

# ВЫЖИГАНИЕ МАЛЫХ АКТИНИДОВ В ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРАХ. 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УРАНОВОГО И ТОРИЕВОГО ТОПЛИВ ДЛЯ ВЫЖИГАНИЯ МАЛЫХ АКТИНИДОВ, ПРОИЗВОДИМЫХ МНОГИМИ РЕАКТОРАМИ ВВЭР

*Карпович Г.В.<sup>1</sup>, Казанский Ю.А.<sup>2</sup>, Васечкин Н.Д.<sup>2</sup>, Баханцов К.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>АО ОКБ «Гидропресс»,  
142103, Московская обл., г. Подольск, ул. Орджоникидзе, д.21

<sup>2</sup>ИАТЭ НИЯУ МИФИ,  
249039, Калужская обл., г. Обнинск, тер. Студгородок, д.1



В настоящее время в научно-техническом сообществе сложился консенсус по поводу решения проблемы малых актинидов (МА), образующихся при работе ядерной энергетики: МА должны быть превращены в продукты деления при выгорании в энергетических реакторах. Для этой цели, в основном, рассматриваются реакторы на быстрых нейтронах (БН, БРЕСТ), а также жидкосолевые реакторы (ЖСР). Несмотря на преимущества использования быстрых реакторов на сегодняшний день отсутствуют готовые для промышленной эксплуатации проекты энергоблоков с БН или БРЕСТ. Возможность использования для этой цели реакторов ВВЭР редко освещается в научной литературе несмотря на то, что технология легководных реакторов давно освоена и подготовить реактор-выжигатель МА на базе ВВЭР технически проще, нежели на базе опытно-промышленной технологии БН или находящихся на различных стадиях НИОКР реакторах БРЕСТ и ЖСР. В ранее опубликованной первой части работы [1] был исследован топливный цикл для реакторов ВВЭР – малые актиниды, полученные при работе реактора, извлекались из ОЯТ и добавлялись в свежее топливо для того же реактора. Выяснилось, что при реализации данного цикла и концентрации МА до 4 масс. процентов можно добиться восьмикратного сокращения количества нарабатываемых в реакторе ВВЭР малых актинидов без потери энерговыработки блока АЭС. В представленной работе с использованием идеи замыкания топливного цикла по малым актинидам исследуются связи глубины выгорания МА в реакторе ВВЭР-1200 с обогащением свежего топлива, динамикой выгружаемых тяжелых ядер и количеством МА в догружаемом топливе. Изучаются два вида догружаемого топлива с добавлением оксидов малых актинидов: на основе двуокиси обогащенного

урана или смеси  $(1-x) {}^{232}\text{ThO}_2 + x (96\% \text{UO}_2)$  [2]. При этом количество тяжелых ядер в топливе поддерживается постоянным при изменениях количества загружаемых ядер МА, которое измеряется в количестве «обслуживаемых» реакторов ВВЭР-1200 (масса накапливаемых ядер МА составляет около 1% и ежегодно извлекается вместе с ОЯТ). Приток малых актинидов в топливо поддерживается на уровне, позволяющем иметь запас реактивности для работы реактора на мощности более 2% перед ежегодной перегрузкой топлива. Расчеты проводились на модели ТВС с разделением твэлов на несколько групп с разными глубинами выгорания топлива для имитации реальной загрузки активной зоны реактора. Такая модель позволяет уйти от влияния эффектов неравномерности энерговыделения и дать ответ о нейтронно-физических характеристиках топливного цикла с участием МА. Проведенные расчеты позволили сделать ряд существенных выводов:

- по мере роста количества перегрузок наступает динамическое равновесие между загружаемыми и сжигаемыми объемами малых актинидов;
- количество обслуживаемых реакторов прямо пропорционально обогащению топлива подпитки и при 20%-ном обогащении  $\text{UO}_2$  возможно обслуживать до 23-х реакторов типа ВВЭР-1200, а при использовании топлива 80%  ${}^{232}\text{ThO}_2 + 20\%$  (96%  $\text{UO}_2$ ) – 17 реакторов типа ВВЭР-1200;
- при использовании МА, извлеченных из ОЯТ с глубиной выгорания 20–50 МВт-сут/кг, влияние состава МА на баланс реактивности находится в пределах 4–5  $\beta_{\text{эфф}}$ .

**Ключевые слова:** малые актиниды, ядерное топливо, выгорание, ториевый топливный цикл, реактор ВВЭР, метод Монте-Карло.

**Для цитирования:** Карпович Г.В., Казанский Ю.А., Васечкин Н.Д., Баханцов К.А. Выжигание малых актинидов в водо-водяных реакторах. 2. Использование уранового и ториевого топлив для выжигания малых актинидов, производимых многими реакторами ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 3. – С. 44–58. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.04>

## ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В предыдущей части статьи [1] была показана возможность использования реакторов типа ВВЭР для выжигания малых актинидов без потери энерговыработки. При этом было сделано несколько важных выводов:

- при постоянной перегрузке малых актинидов из ОЯТ в свежее топливо в реакторе ВВЭР наступает динамическое равновесие между накоплением и выгоранием МА, в зависимости от количества загружаемых МА равновесие наступает через 10–30 лет;
- скорость выжигания МА зависит от их размещения в топливе, гомогенное перемешивание МА со всем топливом подпитки является предпочтительным по сравнению с вариантами размещения МА в отдельных твэлах или же с частичным перемешиванием с топливом.

Вышеуказанные тезисы объясняются влиянием МА на реактивность реактора. При введении МА в нейтронный поток реактора его реактивность изменяется, причем этот сдвиг растет по мере увеличения количества введенных малых актинидов (см. рис. 5 статьи [1]). Кроме того направление смещения реактивности зависит от блокировки сечения деления

МА, т.е. от плотности малых актинидов в твэлах. При низкой плотности МА, когда блокировка сечений мала, происходит прирост реактивности. Дальнейшее увеличение количества МА в твэлах не только приводит к усилению эффекта блокировки сечений деления тяжелых ядер, но и к сокращению вакантного места для топлива подпитки, и поэтому перегрузка топлива не способствует существенному росту реактивности.

