

УДК 621.039.51

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.06>

Оригинальная статья / Original paper

Экспериментальная оценка эффективности гетерогенного выжигания минорных актинидов в боковых экранах реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем

А.Л. Ижutow¹, Д.А. Корнилов¹, Ю.В. Набойщиков¹, И.Ю. Жемков¹, А.И. Меркулов¹, О.В. Ишунина¹, В.Н. Момотов¹, С.В. Абрамов¹, Д.Е. Тихонова¹, Г.В. Шевляков¹, А.В. Угрюмов², Е.В. Пидопригора², А.Ю. Хомяков²

¹ АО «ГНЦ НИИАР»,

433510 Россия, Ульяновская обл., г. Димитровград, Западное ш., 9

² АО «ТВЭЛ»,

115409 Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 49

Реферат. Рассматривается задача по утилизации минорных актинидов (МА), образующихся в ядерном топливе энергетических реакторов. Актуальность работы обусловлена высокой радиотоксичностью и длительным периодом полураспада МА (нептуний и америций), определяющих опасность хранения отработавшего ядерного топлива или продуктов его переработки. Представлены результаты экспериментальных исследований по подтверждению эффективности гетерогенного выжигания МА в боковых экранах реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. В реакторе БОР-60 проведены испытания трех партий экспериментальных выжигательных элементов (мавэлы) с оксидами МА (NpO_2 и AmO_2) в условиях жесткого спектра нейтронов (на границе активной зоны и бокового экрана) и в смягченном спектре (на периферии бокового экрана с замедляющими устройствами). В статье описаны сценарий и основные нейтронно-физические характеристики проведенного эксперимента. Проведен анализ результатов послереакторных неразрушающих материаловедческих исследований мавэлов и радиохимических исследований облученных МА. Представлены результаты сравнения расчетно-экспериментальных данных по эффективности выжигания МА в условиях бокового экрана быстрого натриевого реактора. Экспериментально подтверждены более высокие темпы выгорания МА в смягченном спектре нейтронов. Расчетные и экспериментальные данные по основным нуклидам согласуются в пределах 4–5%. Продемонстрирована реализуемость фабрикация мавэлов методом виброуплотнения и возможность переработки облученных МА. Завершены реакторные испытания мавэлов с рециклированными

© Ижutow А.Л., Корнилов Д.А., Набойщиков Ю.В., Жемков И.Ю., Меркулов А.И., Ишунина О.В., Момотов В.Н., Абрамов С.В., Тихонова Д.Е., Шевляков Г.В., Угрюмов А.В., Пидопригора Е.В., Хомяков А.Ю., 2026

МА. Сделан вывод о перспективности утилизации МА в боковых экранах быстрых натриевых реакторов с применением технологии гетерогенного выжигания МА в смягченном спектре нейтронов. Запланированы реакторные испытания макетов мавэлов в реакторе БОР-60 для обоснования параметров демонстрационного эксперимента по утилизации МА в энергетическом реакторе БН-800.

Ключевые слова: минорные актиниды, гетерогенное выжигание, боковой экран реакторов на быстрых нейтронах, экспериментальные исследования, смягченный спектр нейтронов.

Для цитирования: Ижухов А.Л., Корнилов Д.А., Набойщиков Ю.В., Жемков И.Ю., Меркулов А.И., Ишунина О.В., Момотов В.Н., Абрамов С.В., Тихонова Д.Е., Шевляков Г.В., Угрюмов А.В., Пидопригора Е.В., Хомяков А.Ю. Экспериментальная оценка эффективности гетерогенного выжигания минорных актинидов в боковых экранах реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;2:83–96. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.06>

Введение

Проблема обращения с минорными актинидами (МА) и их утилизации сохраняет свою актуальность на протяжении десятков лет [1 – 3], поскольку именно они (нептуний, америций, кюрий) вносят основной вклад в тепловыделение и радиотоксичность отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Хотя эти три элемента и образуются в относительно небольших количествах, но, обладая большими периодами полураспада, определяют активность ОЯТ и продуктов его переработки на временном горизонте от 300 лет до 10 млн лет. Например, в ОЯТ реактора типа ВВЭР в одной тонне содержится 950 – 980 кг урана, 5 – 10 кг плутония и около килограмма МА [4, 5].

Существующие схемы обращения с МА предполагают два основных варианта: длительное хранение или утилизация. Поскольку на настоящий момент в мире отсутствуют готовые технологии, обеспечивающие эффективную утилизацию МА, то большинство стран выбирают вариант хранения. При этом очевидно, что при современном уровне развития техники и технологий концепция длительного безопасного хранения МА на протяжении миллионов лет сталкивается с технологическими и регуляторными ограничениями, поэтому этот вариант может рассматриваться только как временная мера до появления технологий, обеспечивающих либо их безопасное захоронение, либо эффективную утилизацию.

В качестве возможных вариантов утилизации МА в мировом научном сообществе рассматриваются различные варианты утилизации МА [6 – 9], предполагающие использование как действующих реакторов, так и специально разрабатываемых реакторов-выжигателей (жидкосолевые реакторы, ADS-системы и т.д.).

Постановка задачи

В качестве наиболее перспективного направления в настоящее время рассматривается утилизация МА с применением действующих реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (РБН). Эффективная утилизация МА в РБН предполагает их деление, обеспечивающее положительный баланс нейтронов, выделение тепло-

вой энергии и образование короткоживущих продуктов деления (ПД), обращение с которыми более простое, чем с МА. Деление может происходить либо напрямую, в первом взаимодействии с нейтронами, либо косвенно: сначала через радиационный захват нейтрона (возможно неоднократный), за которым следует захват нейтрона, приводящий к делению. Сечения реакции как для прямого, так и для косвенного деления МА [10] имеют довольно низкие значения в характерном спектре нейтронов РБН. Следовательно, для получения высокой эффективности утилизации МА необходимо сочетание длительной экспозиции при облучении и высоких плотностей потоков нейтронов, которые могут быть достигнуты в РБН.

