

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ –
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А.И. Лейпунского

ФЭИ-3313

В. В. Колесов, В. В. Коробейников, Л. П. Пупко

**СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫЖИГАНИЯ
МИНОРНЫХ АКТИНИДОВ В РЕАКТОРАХ
НА ТЕПЛОВЫХ И БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ**

Обнинск – 2025

В.В. Колесов², В.В. Коробейников¹, Л. П. Пупко¹

¹ АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск

² Обнинский институт атомной энергетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ

Сравнение эффективности выжигания минорных актинидов в реакторах на тепловых и быстрых нейтронах : Препринт ФЭИ-3313. — Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2025. — 24 с.

Ключевые слова: трансмутация, выжигание минорных актинидов, отработавшее топливо, радиоактивность, биологическая опасность, хранение отработавшего топлива, спектр нейтронов.

Проведены сравнительные расчетные исследования эффективности выжигания минорных актинидов в тепловых и быстрых реакторах. В расчетных исследованиях использовались тепловые и быстрые реакторы с урановым и МОКС-топливом с добавками в топливо оксида Am-241. Оценивалось влияние спектральных эффектов на различные величины добавок Am-241 в урановом и МОКС-топливе для тепловых и быстрых реакторов.

Сравнение результатов изменения массы Am-241 от времени в ходе кампании в тепловом и быстром реакторе показало не только большую скорость и выгорания Am-241 в тепловом реакторе по сравнению с быстрым, но и большую массу выгоревшего америция.

Comparative calculation studies of minor actinide burnup in thermal and fast reactors were conducted. Thermal and fast reactors with uranium and MOX fuel using different amounts of Am oxide additives were used in the calculation studies. The influence of spectral effects on different types and amounts of additives in uranium and MOX fuel for thermal and fast reactors was estimated.

Comparison of the results of Am-241 mass change during a campaign in a thermal and fast reactor showed not only better Am-241 burn up rates in a thermal reactor, but also a larger mass of -241 in the initial load.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Исследование эффективности выжигания Am-241 в реакторе на тепловых нейтронах типа ВВЭР-1200 с УОКС-топливом	6
1.1 Краткое описание расчётных моделей реактора типа ВВЭР для выжигания Am-241	6
1.2 Результаты расчётных исследований выжигания Am в зонах реактора типа ВВЭР-1200 с УОКС-топливом	7
2 Исследование выжигания Am в реакторе на быстрых нейтронах типа БН-800 на урановом топливе	12
2.1. Краткое описание расчётных моделей реактора типа БН-800 с УОКС-топливом	12
2.2 Результаты расчётных исследований выжигания Am в зонах реактора типа БН с УОКС-топливом.....	13
3 Исследование выжигания Am в реакторе на быстрых нейтронах типа БН-800 на МОКС-топливе	18
3.1 Краткое описание расчётных моделей реактора типа БН-800 с МОКС-топливом	18
3.2 Результаты расчётных исследований выжигания Am в зонах реактора типа БН с МОКС-топливом	19
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	23
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	23

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЭ (ЯЭ)	— атомная (ядерная) энергетика
АЭС	— атомная электростанция
БН	— реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем
ВВЭР	— водо-водяной энергетический реактор
ЗБО	— зона большого обогащения
ЗМО	— зона малого обогащения
ЗСО	— зона среднего обогащения
МА	— минорные актиниды
МОКС-топливо	— ядерное топливо из смеси оксидов плутония и обедненного урана
УОКС-топливом	— оксидное топливо на основе обогащенного урана
ОЯТ	— отработавшее (облученное) ядерное топливо
РБН	— реакторы на быстрых нейтронах
ТВС	— тепловыделяющая сборка
ЯЭ	— ядерная энергетика
ЯЭС	— ядерная энергетическая система

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных проблем атомной энергетики на сегодняшний день является утилизация ядерных отходов. В работающих ядерных реакторах накапливаются так называемые минорные актиниды — долгоживущие радиоактивные изотопы америция, кюрия, нептуния [1]–[7]. В настоящее время во всем мире обращение с минорными актинидами, как правило, сводится либо к их отправке в хранилища в составе отработанного ядерного топлива, либо к их захоронению в долгосрочных могильниках вместе с продуктами деления [8]–[10]. Для существующей и перспективной крупномасштабной ядерной энергетики рассматриваются различные варианты трансмутационного топливного цикла, существенно снижающие опасность минорных актинидов.

Теоретически подходы к решению проблемы МА сводятся к исследованиям эффективности их трансмутации и выжигания в ядерных реакторах разных типов. И в этом направлении единства и согласия не наблюдается. Однако чаще для трансмутации МА предполагается использовать реакторы именно на быстрых нейтронах. Авторы данной работы являются сторонниками системного подхода к сокращению скорости накопления МА с учётом стратегии развития ядерной энергетики в России и Море и поэтому решили более детально рассмотреть перспективы решения данной проблемы с использованием реакторов не только на быстрых, но и на тепловых нейтронах.

Основные аргументами решения проблемы МА именно с помощью реакторов на тепловых нейтронах показались нам вполне очевидными. Действительно, основным источником производства МА и их накопления во всём мире являются именно реакторы на тепловых нейтронах! Конечно, ресурсы ядерного топлива для реакторов на тепловых нейтронах ограничены, и будущее ядерной энергетики связывается с реакторами на быстрых нейтронах, но на длительную перспективу всё же полагаются на реакторы на тепловых нейтронах, и поэтому в любом случае перспектива наработки связана именно с ними.

В какой-то мере авторы уже пытались применить МА не только с целью их уничтожения, но и получения пользы. Например, предполагалось их использовать в качестве выгорающих поглотителей с необычными свойствами. В работах [11]–[15] приведены результаты таких исследований. Показано, что америций, используемый в качестве добавки в МОКС или урановое топливо в реакторе на быстрых или тепловых нейтронах, позволяет не только снизить начальный запас реактивности, но и существенно продлить кампанию реактора. Таким образом, указан дополнительный путь его выжигания в цикле реакторов на быстрых и тепловых нейтронах.