В данной статье рассматривается другой сценарий – один реактор ВВЭР сжигает МА, производимые многими реакторами ВВЭР. Такой сценарий имеет одно неоспоримое преимущество перед иными вариантами выжигания малых актинидов [3–7] – используется уже имеющаяся и хорошо освоенная реакторная технология, реализованная в виде многих действующих энергоблоков ВВЭР-1000/1200 во всем мире.

Данная работа выполнена с целью

- подтвердить или опровергнуть возможность расширенного выжигания МА, когда один реактор ВВЭР выжигает МА, накопленные при работе других реакторов, при этом без потери выработки электроэнергии и длительности кампании;
- изучить возможность использования для выжигания МА в ВВЭР-1200 уран-оксидного топлива, а также топлива из смеси  $^{232}\text{ThO}_2$  и  $\text{UO}_2$  (далее в статье под обогащением уран-ториевого топлива подразумевается массовое содержание урана, обогащение самого урана всегда составляет 96%, т.е. почти чистый  $^{235}\text{U}$ ).

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Используемый в работе топливный цикл основан на многократной рециркуляции: МА (Np, Am, Cm), которые извлекаются из ОЯТ при переработке, затем используются для изготовления нового топлива, называемого в дальнейшем свежим топливом. Таким образом, свежее топливо – это двуокись обогащенного урана или смесь  $^{232}\text{ThO}_2$  с 96%  $\text{UO}_2$  с содержанием двуокиси ядер МА. Количество МА при заданном обогащении топлива должно быть таким, чтобы значение  $k_{\infty}$  в конце кампании реактора было не менее 1,02 (учет снижения реактивности реактора из-за утечки нейтронов из реактора моделируемой активной зоны) [1, 8]. В расчетах в топливо добавлялись МА с составом, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

### Изотопный состав МА, загружаемых в ТВС

Изотоп	$^{237}\text{Np}$	$^{241}\text{Am}$	$^{243}\text{Am}$	$^{243}\text{Cm}$	$^{244}\text{Cm}$	$^{245}\text{Cm}$	$^{246}\text{Cm}$	Прочие МА
% ат.	53,36	25,00	15,00	0,05	5,95	0,53	0,06	0,05

Схема моделируемого в данной работе замкнутого топливного цикла представлена на рис. 1.

Модель активной зоны реактора ВВЭР-1200, используемая в расчетах топливного цикла, представляет собой ТВС в бесконечной размножающей среде. Твэлы в составе ТВС поровну поделены на четыре группы с различными глубинами выгорания. Такое разбиение позволяет учитывать влияние перегрузок на спектр нейтронов в реакторе, на выгорание топлива [1] и баланс реактивности.

В самом начале расчета топливного цикла в каждую зону ТВС загружается топливо с начальным обогащением 4,95% и глубинами выгорания, соответствующими одному, двум и трем годам пребывания в реакторе; свежее ядерное топливо с добавкой МА размещается в четвертой зоне. Далее расчет проводится следующим образом:

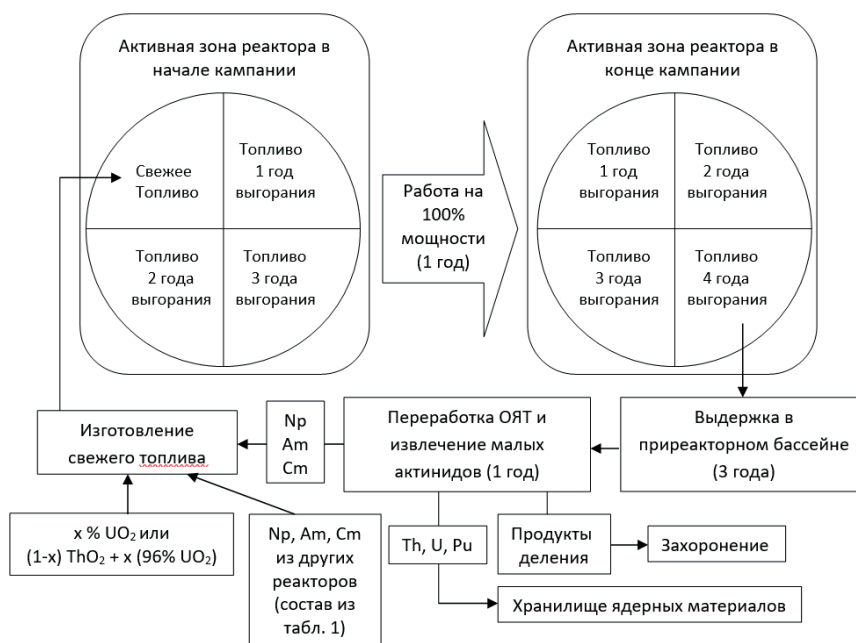


Рис. 1. Схема моделируемого топливного цикла

- делается расчет выгорания модельной ТВС в течение одного календарного года на средней мощности одной ТВС реактора ВВЭР-1200;

- для топлива с выгоранием четыре года, которое извлекается из моделируемой системы, делается дополнительный расчет выдержки ТВС в бассейне в течение четырех лет с целью определения изотопного состава МА, которые будут использованы в составе свежего топлива для следующей загрузки; для упрощения расчетов время выдержки учитывается только для извлекаемого топлива, для остальной части модели время «остановлено»; как было показано в работе [1], необходимо учитывать выдержку топлива в бассейне – за счет распада  $^{241}\text{Pu}$  происходит накопление  $^{241}\text{Am}$ , и масса МА возрастает примерно на 15%;

- рассчитывается изотопный состав топлива для загрузки: топливо подпитки смешивается с МА из извлеченного и переработанного ОЯТ из моделируемой ТВС, к которым добавляются МА извне с составом, описанным в табл. 1;

- МА добавляются путем замещения урана и тория по принципу «ядро на ядро», таким образом суммарное количество тяжелых ядер в твэле остается постоянным, при этом сохраняется обогащение топлива подпитки;

- формируется следующая загрузка ТВС – топливо с четырехлетним выгоранием заменяется свежим топливом с добавкой МА, остальные три зоны продолжают работу со старым составом.

