEA-CN-199-26. Vol. 1, pp. 249–263. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1665Vol1Web-68441300.pdf> (accessed Jul. 7, 2025).
2. Vasilev B.A., Kuzavkov N.G., Mishin O.V., Radionycheva A.A., Farakshin M.R., Bibilashvili Yu.K., Ivanov Yu.A., Medvedev A.V., Mitrofanova N.M., Tselishchev A.V., Zabudko L.M., Matveev V.I., Khomyakov Yu.S., Chyorny V.A. Experience and prospects of the reactor BN-600 core modernization. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2011;1:158–168. URL: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2011/01.pdf> (accessed Jul. 7, 2025) (in Russian).
3. Kinev E.A. Structure of pellet oxide fuel and its corrosive effect on the fuel cladding of the BN-600 reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2011;1:169–176. URL: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2011/01.pdf> (accessed Jul. 7, 2025) (in Russian).
4. Belov S., Vasiliev B., Kuznetsov A., Mumrenkov E., Farakshin M. Distinctive features of the BN-800 core in the course of transition to complete MOX-fuel loading. Proc. of the Intern. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles FR22. Vienna, 19–22 April 2022. IAEA-CN291-209. URL: <https://conferences.iaea.org/event/218/contributions/18834/> (accessed Jul. 7, 2025).
5. Belov S.B., Vasiliev B.A., Kuznetsov A.E., Farakshin M.R. BN-800 objectives in the development of a closed NFC. *Atomnaya energiya*. 2025;138(1-2):31–37. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5467> (accessed Jul. 7, 2025) (in Russian).
6. Gadzhiev G.I., Efimov V.N., Zhemkov I.Yu., Korol'kov A.S., Mayorshin A.A., Polyakov V.I., Shamardin V.K., Shtynda Yu. E., Revyakin Yu.L. Overview of experimental work at the BOR-60 reactor. Proc. of the conf. '30 years of the BOR-60 reactor operation', Dimitrovgrad, JSC SRC RIAR, 2000 (in Russian).

7. Poplavsky V.M., Zabudko L.M. Current status of studies on FR Fuel and structural materials in the Russian Federation. Influence of high dose irradiation on core structural and fuel materials in advanced reactors. IAEA-TECDOC-1039. Vienna, Austria, 1998, pp. 7–14. URL: <https://inis.iaea.org/records/xencr-ds831> (accessed Jul. 7, 2025).

8. Bakanov M.V., Babenko G.V., Maltsev V.V., Roslyakov V.F., Vasiliev B.A., Mishin O.V., Klimashina T.A., Farakshin M.R. Irradiation of experimental fuel assemblies with uranium-plutonium fuel in the BN-600 reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2005;1:82–86. URL: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2005/01.pdf> (accessed Jul. 7, 2025) (in Russian).

9. Kuznetsov A.E., Vasiliev B.A., Farakshin M.R., Krukov A.N., Belov S.B. Selecting the Lay out for the hybrid core of the BN-800 reactor. Proc. of the Intern. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles FR17. Yekaterinburg, 26–29 June, 2017. IAEA-CN245-406. URL: <https://inis.iaea.org/records/0qvt-kdd62> (accessed Jul. 7, 2025).

10. Kuznetsov A., Vasiliev B., Farakshin M., Belov S., Sheryakov V. The BN-800 core with MOX fuel. Proc. of the Intern. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles FR17. Yekaterinburg, 26–29 June, 2017. IAEA-CN245-405. URL: <https://inis.iaea.org/records/akgf9-hqw21> (accessed Jul. 7, 2025).

11. Nikitina A.A., Ageev V.S., Leont'eva-Smirnova M.V., Mitrofanova N.M., Naumenko I.A., Tselyshev A.V., Chernov V.M. Advances in Structural Materials for Fast-Reactor Cores. *Atomic energy*. 2016;119:362–371. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-016-0074-2>

Authors

Boris A. Vasilyev, Advisor to the General Director for the Fast Reactor Fuel Cycle, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: bavasiliev@okbm.nnov.ru

Alexandr N. Kryukov, Deputy Chief Designer of BN Reactor Plants,

E-mail: ankrukov@okbm.nnov.ru

Mansur R. Farakshin, Head of the Department, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: farakshin@okbm.nnov.ru

Sergei B. Belov, Head of group,

E-mail: belovsb@okbm.nnov.ru

Vladimir S. Sheryakov, Leading Design Engineer,

E-mail: vssheryakov@okbm.nnov.ru

Artem E. Kuznetsov, Leading Design Engineer,

E-mail: kuznetsov_ae@okbm.nnov.ru

Ilia A. Filin, Deputy Chief Engineer of Beloyarsk NPP,

E-mail: filin@belnpp.ru