1 Исследование эффективности выжигания Am-241 в реакторе на тепловых нейтронах типа ВВЭР-1200 с УОКС-топливом

Для исследований эффективности выжигания минорных актинидов традиционно применяются реакторы на быстрых нейтронах. Например, в работах [14], [15] приводятся результаты исследований возможности разработки новой активной зоны реактора на быстрых нейтронах, позволяющей обходиться без традиционных видов ядерного топлива (урана или/и плутония) для решения задачи трансмутации минорных актинидов, представляющих основную опасность на значительном временном интервале. Теоретически это оказывается возможным благодаря тому, что практически все МА имеют конечную критическую массу. Однако при практической реализации таких реакторов возникают проблемы с низкой долей запаздывающих нейтронов, что ухудшает возможность обеспечения безопасности таких реакторов. Поэтому при выжигании в быстрых реакторах предполагается использовать небольшие количества МА. В данной работе предполагается исследовать возможности и ограничения применения для выжигания МА реакторов на тепловых нейтронах.

1.1 Краткое описание расчётных моделей реактора типа ВВЭР для выжигания Am-241

Для расчётных исследований использовался программный код, реализующий метод Монте-Карло, SERPENT [16]. В коде SERPENT учитывалось изменение изотопного состава в процессе работы реактора.

Для расчётных исследований использовалась модель реактора типа ВВЭР-1200 с урановым топливом (параметры реактора, такие как размеры ТВЭлов, шаг решетки ТВС, размер под ключ, количество ТВЭлов в ТВС и ТВС в активной зоне, полностью соответствуют ВВЭР-1200, однако начальная загрузка, в силу ряда причин, не соответствует реальной начальной загрузке ВВЭР-1200 и является упрощенной). В модели использовано три зоны с разным обогащением по U-235 (рис. 1). Ниже приведены обогащения по урану и объёмы зон модели реактора.

- 1,9 % — внутренняя зона (ЗМО), $V = 2222110 \text{ см}^3$;
- 3,4 % — средняя зона (ЗСО), $V = 1005160 \text{ см}^3$;
- 4,9 % — внешняя зона (ЗБО), $V = 5396520 \text{ см}^3$.

В каждую из зон, наряду с топливом, добавлялось 0,5 % оксида Am-241. Суммарная масса оксида Am-241 составляет 404 кг. В принципе, можно загружать только одну какую-то зону. Если предположить, что в каждом реакторе ВВЭР-1200 ежегодно набирается примерно 20 кг

Am-241, то в данной модели теоретически можно использовать Am-241 из 20 реакторов на тепловых нейтронах.

Рассмотрены две модели реактора. Первая — с добавлением 0,5 % AmO₂. Во второй модели америций не добавлялся.

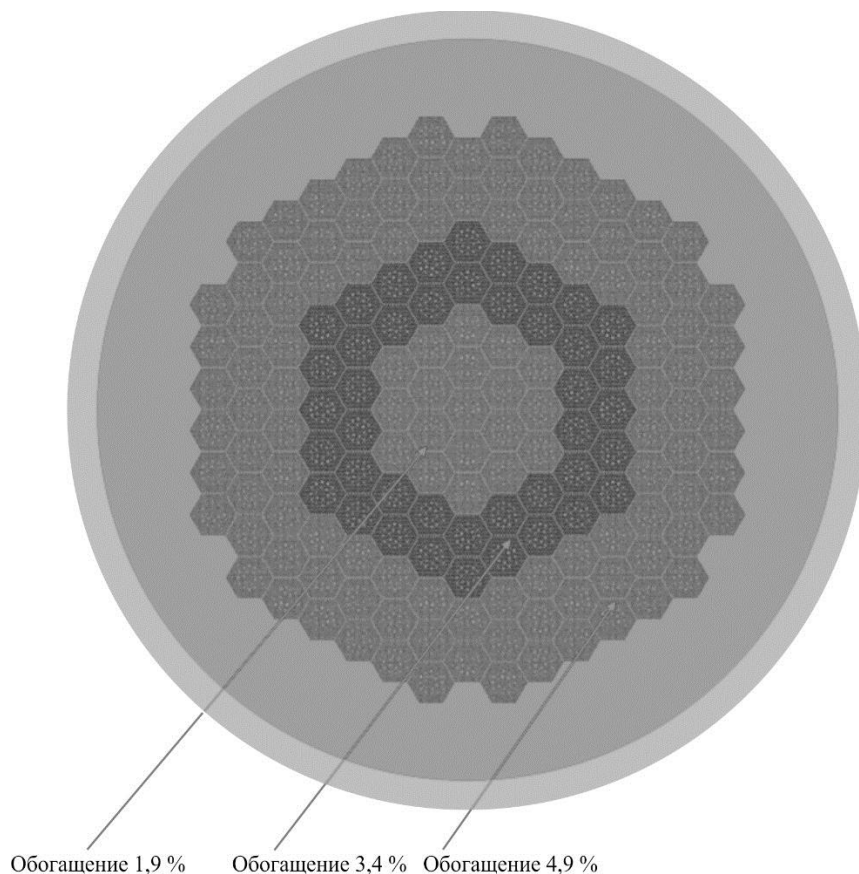


Рис. 1. Расчётная модель реактора типа ВВЭР-1200

1.2 Результаты расчётных исследований выжигания Am в зонах реактора типа ВВЭР-1200 с УОКС-топливом

В таблице 1 представлены результаты сравнения $K_{эф}$ для этих двух моделей (с оксидом Am-241 и без него)

Таблица 1. Изменение $K_{эф}$ от времени облучения для двух моделей реактора типа ВВЭР

Модель реактора	Время облучения, дней					
	0	10	20	50	150	365
С добавлением 0,5 % Am-241O ₂	1,0588	1,029	1,0328	1,0419	1,0454	1,0226
Без добавления оксида Am-241	1,3055	1,253	1,2462	1,2329	1,186	1,0982

Результаты показывают, что для решения задачи без Am требуется намного больший запас реактивности, чем в случае, когда он добавлен. На рисунке 2 приведено графическое представление результатов из таблицы 1.