При этом рассматриваются две возможные концепции утилизации: гомогенная трансмутация МА в составе штатного ядерного топлива (ЯТ) и гетерогенное выжигание минорных актинидов (ГВМА) в составе отдельныхборок (включая размещение МА в отдельных элементах в составе гомогенной смеси с инертной матрицей).

Действующие в России РБН (БОР-60, БН-600 и БН-800) имеют боковой экран (БЭ), состоящий из нескольких рядовборок. В настоящее время этот экран практически не используется для воспроизводства ЯТ, что создает предпосылки его использования в целях утилизации МА. Рассматриваемая в данной статье концепция ГВМА предполагает включение МА в отдельные специально разработанные сборки БЭ, конструкция которых может значительно отличаться от штатныхборок. Согласно расчетным оценкам [11], такой вариант утилизации МА предпочтительнее благодаря возможности смягчения спектра нейтронов, что значительно увеличивает ее интенсивность.

Для экспериментального подтверждения эффективности предлагаемой схемы ГВМА, а также для отработки основных технологических операций по выделению МА из ОЯТ, их компоновки в специальные сборки для проведения облучения в реакторе на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем и обращения с облученными МА [12, 13] в АО «ГНЦ НИИАР» был проведен комплекс расчетно-экспериментальных исследований.

Анализ опыта применения высокоэффективного замедлителя в БЭ реактора БОР-60 [14] и результатов проведенных расчетных исследований показал, что в БЭ исследовательского реактора БОР-60 [15] можно создать условия для обеспечения эффективной утилизации МА. Спектр нейтронов (S_n) в реакторе БОР-60 жестче, чем в БН-800, однако диапазон изменения S_n в БЭ достаточно большой, а с учетом возможности его смягчения он перекрывает всю область, которая может представлять интерес при реализации ГВМА в энергетическом РБН (рис. 1) [16, 17].

Выделение МА и фабрикация мавэлов

До начала реакторного эксперимента по выжиганию МА в боковом экране были выполнены эксперименты, подтвердившие технологическую реализуемость основных операций по получению композиций с МА требуемого состава и изготовлению специальных экспериментальных выжигательных элементов (мавэлов). Были получены порошки оксида америция и оксида нептуния в количествах, необходимых для изготовления двух партий ампульных мавэлов.

Экспериментальные исследования по подтверждению эффективности ГВМА предполагали облучение двух облучательных устройств (ОУ) с мавэлами в исследо-

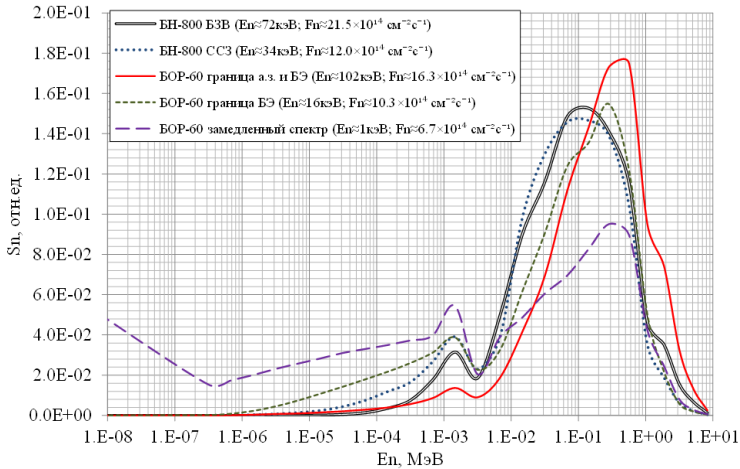


Рис. 1. Спектры нейтронов реакторов BOR-60 и BN-800

вательском реакторе BOR-60 в различных условиях: в жестком спектре нейтронов на границе активной зоны и БЭ (ячейка Б30) и на периферии БЭ (ячейка Б10) в окружении трех специальных замедляющих нейтроны устройств (ЗУ). Первоначально в каждом из двух ОУ размещались по два мавэла с порошками NpO_2 и AmO_2 . В ходе проведения эксперимента осуществлялась поэтапная выгрузка облученных мавэлов, что обеспечивало возможность экспериментального определения нуклидного состава ампул с МА на разных этапах и темпа выжигания МА.

При этом из первой партии выгруженных мавэлов для демонстрации возможности переработки облученных МА после проведения послереакторных исследований (ПРИ) были изготовлены мавэлы с рециклированными МА. После выгрузки из реактора второй партии мавэлов для проведения ПРИ в ОУ была загружена третья партия мавэлов с рециклированными МА (партия ЗБ) и дополнительно изготовленные мавэлы, содержащие AmO_2 для получения дополнительных экспериментальных данных по выгоранию Am (партия ЗА). Массы порошков оксидов МА в мавэлах, облучавшихся в реакторе BOR-60, представлены в табл. 1 (АЦ – с исходной загрузкой AmO_2 , НЦ – с исходной загрузкой NpO_2).