Расчет топливного цикла с утилизацией МА производится для каждого сочетания трех параметров: типа топлива (урановое или уран-ториевое), обогащения топлива подпитки и массы загружаемых извне МА. Для наглядности масса загружаемых извне МА выражена не в килограммах, а в количестве реакторов ВВЭР-1200, которые за год нарабатывают данную массу (в среднем, один реактор ВВЭР-1200 за год нарабатывает 31,8 кг МА). При расчете контролируется критичность реактора, которая в процессе выгорания ядерного топлива и накопления МА в составе топливного цикла не должна опускаться ниже  $k_{\infty} = 1,02$ . Данное ограничение выбрано исходя из предварительного расчета утечки нейтронов из активной зоны реактора ВВЭР-1200 [1, 8].

Расчеты производились с использованием программного комплекса на основе метода Монте-Карло Serpent v.2.1.32 (VTT, Финляндия). Выгорание топлива рассчитывается по схеме предиктор-корректор [9]. Использовалась база оцененных ядерных данных на основе JEFF-3.1.1 в составе библиотеки, поставляемой разработчиком программы [10].

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ МАЛЫХ АКТИНИДОВ

После проведения расчетов топливного цикла (см. рис. 1) из 37-ми последовательных перегрузок топлива были получены изотопные составы выгружаемого ОЯТ, а также динамика  $k_{\infty}$  на начало и конец кампании реактора. Для начала обратим внимание на динамику  $k_{\infty}$  при использовании топлив 20%  $UO_2$  и 80%  $^{232}ThO_2 + 20\%$  (96%  $UO_2$ ). Погрешность расчета  $k_{\infty}$  для топливных загрузок ВВЭР с использованием МА, создаваемых базами оцененных ядерных данных, не превышает  $0,3 \beta_{эфф}$  [8] (для всех расчетов среднее значение доли запаздывающих нейтронов  $\beta_{эфф} = 0,56\%$ ).

На рисунке 2 показана динамика  $k_{\infty}$  для сценариев, когда поток МА извне поступает из 23-х или из 24-х реакторов. Если каждый год в реактор ВВЭР-1200 загружать урановое топливо с 20%-ным обогащением и МА из 24-х реакторов, то в конце 37-й кампании  $k_{\infty}$  падает ниже минимального уровня 1,02, а потому такой сценарий на практике приведет к досрочному завершению кампании реактора. Такую же картину можно наблюдать и для топлива 80%  $^{232}ThO_2 + 20\%$  (96%  $UO_2$ ): годовой поток МА из 18-ти реакторов в моделируемый ВВЭР-1200 на 24-ой кампании приводит к досрочной остановке, тогда как поток из 17-ти реакторов может быть утилизирован без ущерба энерговыработке (рис. 3).

Из рисунков 2, 3 видно, что  $k_{\infty}$  реактора стремится к асимптотическому значению по мере роста массы рециркулируемых в цикле МА, что указывает на наступление динамического равновесия [1] между поступлением МА извне и их сжиганием в реакторе. Динамическое равновесие сохраняется для любого количества поступающих извне МА при условии

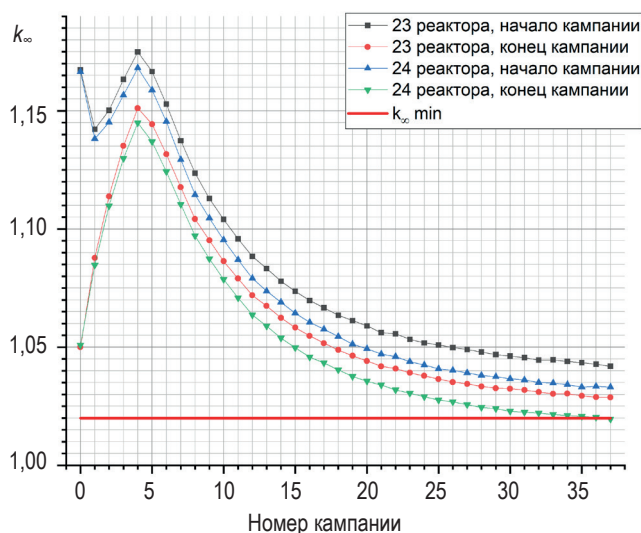


Рис. 2. Зависимость  $k_{\infty}$  реактора на топливе 20%  $UO_2$  от номера кампании реактора для различных объемов МА, загружаемых в свежее топливо

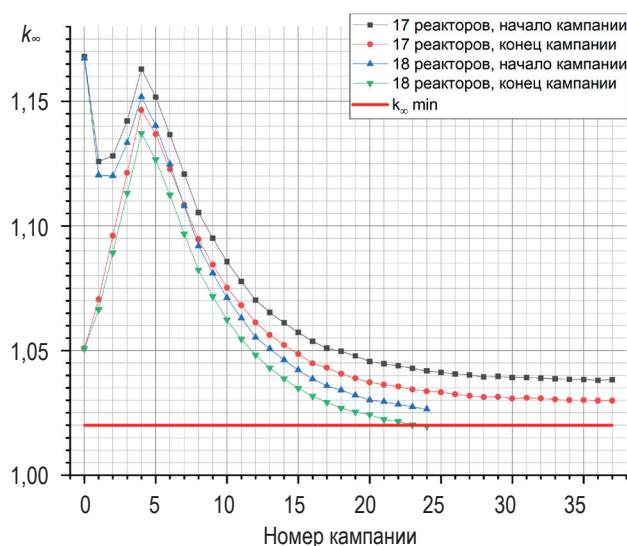


Рис. 3. Зависимость  $k_{\infty}$  реактора на топливе  $80\% \text{ }^{232}\text{ThO}_2 + 20\% (96\% \text{UO}_2)$  от номера кампании реактора для различных объемов МА, загружаемых в свежее топливо

сохранения положительной реактивности. Для выбранного обогащения топлива подпитки существует максимальный объем МА, которые могут быть утилизированы. Если проводить только рециркуляцию МА, то топливо на основе  $20\% \text{UO}_2$  позволяет поддерживать большую массу МА в топливном цикле, нежели топливо  $80\% \text{ }^{232}\text{ThO}_2 + 20\% (96\% \text{UO}_2)$ .