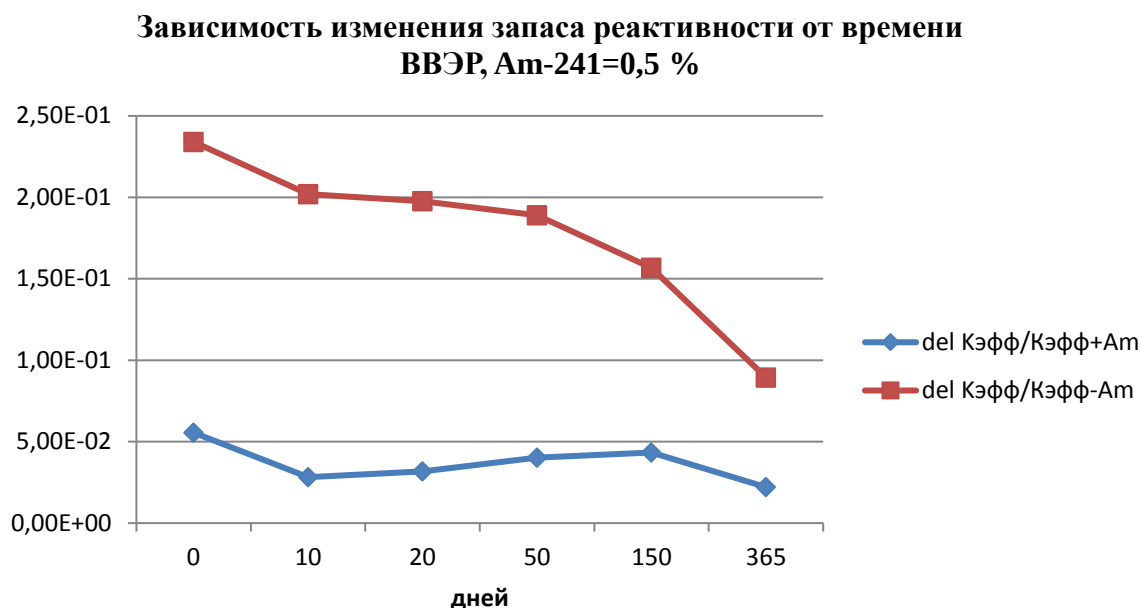


Рис. 2. Сравнение запасов реактивности для реактора без добавления Am-241 и с добавлением 0,5 % Am-241

В таблицах 2–4 приведены результаты расчётов выжигания Am в разных зонах модельного реактора типа ВВЭР в зависимости от времени.

Таблица 2. Результаты расчётов изменения массы U-235 и Am-241 от времени облучения для варианта с добавлением 0,5 % Am-241 в урановое топливо реактора типа ВВЭР-1200 в зону ЗБО

Время облучения, дней	ЗБО: U-235 4,9 % + Am-241 0,5 %						
	U-235	Am-241	Am-242	Am-242m	Am-243	Am-244	Am-244m
0	9,90E+02	1,04E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
10	9,89E+02	1,04E+02	2,18E-01	3,07E-02	1,33E-04	3,46E-09	5,40E-09
20	9,85E+02	1,03E+02	3,29E-01	1,19E-01	1,66E-03	8,42E-08	7,04E-08
50	9,77E+02	1,00E+02	3,27E-01	2,78E-01	8,72E-03	5,21E-07	3,74E-07
150	9,63E+02	9,67E+01	3,13E-01	4,98E-01	3,08E-02	1,94E-06	1,32E-06
200	9,24E+02	8,67E+01	2,77E-01	9,06E-01	1,55E-01	1,01E-05	6,65E-06
250	8,08E+02	6,09E+01	1,88E-01	1,09E+00	8,58E-01	5,57E-05	3,61E-05
365	6,23E+02	3,10E+01	8,59E-02	6,20E-01	2,46E+00	1,46E-04	9,43E-05

Таблица 3. Результаты расчётов изменения массы U-235 и Am от времени облучения для варианта с добавлением 0,5 % Am в урановое топливо реактора типа ВВЭР-1200 в зону ЗСО

Время облучения, дней	ЗСО: U-235 3,4 % + Am-241 0,5%						
	U-235	Am-241	Am-242	Am-242m	Am-243	Am-244	Am-244m
0	3,11E+02	4,71E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
10	3,11E+02	4,71E+01	1,83E-02	2,58E-03	2,19E-06	9,59E-12	1,50E-11
20	3,10E+02	4,70E+01	3,04E-02	1,10E-02	3,14E-05	2,92E-10	2,45E-10
50	3,10E+02	4,68E+01	3,13E-02	2,77E-02	1,74E-04	1,92E-09	1,38E-09
150	3,09E+02	4,64E+01	3,17E-02	5,50E-02	6,64E-04	7,95E-09	5,41E-09
200	3,06E+02	4,53E+01	3,15E-02	1,30E-01	3,96E-03	4,99E-08	3,28E-08
250	2,94E+02	4,10E+01	3,62E-02	3,40E-01	4,22E-02	6,97E-07	4,52E-07
365	2,36E+02	2,35E+01	5,32E-02	4,06E-01	5,35E-01	2,31E-05	1,49E-05

Таблица 4. Результаты расчётов изменения массы U-235 и Am от времени облучения для варианта с добавлением 0,5 % Am в урановое топливо реактора типа ВВЭР-1200 в зону ЗМО

Время облучения, дней	ЗМО: U-235 1,9 % + Am-241 0,5 %						
	U-235	Am-241	Am-242	Am-242m	Am-243	Am-244	Am-244m
0	9,32E+02	2,53E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
10	9,32E+02	2,52E+02	2,94E-01	4,14E-02	1,15E-04	1,32E-09	2,05E-09
20	9,29E+02	2,51E+02	4,56E-01	1,65E-01	1,45E-03	3,30E-08	2,76E-08
50	9,24E+02	2,48E+02	4,61E-01	3,98E-01	7,60E-03	2,05E-07	1,47E-07
150	9,15E+02	2,42E+02	4,56E-01	7,42E-01	2,73E-02	7,92E-07	5,38E-07
200	8,89E+02	2,27E+02	4,37E-01	1,51E+00	1,49E-01	4,60E-06	3,02E-06
250	8,01E+02	1,79E+02	3,75E-01	2,31E+00	1,03E+00	3,60E-05	2,33E-05
365	6,03E+02	9,24E+01	2,49E-01	1,46E+00	4,30E+00	2,00E-04	1,29E-04

Сравнение результатов расчёта с добавками Am и без добавок показали некоторую экономию урана в варианте с добавками. Так в варианте с топливом без оксида Am-241 начальная загрузка U-235 составляла 3116 кг, а после года работы на мощности — 1975 кг (выгорело 1141 кг), в то время как при добавке в топливо 0,5 % оксида Am-241 начальная загрузка составляла 3100 кг, а после года работы на мощности — 1997 кг (выгорело 1103 кг).

На рисунке 3 показано сравнение изменения массы Am-241 от времени облучения в разных зонах и суммарно по всему реактору.