Таблица 1

Массы загрузки оксидов МА в мавэлы, г

Партия	ОУ-1 (Б10)		ОУ-2 (Б30)		
	АЦ04	НЦ03	АЦ03	НЦ04	
1	3,58		3,71		
		9,66		9,93	
2	3,49		3,53		
		9,72		9,63	
ЗА	АЦ07	2,41	АЦ08	2,59	
ЗБ (Рециклированные МА)	АЦ05	0,78	АЦ06	0,76	
		2,35	НЦ10	2,79	
Масса оксидов МА	10,3	21,7	10,6	22,4	
Масса AmO_2	20,9 (рециклированного 1,5)				
Масса NpO_2	44,1 (рециклированного 5,1)				

Реакторные испытания

Реакторные эксперименты по облучению данных мавзлов проводились в исследовательском реакторе на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем БОР-60 с декабря 2020 г. Картограмма загрузки реактора БОР-60 в первую микрокампанию проведения эксперимента представлена на рис. 2. На картограмме красным цветом отмечены установленные ОУ, а фиолетовым – ЗУ. Спектры нейтронов в исследуемых мавзлах на начало реакторных испытаний в ОУ-1 и ОУ-2 представлены на рис. 3.

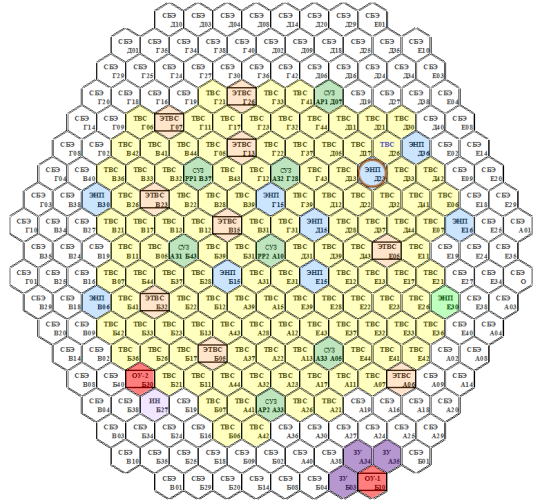


Рис. 2. Картограмма реактора БОР-60

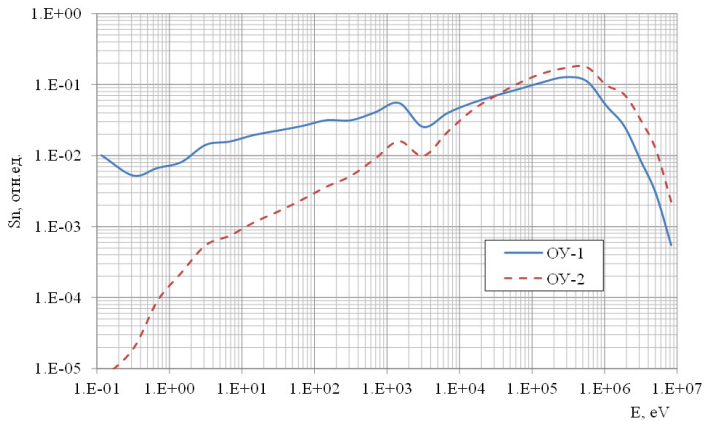


Рис. 3. Спектр нейтронов в мавзлах на начало испытаний

Основные параметры реактора БОР-60 в процессе проведения испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры реактора БОР-60 при проведении испытаний

Микрокампания реактора			Энерговыработка реактора, ГВт×ч	Тепловая мощность реактора, МВт		Партия			
Начало	Окончание	Продолжительность, сут.		Средняя	Максимальная	1	2	3А	3Б
26.12.2020	07.02.2021	42,9	44,0	42,7	50,5	X	X		
27.02.2021	03.05.2021	65,2	72,9	46,6	50,9	X	X		
19.06.2021	03.08.2021	45,0	43,1	39,9	42,8		X		
10.09.2021	11.11.2021	62,4	72,1	48,1	50,5		X		
25.12.2021	13.02.2022	49,7	52,7	44,2	50,4		X		
11.03.2022	03.05.2022	52,2	59,2	47,3	48,6		X		

18.06.2022	02.08.2022	44,8	40,8	379	46,2	X		
23.08.2022	16.10.2022	53,9	55,4	42,8	45,3	X		
03.12.2022	05.02.2023	64,2	75,7	49,1	50,3		X	X
22.02.2023	24.04.2023	60,7	71,1	48,8	50,4		X	X
20.06.2023	06.08.2023	47,3	48,8	42,9	44,0		X	X
29.08.2023	06.11.2023	68,8	81,5	49,3	50,6		X	X
23.12.2023	03.02.2024	42,3	27,3	26,9	50,0		X	X
21.03.2024	12.05.2024	51,5	60,9	49,2	50,2		X	X
20.06.2024	20.07.2024	30,4	33,2	45,5	47,2			X
14.02.2025	17.04.2025	62,2	65,3	43,8	50,4			X
18.06.2025	03.08.2025	45,8	46,4	42,2	45,4			X
Партия 1		108,1	116,8	45,0	АЦ03, АЦ04 и НЦ04, НЦ03			
Партия 2		416,0	440,0	44,1	АЦ01, АЦ02 и НЦ01, НЦ02			
Партия 3А		334,8	365,2	45,4	АЦ07 и АЦ08			
Партия 3Б		473,2	510,0	44,9	АЦ05 АЦ06 и НЦ09 НЦ10			