Влияние малых актинидов на реактивность реактора по мере выгорания топлива показано на рис. 4. Были взяты переходная и стационарная загрузки, им соответствуют кампании № 5 и № 35. Для наглядности показана динамика реактивности для системы с уран-оксидным топливом  $4,95\%$ , не содержащим МА.

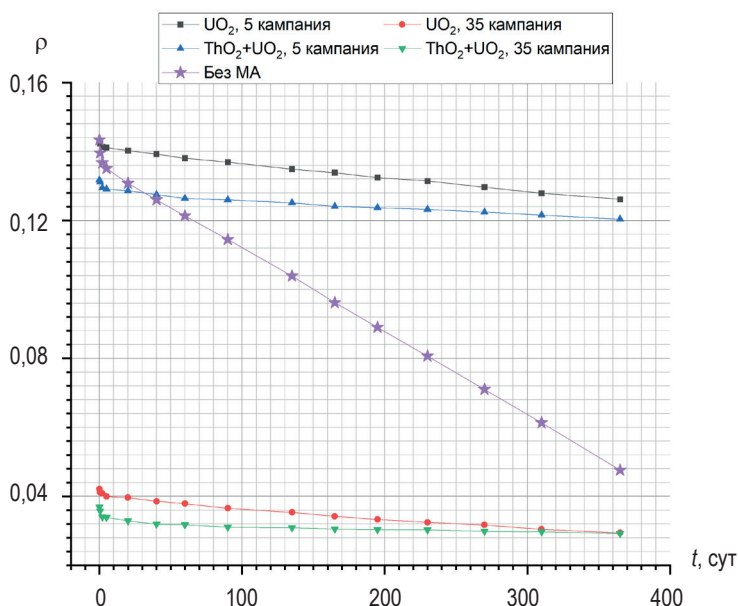


Рис. 4. Зависимость реактивности (в абсолютных значениях) реактора от времени в течение одной кампании реактора для разных видов топлива

## ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

Как видно из рис. 4, после размещения МА во всех четырех зонах модели сразу происходит резкое сокращение темпа потери реактивности по мере выгорания топлива во время кампании реактора. Причина такого сокращения темпа потери реактивности кроется в эффектах экранировки сечений деления  $^{235}\text{U}$ , о чем свидетельствуют макросечения  $^{235}\text{U}$  для разных кампаний реактора-выжигателя (табл. 2): рост обогащения урана в четыре раза приводит к увеличению макросечения деления  $\Sigma_f$  лишь в 1,55 раза. По мере выгорания  $^{235}\text{U}$  его сечение деления растет из-за ослабления эффекта самоэкранировки, что позволяет частично скомпенсировать снижение макросечения деления из-за выгорания  $^{235}\text{U}$ .

Таблица 2

### Макросечения (барн/см<sup>3</sup> топлива) тяжелых ядер на начало и конец кампании для разных топливных загрузок

			$^{235}\text{U}$	U	Pu	Cm	МА	Тяжелые ядра
Кампания без МА, 4,95% $^{235}\text{U}$	$\Sigma_f$	Начало кампании	2,352E-02	2,576E-02	9,421E-03	1,767E-06	8,047E-06	3,519E-02
		Конец кампании	1,520E-02	1,744E-02	1,333E-02	6,759E-06	1,857E-05	3,079E-02
		Изменение	-8,321E-03	-8,313E-03	3,911E-03	4,992E-06	1,053E-05	-4,391E-03
	$\Sigma_c$	Начало кампании	5,718E-03	2,503E-02	8,220E-03	4,160E-06	2,251E-04	3,347E-02
		Конец кампании	3,732E-03	2,319E-02	1,177E-02	1,426E-05	4,146E-04	3,537E-02
		Изменение	-1,986E-03	-1,840E-03	3,551E-03	1,010E-05	1,895E-04	1,901E-03
5 кампания с МА, 20% $^{235}\text{U}$	$\Sigma_f$	Начало кампании	3,654E-02	3,872E-02	3,168E-03	4,852E-04	1,031E-03	4,292E-02
		Конец кампании	3,325E-02	3,543E-02	4,975E-03	5,723E-04	1,123E-03	4,153E-02
		Изменение	-3,291E-03	-3,285E-03	1,807E-03	8,705E-05	9,208E-05	-1,386E-03
	$\Sigma_c$	Начало кампании	1,240E-02	2,625E-02	3,496E-03	8,437E-04	1,245E-02	4,219E-02
		Конец кампании	1,136E-02	2,557E-02	5,492E-03	9,208E-04	1,110E-02	4,216E-02
		Изменение	-1,048E-03	-6,741E-04	1,996E-03	7,712E-05	-1,349E-03	-2,779E-05
35 кампания с МА, 20% $^{235}\text{U}$	$\Sigma_f$	Начало кампании	2,997E-02	3,207E-02	2,933E-03	2,047E-03	3,231E-03	3,823E-02
		Конец кампании	2,729E-02	2,939E-02	4,727E-03	2,054E-03	3,157E-03	3,728E-02
		Изменение	-2,679E-03	-2,676E-03	1,794E-03	6,947E-06	-7,402E-05	-9,558E-04
	$\Sigma_c$	Начало кампании	1,065E-02	2,327E-02	3,827E-03	2,137E-03	2,129E-02	4,839E-02
		Конец кампании	9,785E-03	2,274E-02	6,011E-03	2,180E-03	1,948E-02	4,823E-02
		Изменение	-8,674E-04	-5,249E-04	2,184E-03	4,237E-05	-1,813E-03	-1,535E-04

По мере накопления МА с каждой перегрузкой реактора делящиеся изотопы кюрия вносят свой вклад в компенсацию выгорания  $^{235}\text{U}$ , позволяя дополнительно снизить темп потери реактивности.