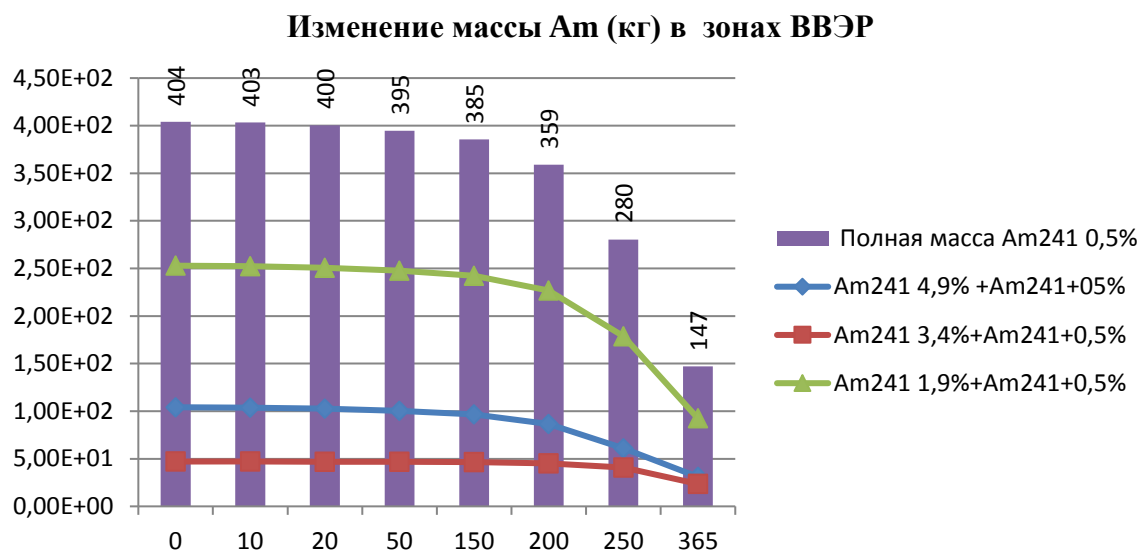


Рис. 3. Сравнение изменений массы Am-241 от времени облучения в реакторе типа ВВЭР УОКС для разных зон ядерного реактора при концентрации 0,5 % Am-241

На рисунках 4—6 и в таблице 5 приведены результаты сравнения масс U-235 для разных зон ВВЭР УОКС в зависимости от времени для вариантов с добавками Am в топливо и без него.

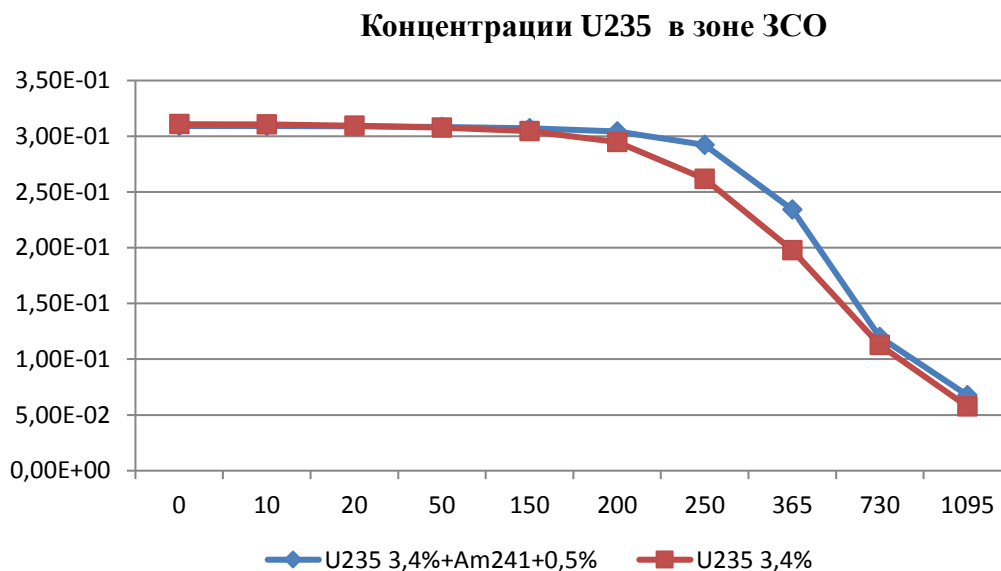


Рис. 4. Сравнение концентрации U-235 от времени в зоне ЗСО для вариантов с добавкой Am-241 и без добавки

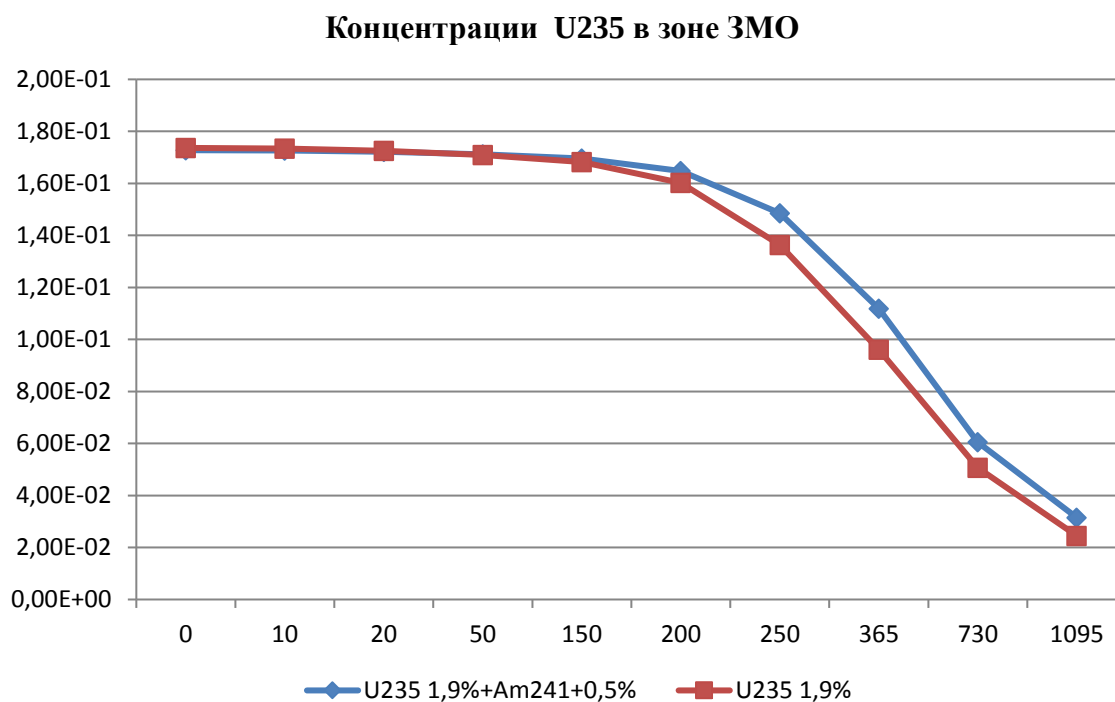


Рис. 5. Сравнение концентрации U-235 от времени в зоне ЗМО для вариантов с добавкой Am-241 и без добавки