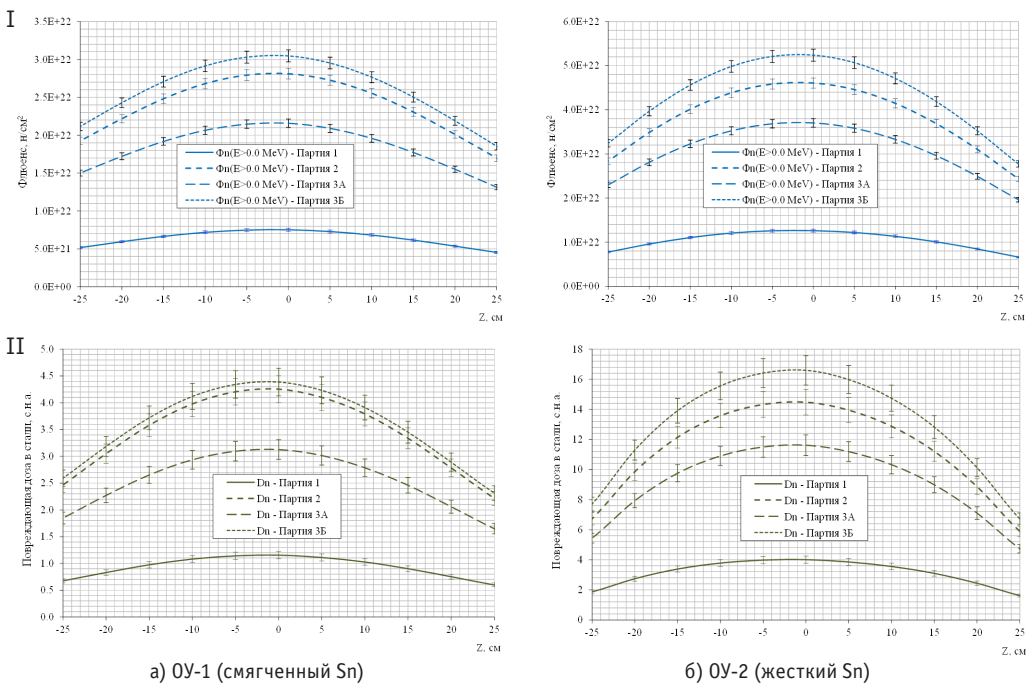


Рис. 4. Основные нейтронно-физические характеристики облученных мавзлов

Основные нейтронно-физические характеристики (флюенс нейтронов – Φ_n , повреждающая доза в стали – D_n) мавзлов, достигнутые на момент завершения реакторных испытаний, в ОУ-1 (смягченный спектр нейтронов) представлены на рис. 4а, а в ОУ-2 – на рис. 4б.

Значения основных нейтронно-физических характеристик в центральной плоскости а.з. представлены в табл. 3.

Таблица 3

Основные нейтронно-физические характеристики мавэлов

Партия	Фн($E > 0,0$ MeV), н/см ²		Dn, с.н.а.	
	ОУ-1	ОУ-2	ОУ-1	ОУ-2
1	7,53E+21	1,26E+22	1,2	4,0
2	2,81E+22	4,61E+22	4,3	14,5
3А	2,16E+22	3,70E+22	3,1	11,6
3Б	3,05E+22	5,24E+22	4,4	16,6

Из анализа нейтронно-физических характеристик и величин флюенса нейтронов, достигнутых в мавэлах на момент завершения реакторных испытаний, следует, что в мавэлах, облучавшихся в ячейке со смягченным спектром нейтронов, интегральный флюенс нейтронов меньше в 1,7 раза, а повреждающая доза в стали, определяющая ресурс конструкционных материалов, – меньше в 3 – 4 раза.

Послереакторные исследования

После завершения реакторных испытаний для всех облученных мавэлов выполнялся комплекс послереакторных исследований, включающих в себя материаловедческие неразрушающие исследования мавэлов и радиохимические исследования облученных порошков оксидов америция и нептуния. Неразрушающие послереакторные материаловедческие исследования включали в себя визуальную инспекцию до и после снятия дистанционирующей проволоки и очистки поверхности оболочки, рентгеновскую радиографию, гамма-сканирование, измерение температуры оболочки, измерение длины мавэлов.

По результатам послереакторных неразрушающих исследований мавэлов трех партий наблюдаются следующие закономерности.

1. Не обнаружено повреждений мавэлов и следов коррозии на их оболочках.
2. Сердечники с виброуплотненными исходными МА фрагментировались.
3. В мавэлах, облучавшихся в смягченном спектре нейтронов, наблюдается большая концентрация радионуклидов ¹⁰⁶Ru и ⁹⁵Zr, чем в мавэлах, облучавшихся на границе а.з. и БЭ, что подтверждает расчетные данные о большей глубине выгорания МА.
4. Особенности распределения продуктов деления по высоте обусловлены неравномерностью распределения делящегося компонента и различным поведением их в облучаемых оксидах вследствие различия физических и химических свойств.
5. Активность изотопов ⁵⁴Mn и ⁵⁸Co, наработка которых пропорциональна флюенсу быстрых нейтронов, выше в мавэлах, облучавшихся на границе а.з. и БЭ. Активность изотопа ⁶⁰Co, наработка которого происходит преимущественно на тепловых нейтронах, больше в мавэлах, облучавшихся в смягченном спектре нейтронов.
6. Расчетные и экспериментально определенные максимальные температуры оболочек мавэлов совпадают в пределах расчетно-экспериментальной погрешности, что косвенно подтверждает корректность расчетов остаточного тепловыделения, зависящего от трансмутации и выжигания МА.

Послереакторные радиохимические исследования мавэлов включали в себя растворение исследуемого образца вместе с оболочкой, приготовление рабочего

раствора, α -, γ -спектрометрический анализ, проведение сорбционного выделения нуклидов плутония и МА для масс-спектрометрических измерений изотопного состава, повторение сорбционного выделения нуклидов плутония, америция в присутствии комплексной метки для измерения массового содержания элементов.

К настоящему моменту полностью завершены радиохимические исследования мавэлов первой и второй партий [18 – 20].

Анализ эффективности гетерогенного выжигания минорных актинидов

Для первой партии мавэлов отличие расчетных и экспериментальных данных по массам исходных нуклидов не превышает 5%, а по массам сумм МА (учет трансмутации и выгорания) – 4%. Анализ результатов радиохимических исследований второй партии показывает незначительное снижение отклонения расчетных и экспериментальных данных по исходным нуклидам до ~ 4%, а также по массам сумм МА.