Дальнейший рост массы МА в составе топлива вплоть до выхода на динамическое равновесие между прибылью МА извне и их выгоранием в реакторе приводит к постепенному снижению запаса реактивности в начале кампании.

Таким образом, при правильном подборе количества ежегодно загружаемых МА и обогащения топлива подпитки можно добиться такого сочетания начального запаса реактивности и темпов ее потери, что реактор не придется останавливать досрочно и тем самым иметь ущерб в энерговыработке.

При сравнении данных табл. 1 и 3 видно, что по мере рециркуляции МА их изотопный состав в топливе постепенно сдвигается в сторону тяжелых изотопов кюрия, имеющих большой период полураспада.

Таблица 3

**Усредненный по всему объему реактора изотопный состав малых актинидов (в масс.%) в начале и конце кампании реактора при устоявшемся топливном цикле для разных видов топлива**

Изотоп	20% $\text{UO}_2$		80% $\text{ThO}_2$ + 20% (96% $\text{UO}_2$ )	
	Начало кампании	Конец кампании	Начало кампании	Конец кампании
$^{237}\text{Np}$	52,7	52,2	50,4	49,9
$^{241}\text{Am}$	11,6	10,1	9,33	8,39
$^{243}\text{Am}$	11,3	10,8	10,4	10,1
$^{242}\text{Cm}$	0,84	1,14	1,19	1,46
$^{243}\text{Cm}$	0,03	0,10	0,11	0,11
$^{244}\text{Cm}$	16,3	17,9	19,8	20,7
$^{245}\text{Cm}$	3,53	3,80	3,65	3,79
$^{246}\text{Cm}$	2,60	2,87	3,97	4,16
$^{247}\text{Cm}$	0,40	0,45	0,53	0,55
$^{248}\text{Cm}$	0,26	0,29	0,45	0,48
Остальные МА	0,44	0,35	0,17	0,36
Доля всех МА в топливе	0,09	0,082	0,053	0,05

**ВЫЖИГАНИЕ МАЛЫХ АКТИНИДОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ОБОГАЩЕНИЯХ ТОПЛИВА ПОДПИТКИ**

Наличие предельного годового потока МА, который может быть утилизирован в реакторах ВВЭР без ущерба энерговыработке, ставит другой вопрос: как связаны между собой обогащение топлива подпитки и максимально допустимый поток МА извне? Ответ на этот вопрос приведен на рис. 5.

Из рисунка 5 видно, что повышение обогащения топлива подпитки позволяет увеличить максимально допустимый объем утилизируемых МА в одном реакторе ВВЭР-1200. При этом топливо на основе обогащенного урана позволяет сжигать куда больше МА, чем ториевое топливо при том же содержании  $^{235}\text{U}$ .



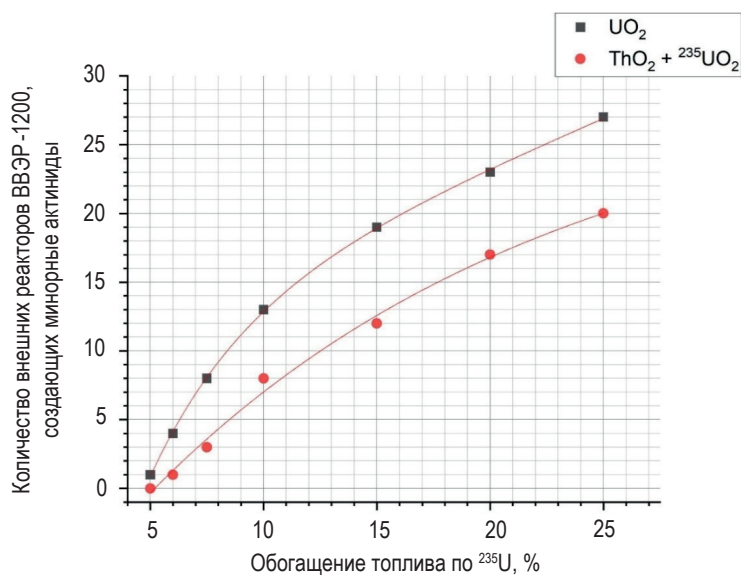


Рис. 5. Зависимость максимально допустимого объема малых актинидов (выражен в количестве внешних реакторов ВВЭР–1200, производящих МА), утилизируемых в одном реакторе ВВЭР–1200, от обогащения топлива подпитки

В свете полученных результатов имеет смысл сравнить эффективность утилизации малых актинидов при различных сценариях, рассмотренных в двух частях статьи. В качестве критериев были выбраны

- масса выгоревших малых актинидов при выработке 1 ГВт·год тепловой энергии; этот показатель позволяет абстрагироваться от особенностей сценариев и сравнить их эффективность с практической точки зрения;
- затраты ЕРР на производство топлива для сжигания 1 кг МА.