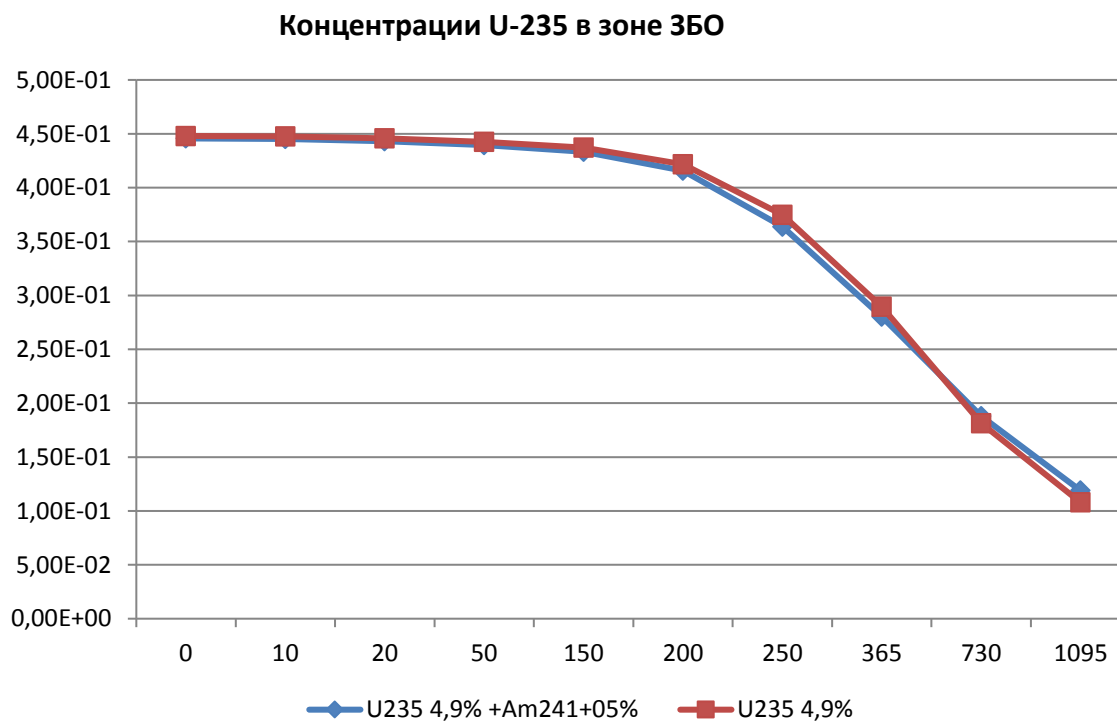


Рис. 6. Сравнение концентрации U-235 от времени в зоне ЗБО для вариантов с добавкой Am-241 и без добавки

Рисунки 4–6 и таблица 5 показывают, что изменение концентраций U-235 в реакторе ВВЭР для вариантов с Am и без Am различаются в сторону экономии в варианте с добавлением Am.

Таблица 5. Сравнение концентрации U-235 для разных зон ВВЭР с УОКС-топливом в зависимости от времени

Время облучения, дней	ЗМО		ЗСО		ЗБО	
	U-235 1,9 % +Am-241 0,5 %	U-235 1,9 %	U-235 3,4% +Am-241 0,5%	U-235 3,4 %	U-235 4,9 % +Am-241 0,5 %	U-235 4,9 %
0	1,73E-01	1,74E-01	3,09E-01	3,11E-01	4,46E-01	4,48E-01
10	1,73E-01	1,73E-01	3,09E-01	3,10E-01	4,45E-01	4,47E-01
20	1,72E-01	1,73E-01	3,09E-01	3,10E-01	4,43E-01	4,46E-01
50	1,71E-01	1,71E-01	3,08E-01	3,08E-01	4,39E-01	4,43E-01
150	1,70E-01	1,68E-01	3,07E-01	3,05E-01	4,33E-01	4,37E-01
200	1,65E-01	1,60E-01	3,04E-01	2,95E-01	4,16E-01	4,22E-01
250	1,49E-01	1,36E-01	2,92E-01	2,62E-01	3,64E-01	3,75E-01
365	1,12E-01	9,60E-02	2,34E-01	1,98E-01	2,80E-01	2,90E-01
730	6,05E-02	5,07E-02	1,20E-01	1,13E-01	1,88E-01	1,81E-01
1095	3,15E-02	2,45E-02	6,77E-02	5,75E-02	1,19E-01	1,08E-01

2 Исследование выжигания Am в реакторе на быстрых нейтронах типа БН-800 на урановом топливе

В данном разделе приводятся результаты исследований эффективности выжигания Am-241 в реакторе типа БН800 урановым топливом для сравнения с реактором типа ВВЭР с урановым топливом.

2.1 Краткое описание расчётных моделей реактора типа БН-800 с УОКС топливом

Использовалась модель реактора типа БН-800 с УОКС-топливом (рис. 7). В модели использовано три зоны с разным обогащением по U235:

- ЗМО (внутри) — обогащение 17 % ($V = 704602 \text{ см}^3$);
- ЗСО (в середине) — обогащение 21 % ($V = 512328 \text{ см}^3$);
- ЗБО (снаружи) — обогащение 26 % ($V = 661630 \text{ см}^3$).

Рассматривались два варианта с добавления Am-241 во все топливные зоны – 0,5 % и 0,9 %.

Для варианта с добавкой 0,5 % Am загружалось:

- 29 кг Ам в ЗМО;
- 21 кг Ам в ЗСО;
- 27 кг Ам в ЗБО.

Для варианта с добавкой 0,9% Ам, соответственно.