Проведенные расчетно-экспериментальные исследования нуклидной кинетики партий мавэлов показывают, что при облучении в смягченном спектре нейтронов наблюдаются более высокие темпы

- уменьшения загрузки исходных МА (рис. 5-I);
- выгорания МА (рис. 5-II).

При этом указанная тенденция наблюдается как для Am (рис. 5а), так и для Np (рис. 5б).

Из представленных на рисунке данных следует, что наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных по уменьшению исходных МА. Наблю-

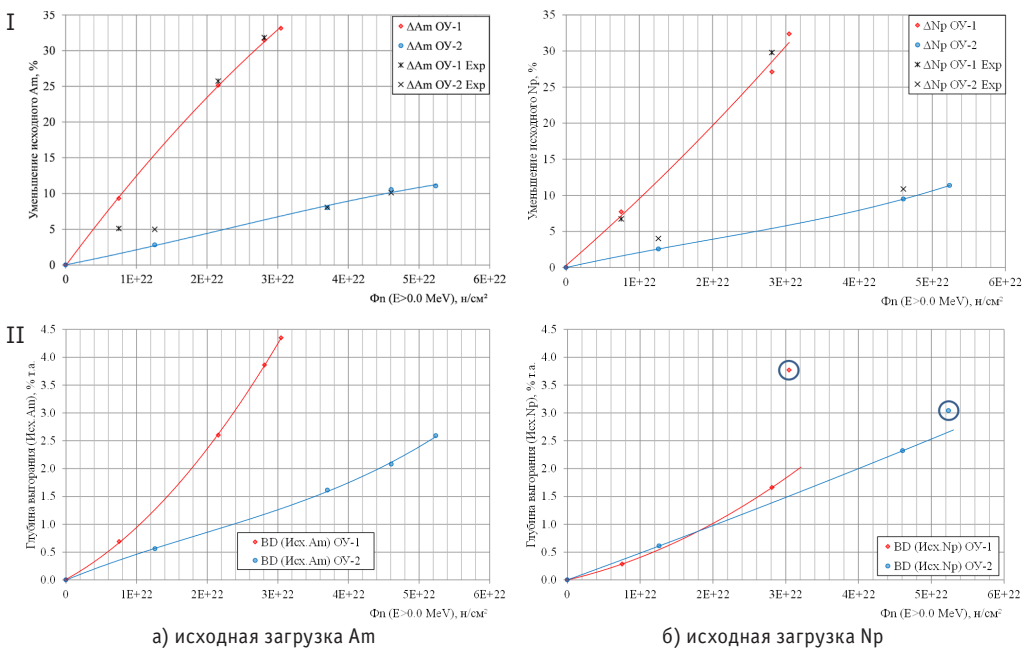


Рис. 5. Основные параметры нуклидной кинетики МА в мавэлах

даемые отличия на рис. 5-I-a объясняются малой продолжительностью реакторных испытаний. Также следует отметить явные отклонения от тренда для глубины выгорания в мавэлах с Np (рисунок 5-II-б), что связано с наличием в исходной загрузке рециклированных МА плутония, образовавшегося на этапе облучения первой партии.

Однако следует отметить, что в нуклидах МА, «далеких» от исходных, наблюдаются более значительные отклонения. Это может быть связано как с погрешностями и ошибками измерения малых концентраций, так и с расчетными данными. По данному направлению требуются дополнительные исследования, для проведения которых привлекаются ведущие организации отрасли [21].

Заключение

В рамках экспериментального подтверждения эффективности гетерогенного выжигания минорных актинидов в боковых экранах реакторов на быстрых нейтронах получены более высокие темпы выгорания МА и уменьшения исходных МА (трансмутации) при использовании замедлителя.

Продемонстрирована реализуемость получения МА с применением различных технологий и фабрикация навески МА методом виброуплотнения. Также проведены реакторные испытания рециклированных МА после первого этапа реакторных испытаний.

Для двух партий мавэлов полностью завершены материаловедческие и радиохимические послереакторные исследования. Результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются с результатами расчетных исследований. Завершены материаловедческие послереакторные исследования третьей партии мавэлов и проводятся радиохимические исследования. Полученные к настоящему времени результаты также хорошо согласуются с расчетными оценками.

В настоящее время проводятся подготовительные работы по испытанию в реакторе БОР-60 макетов мавэлов в обоснование безопасности и параметров проведения запланированного в реакторе БН-800 эксперимента с целью демонстрации эффективности технологии гетерогенного выжигания МА в энергетическом РБН.

Литература

1. Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Status and Assessment Report. OECD-NEA, 1999. URL: <https://www.oecd-nea.org/trw/docs/neastatus99/> (дата обращения 20.03.2026).
2. Advanced nuclear fuel cycles and radioactive waste management. OECD/NEA, 2006, Report No. 5990, 245 p. URL: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/5990-advanced-nfc-rwm.pdf> (дата обращения 20.03.2026).
3. Status of minor actinide fuel development. IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES PUBLICATIONS. No. NF-T-4.6. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2009. URL: <https://www.iaea.org/publications/8224/status-of-minor-actinide-fuel-development> (дата обращения 20.03.2026).
4. Fairhall G. Minor Actinide Transmutation. National Nuclear Laboratory, 2013.
5. Magwood W.D., Paillere H. Looking ahead at reactor development. Progress in Nuclear Energy. 2018;102:58–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.07.001>

6. Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles. A Comparative Study. NEA OECD, 2002, 350 p. URL: <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2002/nea3109-ads.pdf> (дата обращения 20.03.2026).
7. Baldev Raj, P. Chellapandi, P.R. Vasudeva Rao. Sodium Fast Reactors with Closed Fuel Cycle. CRC PressTaylor& Francis Group, 2015.
8. Жемков И.Ю. Трансмутация младших актинидов как способ уменьшения высокоактивных отходов в ядерной энергетике. Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР», 2020, № 4, с. 10–18.
9. Жемков И.Ю. Набойщиков Ю.В. Уменьшение радиационной опасности младших актинидов при облучении в различных спектрах нейтронов. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» – 2024 г. Димитровград, АО «ГНЦ НИИАР», 2025, с. 31–35. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_82507811_67999246.pdf (дата обращения 20.03.2026).
10. Жемков И.Ю., Набойщиков Ю.В. Эффективность выжигания минор-актинидов в быстром и промежуточном спектрах нейтронов. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2025;1:31–43. URL: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2025/issue2025-1-31-43.pdf> (дата обращения 20.03.2026).
11. Жемков И.Ю., Набойщиков Ю.В., Погляд С.С. Гетерогенное выжигание младших актинидов в реакторе на быстрых нейтронах. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» – 2018 г. Димитровград, АО «ГНЦ НИИАР», 2019, с. 136–139. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41550520&selid=41550568> (дата обращения 20.03.2026).
12. Гурьева М.Н., Жемков И.Ю., Ижутов А.Л., Момотов В.Н., Набойщиков Ю.В., Фокеева Е.В. Разработка и обоснование технологии гетерогенного выжигания младших актинидов в реакторе БОР-60. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» – 2021 г. Димитровград, АО «ГНЦ НИИАР», 2022, с. 23–27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49749310> (дата обращения 20.03.2026).
13. Жемков И.Ю., Ижутов А.Л., Набойщиков Ю.В., Тузов А.А. Гетерогенное выжигание минор-актинидов в реакторе на быстрых нейтронах. Сборник докладов отраслевой научно-технической конференции, Сочи, 28–29 октября 2021 г. С. 137–146.
14. Варивцев А.В. Жемков И.Ю. Расчетные исследования характеристик ячейки реактора БОР-60 со «смягченным» спектром нейтронов. Сборник трудов ФГУП ГНЦ НИИАР, Димитровград, 2007, вып. 3, с. 34–40.
15. Жемков И.Ю. Набойщиков Ю.В. Эффективность выжигания младших актинидов при облучении в различных спектрах нейтронов. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» – 2023 г. Димитровград, АО «ГНЦ НИИАР», 2024, с. 34–37. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=74032245> (дата обращения 20.03.2026).
16. Жемков И.Ю., Набойщиков Ю.В., Полежаев А.А., Хасанова А.Э. Расчетные исследования эффективности выжигания младших актинидов. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» – 2019 г. Димитровград, АО «ГНЦ НИИАР», 2020, с. 27–30. URL: https://niiar.ru/sites/default/files/ngo-2019_sayt.pdf (дата обращения 20.03.2026).
17. Камаев А.А., Klinov D.A., et.al. Calculation and experimental analysis of the BN-800 reactor core neutronic parameters at the stage of reaching first criticality followed by rated power testing. FR-2017 Conference, IAEA-CN245-462.
18. Волков А.Ю., Тихонова Д.Е., Макаров А.О., Момотов В.Н., Хамдеев М.И., Пылаева А.А. Выделение и анализ состава нептуния и америция из облученных мавэлов. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» – 2022 г. Димитровград, АО «ГНЦ НИИАР», 2023, с. 191–193. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_60033444_20958535.pdf (дата обращения 20.03.2026).
19. Момотов В.Н., Волков А.Ю., Тихонова Д.Е. Послереакторные радиохимические исследования диоксидов нептуния и америция, облученных в реакторе БОР-60. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» за 2022 г. Димитровград, АО «ГНЦ НИИАР», 2023, с. 193–196. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_60033444_20958535.pdf

20. Тихонова Д.Е., Волков А.Ю., Момотов В.Н., Угрюмов А.В., Ишунин В.С. Результаты послереакторных радиохимических исследований америция, облученного в реакторе БОР-60. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» – 2024 г. Димитровград, АО «ГНЦ НИИАР», 2025, с. 184. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_82507811_67999246.pdf (дата обращения 20.03.2026).

21. Левченко Ю.В., Слюняев М.Н., Перегудов А.А., Мишин В.А., Лосев В.В., Жемков И.Ю., Ишунина О.В., Меркулов А.И., Набойщиков Ю.В. Анализ экспериментов по гетерогенному выжиганию МА в реакторе БОР-60 на основе тестовых моделей. Материалы ядерной техники: сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Материалы ядерной техники (МАЯТ-2025)». Москва, АО «ВНИИНМ», 2025, 166 с.

Поступила в редакцию 23.03.2026

После доработки 30.04.2026

Принята к опубликованию 12.05.2026

Авторы

Ижутов Алексей Леонидович, заместитель директора – научный руководитель, к.т.н.,
E-mail: izhutov@niiar.ru

Корнилов Дмитрий Александрович, ученый секретарь, к.ф.-м.н.,
E-mail: kornilovda@niiar.ru

Набойщиков Юрий Владимирович, начальник лаборатории,
E-mail: n_yu_v@niiar.ru

Жемков Игорь Юрьевич, главный научный сотрудник – эксперт, д.т.н.,
E-mail: ziu@niiar.ru

Меркулов Андрей Иванович, младший научный сотрудник,
E-mail: aimerkulov@niiar.ru

Ишунина Ольга Васильевна, старший научный сотрудник,
E-mail: iov@niiar.ru

Момотов Владимир Николаевич, заместитель начальника ОРТ по науке и технологиям,
к.х.н.,

E-mail: momotov@niiar.ru

Абрамов Сергей Валентинович, начальник отделения радиохимических технологий,
E-mail: bri@niiar.ru