Из таблицы 4 следует весьма парадоксальный вывод: для уран-ториевого топлива затраты ЕРР на 1 кг сожженных МА немного меньше, чем при использовании классического уран-оксидного топлива, хотя в топливе на основе тория используется уран с 96%-ным обогащением. Вместе с тем рассматриваемый в статье топливный цикл с замыканием

Таблица 4

**Сравнение видов топлива по показателям эффективности сжигания малых актинидов**

Топливо	МА/(ГВт·год), кг	Затраты ЕРР на 1 кг МА
UO <sub>2</sub> , 5%	11,0	34550
UO <sub>2</sub> , 10%	125,6	6416
UO <sub>2</sub> , 15%	180,7	6519
UO <sub>2</sub> , 20%	216,1	6941
UO <sub>2</sub> , 25%	250,0	6974
90% <sup>232</sup> ThO <sub>2</sub> + 10% (96% UO <sub>2</sub> )	78,5	7597
85% <sup>232</sup> ThO <sub>2</sub> + 15% (96% UO <sub>2</sub> )	115,7	6115
80% <sup>232</sup> ThO <sub>2</sub> + 20% (96% UO <sub>2</sub> )	163,2	6406
75% <sup>232</sup> ThO <sub>2</sub> + 25% (96% UO <sub>2</sub> )	189,1	6752

по МА является слишком затратным с точки зрения расхода природного урана и ЕРР. Данные расходы можно снизить, если перейти к замыканию топливного цикла по всем тяжелым ядрам, возвращая в реактор не только МА, но и уран.

Большой расход ЕРР на изготовление 5% топлива для сжигания МА объясняется тем, что в данном случае в реактор можно загрузить очень небольшое количество МА, не снизив его энерговыработку.

## ВЛИЯНИЕ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА МАЛЫХ АКТИНИДОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВЫГОРАНИЯ

В приведенном исследовании использовался состав МА (см. табл. 1), извлекаемый из топлива ВВЭР-1200 с глубиной выгорания 56,8 МВт·сут/кг и выдержкой четыре года. На складах ОЯТ скопилось топливо от реакторов ВВЭР и РБМК с разными глубинами выгорания с различными составами МА. Поэтому надо выяснить, зависят ли полученные выше результаты от состава МА, загружаемых в реактор.

Для начала следует оценить среднее отношение макросечения радиационного захвата всех МА к макросечению деления:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n \Sigma_c^i}{\sum_{i=1}^n \Sigma_f^i}, \quad (1)$$

где  $\Sigma_c^i$  – макросечение радиационного захвата  $i$ -го изотопа;  $\Sigma_f^i$  – макросечение деления  $i$ -го изотопа.

Расчет макросечений выполнялся для каждого нуклида со спектром нейтронов реактора ВВЭР-1200 в приближении бесконечного разбавления.

Как видно из рис. 6, по мере увеличения глубины выгорания топлива  $B$  растет способность МА поддерживать цепную реакцию деления. Поэтому для данной задачи берется состав МА, которые были извлечены из топлива ВВЭР-1200 с выгоранием 20 МВт·сут/кг и выдержаны четыре года (табл. 5).

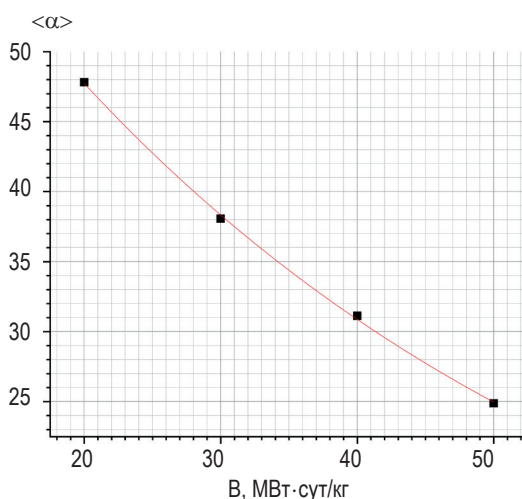


Рис. 6. Зависимость  $\langle \alpha \rangle$  для МА от глубины выгорания ОЯТ ( $B$ ) в приближении бесконечного разбавления

Таблица 5

**Изотопный состав МА из топлива с выгоранием 20 МВт·сут/кг и выдержкой четыре года**

Изотоп	<sup>237</sup> Np	<sup>241</sup> Am	<sup>243</sup> Am	<sup>243</sup> Cm	<sup>244</sup> Cm	<sup>245</sup> Cm	<sup>246</sup> Cm	Прочие МА
% ат.	64,68	33,13	1,932	0,004	0,207	0,007	–	0,032

Данные, приведенные на рис. 7, показывают, что влияние состава МА на баланс реактивности в моделируемом топливном цикле находится в пределах 4–5  $\beta_{эфф}$ . Учитывая, что один кластер ПЭЛ в составе СУЗ реактора ВВЭР имеет вес  $\sim \beta_{эфф}$ , при проектировании топливного цикла с выжиганием МА в реакторе ВВЭР следует внести коррективы в работу системы компенсации запаса реактивности. Влияние состава МА на баланс реактивности может быть нивелировано путем смешивания малых актинидов, извлеченных из ОЯТ с разными глубинами выгорания.

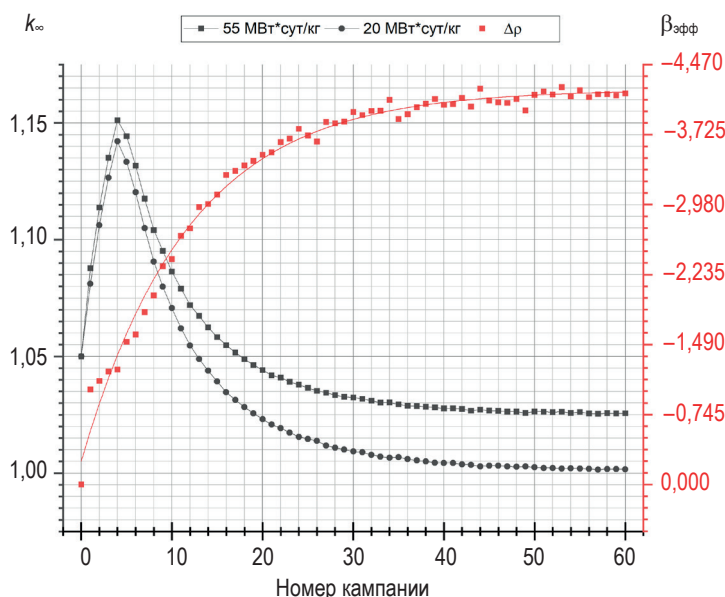


Рис. 7. Зависимость  $k_\infty$  и  $\Delta\rho$  в конце кампании для топлива 20%  $UO_2$  от номера кампании реактора при использовании МА, извлеченных из ОЯТ с различными глубинами выгорания

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Реакторы ВВЭР-1200 пригодны для утилизации МА, при использовании уран-оксидного топлива с обогащением 20% в одном реакторе ВВЭР-1200 можно выжигать МА с темпом около 690 кг/год. Имеющийся разбег между составами МА, находящихся в хранилищах ОЯТ, не меняет общую картину и имеет значение только при разработке конкретных топливных кампаний (влияние состава МА на баланс реактивности при рециркуляции МА находится в пределах 4–5  $\beta_{эфф}$ ).