- 52 кг Ам в ЗМО;
- 38 кг Ам в ЗСО;
- 49 кг Ам в ЗБО;

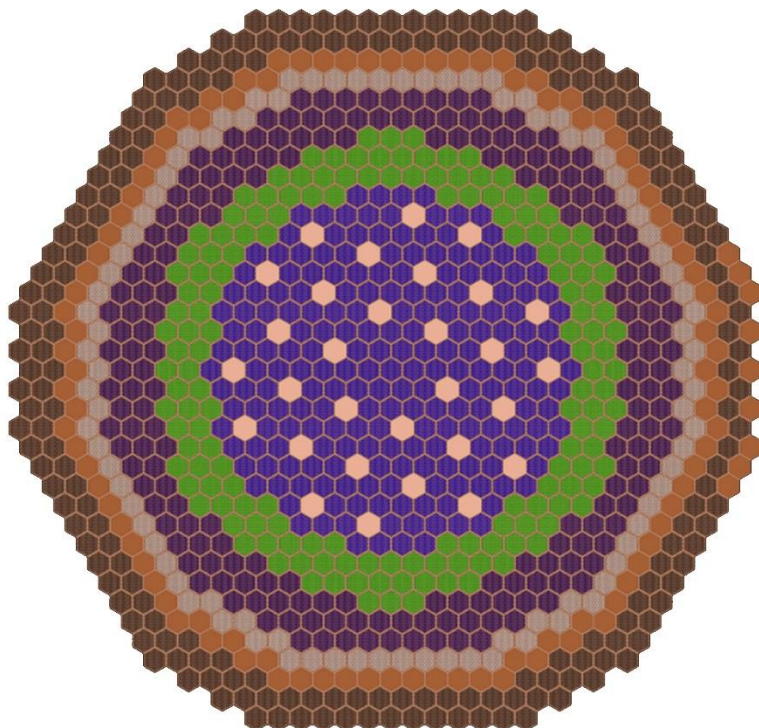


Рис. 7. Расчётная модель реактора типа БН800 с УОКС

2.2 Результаты расчётных исследований выжигания Ам в зонах реактора типа БН с УОКС-топливом

В таблице 6 показаны изменения значений $K_{эф}$ для вариантов с 0,5 % и 0,9 % добавок Ам-241. Из результатов видно, что отличия в зависимости от времени не велики.

Таблица 6. $K_{эф}$ для варианта БН УОКС-топливом с разным содержанием Ам

Вариант топлива	Время облучения, дней					
	0	10	20	50	150	365
0,5 % Ам в БН УОКС	1,074	1,073	1,070	1,060	1,049	1,015
0,9 % Ам в БН УОКС	1,074	1,067	1,065	1,062	1,045	1,013

В таблице 7 приведены значения изменения масс Am-241 от времени для разных содержаний Am-241 в топливе. На рисунке 8 для сравнения дано изменение массы Am-241 для теплового и быстрого реактора с УОКС-топливом от времени. Видно, что начальная масса Am в топливе ВВЭР значительно больше, чем в БН УОКС. Её изменение от времени гораздо сильнее.

Таблица 7. Сравнение изменений массы Am(кг) от времени для разных содержаний Am-241 в топливе БН УОКС

Время облучения, дней	ЗМО		ЗСО		ЗБО	
	Am-241 0,5 %	Am-241 0,9 %	Am-241 0,5 %	Am-241 0,9 %	Am-241 0,5 %	Am-241 0,9 %
0	2,90E+01	5,22E+01	2,10E+01	3,79E+01	2,72E+01	4,90E+01
10	2,90E+01	5,21E+01	2,10E+01	3,79E+01	2,72E+01	4,90E+01
20	2,89E+01	5,20E+01	2,10E+01	3,78E+01	2,72E+01	4,89E+01
50	2,87E+01	5,17E+01	2,10E+01	3,77E+01	2,71E+01	4,88E+01
100	2,85E+01	5,13E+01	2,09E+01	3,74E+01	2,70E+01	4,85E+01
150	2,78E+01	5,01E+01	2,07E+01	3,66E+01	2,65E+01	4,78E+01
250	2,55E+01	4,60E+01	2,01E+01	3,39E+01	2,52E+01	4,53E+01
365	2,10E+01	3,79E+01	1,86E+01	2,86E+01	2,24E+01	4,02E+01

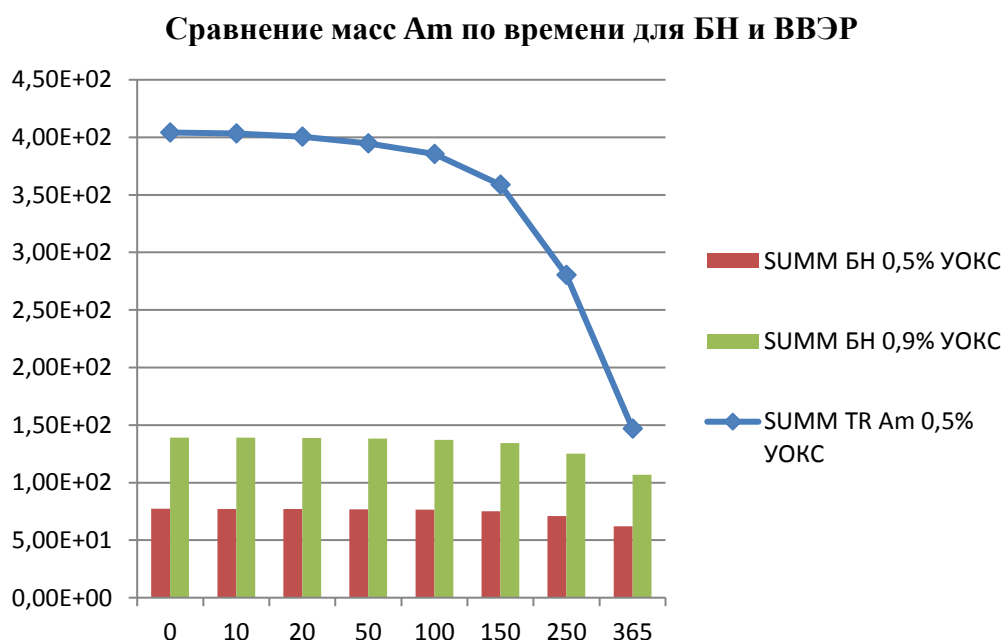


Рис. 8. Сравнение изменений от времени массы Am-241 для ВВЭР и БН

На рисунке 9 приведено более удобное для выводов сравнение выгорания Am-241, которое можно интерпретировать как скорость выгорания 1 кг Am в течение одного года. Заметим, что начальная масса также очень важна. Как отмечено выше, она значительно больше в ВВЭР УОКС!

В таблице 8 и на рисунке 10 приведена информация зависимости от времени изменения концентрации U-235 для вариантов с Am-241 в топливе и без него для реактора типа БН. Результаты показывают практическое совпадение результатов с Am и без него.