Тихонова Дарья Евгеньевна, младший научный сотрудник,
E-mail: bri@niiar.ru

Шевляков Григорий Владимирович, начальник лаборатории,
E-mail: bri@niiar.ru

Угрюмов Александр Валерьевич, старший вице-президент по научно-технической деятельности, к.т.н.,

E-mail: AVUgryumov@tvel.ru

Пидопригора Евгений Владимирович, руководитель проектного офиса,
E-mail: EvVPidoprigora@tvel.ru

Хомяков Андрей Юрьевич, главный специалист,
E-mail: AYKhomyakov@tvel.ru

UDC 621.039.51

Experimental Evaluation of the Effectiveness of Heterogeneous Burning of Minor Actinides in the Lateral Blankets of a Sodium Coolant Fast Reactors

Izhutov A.L.¹, Kornilov D.A.¹, Naboyshchikov Yu.V.¹, Zhemkov I.Yu.¹, Merkulov A.I.¹, Ishunina O.V.¹, Momotov V.N.¹, Abramov S.V.¹, Tikhonova D.E.¹, Shevlyakov G.V.¹, Ugryumov A.V.², Pidoprigora E.V.², Khomyakov A.Yu.²

¹ RIAR JSC,

9 Zapadnoye Sh., 433510 Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., Russia

² TVEL JSC,

49 Kashirskoe Sh., 115409 Moscow, Russia

Abstract

The paper addresses the problem of minor actinide (MA) disposal, which are generated in nuclear fuel of power reactors. The relevance of the study is determined by the high radiotoxicity and long half-life of MA (neptunium and americium), which pose significant hazards in the storage of spent nuclear fuel. The paper presents the results of experimental studies confirming the efficiency of heterogeneous MA burning in the lateral shields of sodium-cooled fast neutron reactors. Tests of three batches of experimental MA burning elements (MABEL) containing MA oxides (NpO_2 and AmO_2) were conducted in the BOR-60 reactor. The experiments were carried out in two neutron spectrum: in a hard neutron spectrum (at the boundary between the core and the lateral shield); in a softened neutron spectrum (at the periphery of the lateral shield with using moderator). The article describes the scenario and key neutron-physical characterizations of the experiment. An analysis was performed of post-irradiation examination research of the MABEL and radiochemical studies of the irradiated MA. The paper presents a comparison of computational and experimental data on MA burning efficiency in the lateral shield of a sodium-cooled fast reactor. The experiments confirmed higher MA burn-up rates in the softened neutron spectrum. Computational and experimental data for the main nuclides agree within 4–5%. The feasibility of MABEL fabrication via vibration compaction and the possibility of processing irradiated MA have been demonstrated. Reactor tests of MABEL with recycled MA have been completed. It is concluded that MA disposal in the lateral shields of sodium-cooled fast reactors using the technology of heterogeneous MA burning in a softened neutron spectrum is promising. Reactor tests of models of MABEL to substantiate the parameters for a demonstration experiment on MA disposal in the BN-800 power reactor in the BOR-60 are planned.

Keywords: minor actinides, heterogeneous burning, lateral blanket of fast neutron reactors, experimental studies, softened neutron spectrum.

For citation: Izhutov A.L., Kornilov D.A., Naboyshchikov Yu.V., Zhemkov I.Yu., Merkulov A.I., Ishunina O.V., Momotov V.N., Abramov S.V., Tikhonova D.E., Shevlyakov G.V., Ugryumov A.V., Pidoprigora E.V., Khomyakov A.Yu. Experimental Evaluation of the Effectiveness of Heterogeneous Burning of Minor Actinides in the Lateral Blankets of a Sodium Coolant Fast Reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;2:83–96. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.06> (in Russian).

References

1. Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Status and Assessment Report. OECD-NEA, 1999. URL: <https://www.oecd-nea.org/trw/docs/neastatus99/> (дата обращения 20.03.2026).
2. Advanced nuclear fuel cycles and radioactive waste management. OECD/NEA, 2006, Report No. 5990, 245 p. URL: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/5990-advanced-nfc-rwm.pdf> (accessed Mar. 20, 2026).