Использование реакторов ВВЭР для решения проблемы накопления МА имеет серьезное преимущество перед другими вариантами обращения с малыми актинидами, так как используется уже освоенная реакторная технология, воплощенная в многочисленных энергоблоках ВВЭР в России и за рубежом.

Однако использование реакторов ВВЭР для утилизации МА требует дополнительных НИОКР по освоению топлива на основе тория, поскольку применение традиционного топлива из обогащенного урана создает проблему в виде накопления плутония, который по своему составу непригоден для изготовления нового ядерного топлива из-за преобладания  $^{238}\text{Pu}$  в его составе. Топливо на основе тория имеет более скромные характеристики в плане максимального объема утилизируемых МА по сравнению с обогащенным ураном, однако с его помощью можно нарабатывать чистый  $^{238}\text{Pu}$  с минимальным количеством примесей остальных изотопов плутония.

#### **Дальнейшее развитие исследований**

Учитывая приведенные в статье результаты моделирования выгорания топлива с добавлением малых актинидов, в следующей части исследования имеет смысл привести характеристики топливного цикла на основе уранового и уран-ториевого топлива, замкнутого по всем тяжелым ядрам, и его возможности по утилизации малых актинидов в реакторах ВВЭР с учетом технико-экономических затрат.

#### **Литература**

1. Казанский Ю.А., Карпович Г.В. Выжигание малых актинидов в водо-водяных реакторах. 1. Многократная рециркуляция малых актинидов на примере одного реактора ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2021. – № 3. – С. 58–71. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.3.05>
2. Казанский Ю.А., Кушнир Н.О., Хныкина Е.С. Многократное использование топлива на основе тория в реакторе типа ВВЭР-1000. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2022. – № 3. – С. 53–64. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.3.05>
3. Андрианов А.А., Архангельский Н.В., Журавлев И.Б., Квятковский С.А., Птицын П.Б. Перспективные технологии утилизации малых актинидов. М.: ЦАИР. Частное учреждение «Наука и инновации», 2021. – 102 с.
4. Liu B, Jinsheng Han J, Liu F, Sheng J, Li Z. Minor actinide transmutation in the lead-cooled fast reactor. // Progress in Nuclear Energy. – 2020. – Vol. 119. – No. 103148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103148>
5. Ashraf O., Tikhomirov G.V. Thermal-and fast-spectrum molten salt reactors for minor actinides transmutation. // Annals of Nuclear Energy. – 2020. – Vol. 148. – No. 107751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107751>
6. Osaka M., Takano S., Yamane Y., Misawa T. On a fast reactor cycle scheme that incorporates a thorium-based minor actinide-containing cermet fuel. // Progress in Nuclear Energy. – 2008. – Vol. 50. – Iss. 2–6. PP. 212–218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2007.11.002>
7. Gabrieli F., Rineiski A., Vezzoni B., Maschek W., Fazio C., Salvatores M. ASTRID-like Fast Reactor Cores for Burning Plutonium and Minor Actinides. // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 71. – PP. 130–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.863>
8. Карпович Г.В., Казанский Ю.А., Баханцов К.А., Исанов К.А., Кушнир Н.О. Влияние библиотек оцененных ядерных данных на результаты расчета выгорания топлива с малыми актинидами в реакторе ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 2. – С. 56–68. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.05>
9. Leppaanen J. PSG2/SERPENT – A Continuous Energy Monte-Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. User's Manual. – Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2015. – 164 p.
10. Leppaanen J., Viitanen T. Cross section libraries for Serpent 1.1.7. – Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2013. – 58 p.

Поступила в редакцию 25.09.2023

После доработки 24.04.2024

### Авторы

Карпович Глеб Владиславович, инженер-конструктор 2 кат.,

E-mail: gleb.karpovich@yandex.ru

Казанский Юрий Алексеевич, профессор, д.ф.-м.н.,

E-mail: iu.kazansky@yandex.ru

Васечкин Никита Денисович, студент,

E-mail: vasechkin.nd@mipt.ru

Баханцов Кирилл Алексеевич, студент,

E-mail: bakhantsovka@oiate.ru

UDC: 621.039.51

### **Minor actinides transmutation in pressurized water reactors. 2. Using uranium and thorium fuel to burn minor actinides in system with several VVER reactors**

**Karpovich G.W.<sup>1</sup>, Kazansky Yu.A.<sup>2</sup>, Vasechkin N.D.<sup>2</sup>, Bakhantsov K.A.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> OKB Hidropress JSC,

21 Ordzhonikidze St., 142103 Podolsk, Moscow Reg., Russia

<sup>2</sup> IATE MEPhI,

1 Studgorodok, 249039 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

### **Abstract**

There is currently a consensus among the scientific and engineering community regarding the solution to the problem of minor actinides (MAs) formed in the process of nuclear power operation: MAs need to be converted into fission products during burnup in power reactors. Fast neutron reactors (BN, BREST) and molten salt reactors (MSR), are considered largely to this end. Despite the advantages of using fast reactors, there are no currently power unit designs with BN or BREST available for commercial operation. The possibility of using VVER reactors for this purpose is rarely covered in scientific literature, despite the fact that the technology of light water reactors has long been mastered, and preparing a VVER-based MA burner reactor is technically simpler than on the basis of a pilot commercial BN technology or BREST or MSR reactors at different R&D stages.