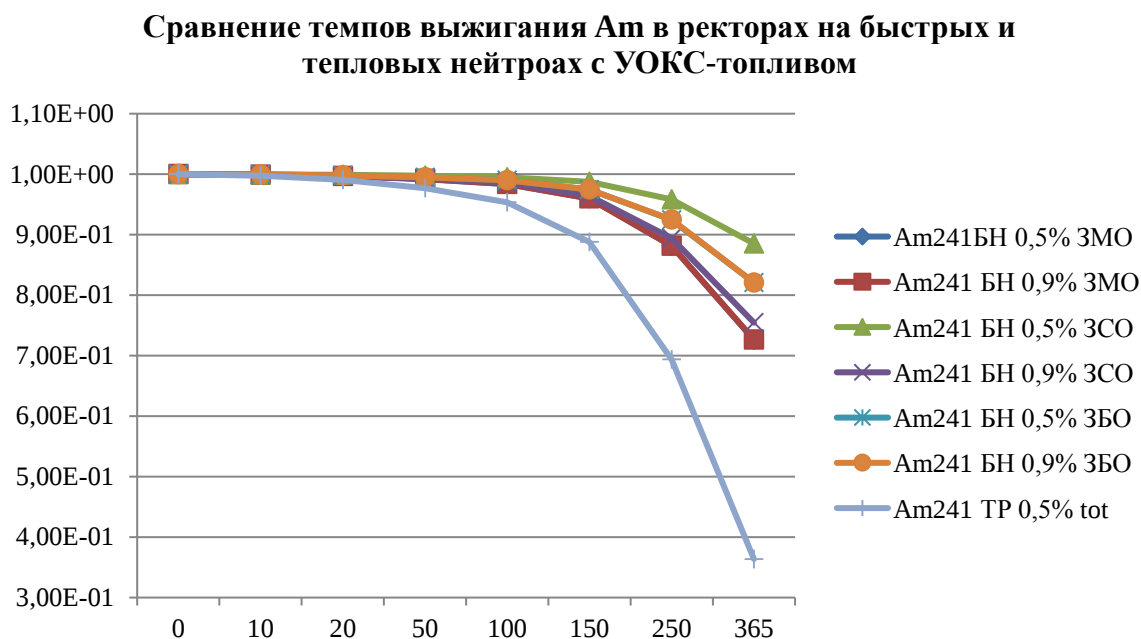
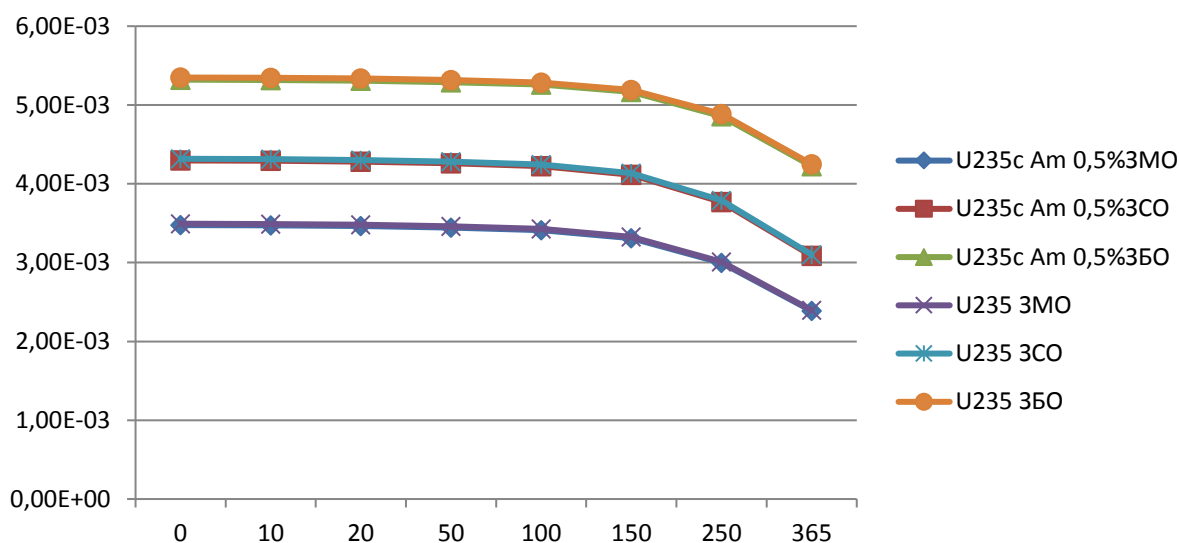


Рис. 9. Сравнение темпов выжигания Am в реакторах на быстрых и тепловых нейтронах с УОКС-топливом

Таблица 8. Сравнение концентраций U-235 от времени для разных зон БН УОКС с 0,5 % Am-241 и без добавления Am-241

Время облучения, дней	ЗМО		ЗСО		ЗБО	
	с Am	без Am	с Am	без Am	с Am	без Am
0	3,48E-03	3,49E-03	4,30E-03	4,32E-03	5,32E-03	5,35E-03
10	3,47E-03	3,49E-03	4,29E-03	4,31E-03	5,32E-03	5,35E-03
20	3,46E-03	3,48E-03	4,28E-03	4,30E-03	5,31E-03	5,34E-03
50	3,44E-03	3,46E-03	4,26E-03	4,28E-03	5,29E-03	5,32E-03
100	3,41E-03	3,43E-03	4,22E-03	4,24E-03	5,26E-03	5,29E-03
150	3,31E-03	3,33E-03	4,12E-03	4,14E-03	5,16E-03	5,19E-03
250	3,00E-03	3,01E-03	3,77E-03	3,79E-03	4,86E-03	4,88E-03
365	2,39E-03	2,39E-03	3,09E-03	3,10E-03	4,23E-03	4,88E-03

**Сравнение концентраций U-235 от времени в БН с УОКС
Am 0,5 % и без Am**



**Рис. 10. Сравнение зависимостей концентраций урана-235
от времени облучения в реакторе с Am-241 и без Am-241**

В таблице 9 приведено сравнение изменений концентраций U-235 для разных зон БН УОКС с 0,9 % Am-241. На рисунке 11 приведена информация по сравнению зависимостей плотностей урана-235 от времени облучения в реакторе с Am-241 для разных содержаний в топливе и без Am-241. Таким образом, и для реактора типа БН значимого увеличения потребления урана при добавлении Am не происходит.

Из рисунка 11 видно, что потребление U-235 по зонам реактора практически не зависит от добавок Am в топливо.

На рисунке 12 приведены результаты сравнения эффективностей выжигания Am-241 для разных типов реакторов с УОКС-топливом и содержаний Am-241. Наивысшая эффективность по массе и темпу у реактора на тепловых нейтронах с добавлением 0,5 % Am-241.