3. Status of minor actinide fuel development. IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES PUBLICATIONS. No. NF-T-4.6. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2009. URL: <https://www.iaea.org/publications/8224/status-of-minor-actinide-fuel-development> (accessed Mar. 20, 2026).
4. Fairhall G. Minor Actinide Transmutation. National Nuclear Laboratory, 2013.
5. Magwood W.D., Paillere H. Looking ahead at reactor development. Progress in Nuclear Energy. 2018;102:58–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.07.001>
6. Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles. A Comparative Study. NEA OECD, 2002, 350 p. URL: <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2002/nea3109-ads.pdf> (accessed Mar. 20, 2026).
7. Baldev Raj, P. Chellapandi, P.R. Vasudeva Rao. Sodium Fast Reactors with Closed Fuel Cycle. CRC PressTaylor& Francis Group, 2015.
8. Zhemkov I.Yu. Transmutation of minor actinides as a way to reduce high-level waste in nuclear power engineering. Sbornik trudov AO GNTS NIIAR. Proc. of RIAR, 2020, no. 4, p. 10–18.
9. Zhemkov I.Yu., Naboishchikov Yu.V. Reducing the radiation hazard of junior actinides when irradiated in various neutron spectra. Scientific Annual Report of RIAR JSC – 2024. Dimitrovgrad, 2025, RIAR JSC Publ., p. 31–35. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_82507811_67999246.pdf (accessed Mar. 20, 2026) (in Russian).
10. Zhemkov I.Yu., Naboishchikov Yu.V. Efficiency of minor actinide burning in fast and intermediate neutron spectra. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants*, 2025;1:31–43. URL: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2025/issue2025-1-31-43.pdf> (accessed Mar. 20, 2026) (in Russian).
11. Zhemkov I.Yu., Naboishchikov Yu.V., Poglyad S.S. Heterogeneous burning of minor actinides in a fast neutron reactor. Scientific Annual Report of RIAR JSC – 2018. Dimitrovgrad, 2019, RIAR JSC Publ., p. 136–139. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41550520&selid=41550568> (accessed Mar. 20, 2026) (in Russian).
12. Guryeva M.N., Zhemkov I.Yu., Izhutov A.L., Momotov V.N., Naboishchikov Yu.V., Fokeeva E.V. Development and substantiation of technology for heterogeneous combustion of minor actinides in the BOR-60 reactor. Scientific Annual Report of RIAR JSC – 2021. Dimitrovgrad, 2022, RIAR JSC Publ., p. 23–27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49749310> (accessed Mar. 20, 2026) (in Russian).
13. Zhemkov I.Yu., Izhutov A.L., Naboishchikov Yu.V., Tuzov A.A. Heterogeneous burning of minor actinides in a fast neutron reactor. Collection of reports of the branch scientific and Technical conference, Sochi, October 28-29, 2021, pp. 137–146.
14. Varivtsev A.V., Zhemkov I.Yu. Computational studies of the characteristics of the BOR-60 reactor cell with a “softened” neutron spectrum. Sbornik trudov AO GNTS NIIAR. Proc. of RIAR, 2007, no. 3, pp. 34–40 (in Russian).
15. Zhemkov I. Yu., Naboishchikov Yu.V. Efficiency of burning out minor actinides under irradiation in various neutron spectra. Scientific Annual Report of RIAR JSC – 2023. Dimitrovgrad, 2024, RIAR JSC Publ., p.34–37. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=74032245> (accessed Mar. 20, 2026) (in Russian).
16. Zhemkov I.Yu., Naboishchikov Yu.V., Polezhaev A.A., Khasanova A.E. Computational studies of the effectiveness of burning junior actinides. Scientific Annual Report of RIAR JSC – 2019. Dimitrovgrad, 2020, RIAR JSC Publ., p. 27–30. URL: https://niiar.ru/sites/default/files/ngo-2019_sayt.pdf (accessed Mar. 20, 2026) (in Russian).
17. Kamaev A.A., Klinov D.A., et.al. Calculation and experimental analysis of the BN-800 reactor core neutronic parameters at the stage of reaching first criticality followed by rated power testing. FR-2017 Conference, IAEA-CN245-462.

18. Volkov A.Yu., Tikhonova D.E., Makarov A.O., Momotov V.N., Khamdeev M.I., Pylaeva A.A. Isolation and analysis of the composition of neptunium and Americium from irradiated mavel. Scientific Annual Report of RIAR JSC – 2022. Dimitrovgrad, 2023, RIAR JSC Publ., p. 191–193. https://elibrary.ru/download/elibrary_60033444_20958535.pdf (accessed Mar. 20, 2026) (in Russian).

19. Momotov V.N., Volkov A.Yu., Tikhonova D.E. Post-reactor radiochemical studies of neptunium and Americium dioxides irradiated in the BOR-60 reactor. Scientific Annual Report of RIAR JSC – 2022. Dimitrovgrad, 2023, RIAR JSC Publ., p. 193–196. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_60033444_20958535.pdf (accessed Mar. 20, 2026) (in Russian).

20. Tikhonova D.E., Volkov A.Yu., Momotov V.N., Ugryumov A.V., Ishunin V.S. Results of post-reactor radiochemical studies of Americium irradiated in the BOR-60 reactor. Scientific Annual Report of RIAR JSC – 2024. Dimitrovgrad, 2025, RIAR JSC Publ., p. 184. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_82507811_67999246.pdf (accessed Mar. 20, 2026) (in Russian).

21. Levchenko Yu.V., Slyunyaev M.N., Peregudov A.A., Mishin V.A., Losev V.V., Zhemkov I.Yu., Ishunina O.V., Merkulov A.I., Naboishchikov Yu.V. Analysis of experiments on heterogeneous combustion of MA in the BOR-60 reactor based on test models. Materials of nuclear technology: collection of abstracts of scientific reports-technical conference «Materials of nuclear engineering (MAYAT-2025)». Moscow, JSC VNIINM Publ., 2025, p. 166.

Authors

Alexey L. Izhutov, Deputy Director – Science&Research, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: izhutov@niiar.ru

Dmitry A. Kornilov, Scientific Secretary, Cand. Sci. (Phys-Math.),

E-mail: kornilovda@niiar.ru

Yuri V. Naboishchikov, Head of the laboratory,

E-mail: n_yu_v@niiar.ru

IgorYu. Zhemkov, Chief Researcher-Expert, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: ziu@niiar.ru

Andrey I. Merkulov, Junior Researcher,

E-mail: aimerkulov@niiar.ru

Olga V. Ishunina, Senior Researcher,

E-mail: iov@niiar.ru

Vladimir N. Momotov, Deputy Head of ORT for Science and Technology, Cand. Sci. (Chemistry),

E-mail: momotov@niiar.ru

Sergey V. Abramov, Head of the Department of Radiochemical Technologies,

E-mail: bri@niiar.ru

Darya E. Tikhonova, Junior Researcher,

E-mail: bri@niiar.ru

Grigory V. Shevlyakov, Head of the laboratory,

E-mail: oit@niiar.ru

Alexander V. Ugryumov, Senior Vice President for Scientific and Technical Activities, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: AVUgryumov@tvel.ru

Evgeny V. Pidoprigora, Head of the project office,

E-mail: EvVPidoprigora@tvel.ru

Andrey Y. Khomyakov, Chief Specialist,

E-mail: AYKhomyakov@tvel.ru