In the previously published first part of the study [1], the fuel cycle for VVER reactors was investigated: minor actinides obtained during reactor operation were extracted from spent nuclear fuel and added to fresh fuel for the same reactor. It has been found that implementing this cycle and bringing the concentration of MAs up to 4 wt. % makes it possible to reduce the amount of minor actinides produced in the VVER reactor by a factor of 8, and without a loss in the NPP unit power generation.

This paper investigates, based on an idea of closing the fuel cycle in terms of minor actinides, the relationship between the MA burnup depth in a VVER-1200 reactor and the enrichment of fresh fuel, the dynamics of unloaded heavy nuclei, and the amount of MAs in additionally loaded fuel.

Under investigation are two types of additionally loaded fuel with oxides of minor actinides added to it: based on enriched uranium dioxide or a mixture of  $(1-x)^{232}\text{ThO}_2 + x(96\% \text{UO}_2)$  [2]. At the same time, the number of heavy nuclei in fuel does not change when there is a change in the number of loaded MA nuclei, which is measured in the number of the VVER-1200 reactors «served» (the mass of accumulated MA nuclei is about 1% and is removed annually from spent fuel). The number of minor actinides entering fuel is kept at a level that allows having a reactivity

margin for the reactor operation at a power of over 2% before the annual refueling. Calculations were undertaken using a fuel assembly model with fuel elements broken down into a number of groups with different fuel burnup depths to simulate the actual loading of the reactor core. This model makes it possible to avoid the power peaking effects and give an answer about the neutronic characteristics of the fuel cycle involving MAs.

The calculations made it possible to make a number of important conclusions:

- more refueling cycles lead to a dynamic equilibrium taking place between the minor actinide amounts loaded and burnt;
- the number of the reactors served is directly proportional to the enrichment of the make-up fuel and a 20% UO<sub>2</sub> enrichment makes it possible to serve up to 23 VVER-1200 reactors, while using 80% <sup>232</sup>ThO<sub>2</sub> + 20% (96% UO<sub>2</sub>) fuel allows 17 VVER-1200 reactors to be served.
- using MAs extracted from SNF with a burnup of 20 to 50 MW\*day/kg leads to the MA composition effect on the reactivity balance being within 4 to 5  $\beta_{eff}$ .

**Keywords:** minor actinides, nuclear fuel, burnup, thorium fuel cycle, VVER reactor, Monte Carlo method.

**For citation:** Karpovich G.W., Kazansky Yu.A., Vasechkin N.D., Bakhantsov K.A. Minor Actinides Transmutation in Pressurized Water Reactors. 2. Using Uranium and Thorium Fuel to Burn Minor Actinides in System with Several VVER Reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 3, pp. 44–58; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.04> (in Russian).

## References

1. Kazansky Yu.A., Karpovich G.W. Minor Actinides Transmutation in Pressurized Water Reactors. Part 1: Multiple Recycling of Minor Actinides on the Example of One VVER Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2021, no. 3, pp. 58–71. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.3.05> (in Russian).
2. Kazansky Yu.A., Kushnir N.O., Khnykina E.S. Multiple Usage of Thorium-Based Fuel in a VVER-1000 Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2022, no. 3, pp. 53–64. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.3.05> (in Russian).
3. Andrianov A.A., Arkhangelsky N.V., Zhuravlev I.B., Kvyatkovsky S.A., Ptitsyn P.B. *Promising technologies for utilization of minor actinides*. TsAIR, Private institution «Science and Innovation». 2021, – 102 p. (in Russian).
4. Liu B, Jinsheng Han J., Liu F., Sheng J., Li Z. Minor actinide transmutation in the lead-cooled fast reactor. *Progress in Nuclear Energy*. 2020, vol. 119, 103148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103148>
5. Ashraf O., Tikhomirov G.V. Thermal-and fast-spectrum molten salt reactors for minor actinides transmutation. *Annals of Nuclear Energy*. 2020, vol. 148, 107751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107751>
6. Osaka M., Takano S., Yamane Y., Misawa T. On a fast reactor cycle scheme that incorporates a thoria-based minor actinide-containing cermet fuel. *Progress in Nuclear Energy*. 2008, vol. 50, iss. 2–6, pp. 212–218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2007.11.002>
7. Gabrieli F., Rineiski A., Vezzoni B., Maschek W., Fazio C., Salvatores M. ASTRID-like Fast Reactor Cores for Burning Plutonium and Minor Actinides. *Energy Procedia*, 2015, vol. 71, pp. 130–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.863>
8. Karpovich G.V., Kazansky Yu.A., Bakhantsov K.A., Isanov K.A., Kushnir N.O. Effects of Evaluated Nuclear Data Libraries on the Calculation Results for Fuel Burnup with Minor Actinides in a VVER Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 2, pp. 56–68. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.05> (in Russian).

9. Leppaanen J. *PSG2/SERPENT – A Continious Energy Monte-Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. User's Manual*. Espoo. VTT Technical Research Centre of Finland, 2015, 164 p.

10. Leppaanen J., Viitanen T. *Cross section libraries for Serpent 1.1.7*. Espoo, VTT Technical Research Centre of Finland, 2013, 58 p.

### Authors

Gleb W. Karpovich, 2 cl. design engineer,

E-mail: [gleb.karpovich@yandex.ru](mailto:gleb.karpovich@yandex.ru)

Yuri A. Kazansky, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: [iu.kazansky@yandex.ru](mailto:iu.kazansky@yandex.ru)

Nikita D. Vasechkin, student,

E-mail: [vasechkin.nd@mipt.ru](mailto:vasechkin.nd@mipt.ru)

Kirill A. Bakhantsov, student,

E-mail: [bakhantsovka@oiate.ru](mailto:bakhantsovka@oiate.ru)