Таблица 9. Сравнение концентраций U235 от времени для разных зон БН УОКС с 0,9 % Am-241

Зона БН	Время облучения, дней							
	0	10	20	50	100	150	250	365
ЗМО	3,46E-03	3,46E-03	3,45E-03	3,43E-03	3,40E-03	3,30E-03	2,99E-03	2,38E-03
ЗСО	4,28E-03	4,27E-03	4,26E-03	4,24E-03	4,21E-03	4,10E-03	3,75E-03	3,07E-03
ЗБО	5,30E-03	5,30E-03	5,29E-03	5,27E-03	5,24E-03	5,14E-03	4,84E-03	4,21E-03

**Сравнение концентраций U-235 от времени в БН с УОКС
Am 0,5 и 0,9 %**

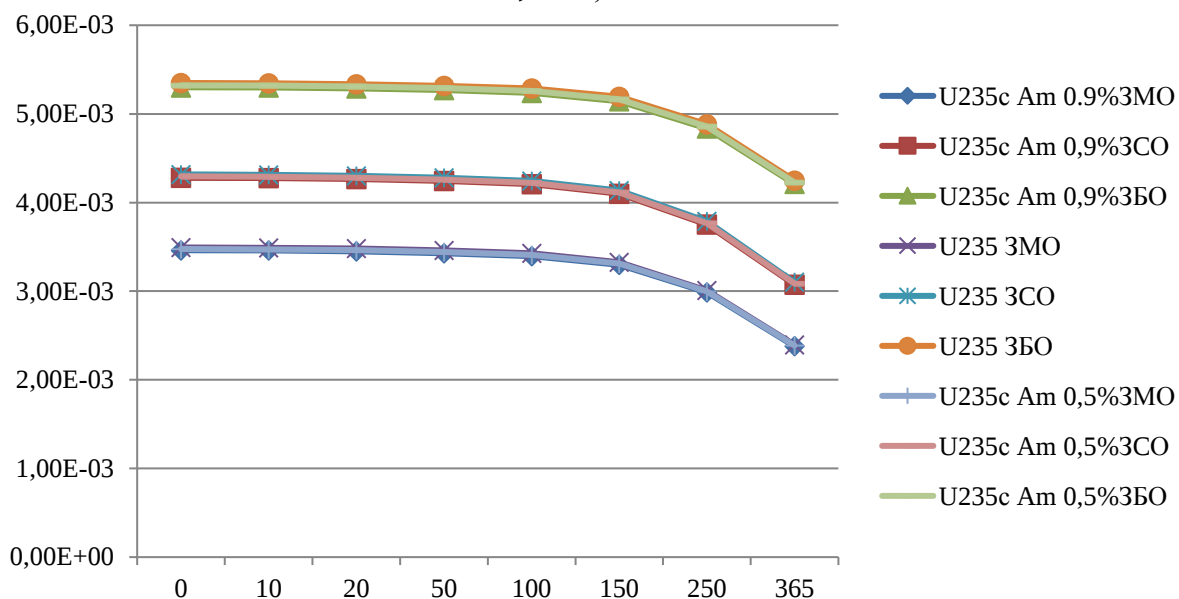


Рис. 11. Сравнение зависимостей плотностей урана-235 от времени облучения в реакторе с Am-241 для разных содержаний в топливе и без Am-241

Масса Am-241 ВВЭР и БН УОКС, кг t=0 и t=365 дней

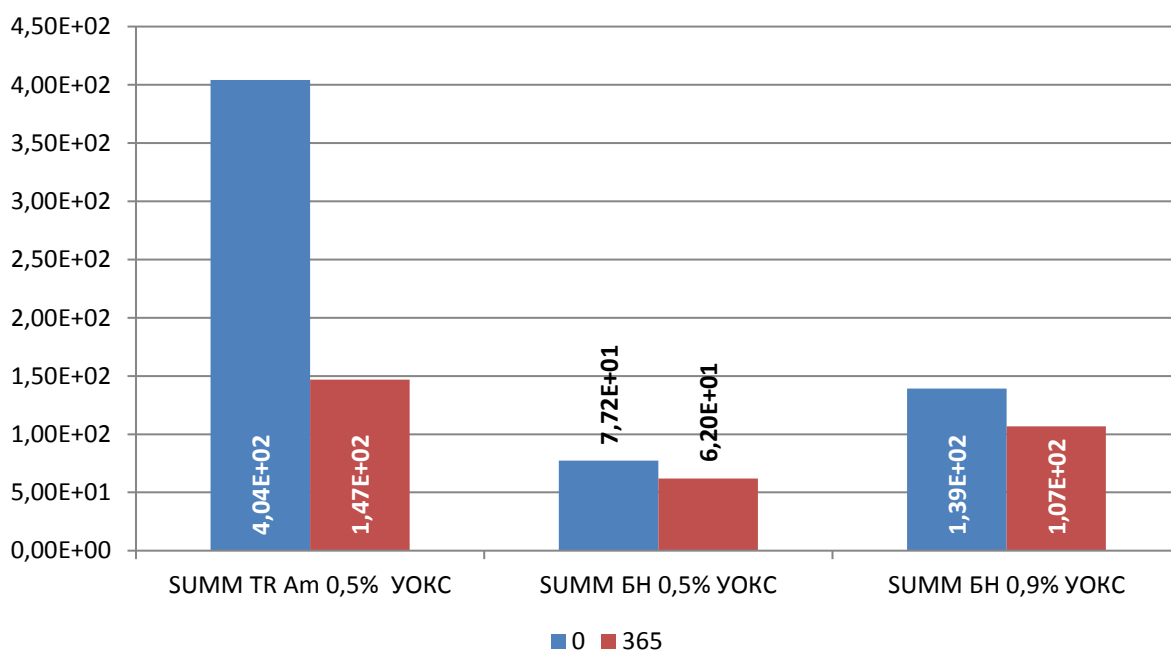


Рис. 12. Сравнение выжигания Am за год для ВВЭР и БН УОКС с разным содержанием Am

3 Исследование выжигания Am в реакторе на быстрых нейтронах типа БН-800 на МОКС-топливе

В данном разделе приводятся результаты исследований эффективности выжигания Am-241 в реакторе типа БН800 с МОКС-топливом для сравнения с реакторами БН с УОКС-топливом и ВВЭР с урановым топливом.

3.1 Краткое описание расчётных моделей реактора типа БН-800 с МОКС-топливом

Использовалась модель реактора типа БН-800 с МОКС-топливом (рис. 13). В модели использовано три зоны с разным содержанием Pu:

- ЗМО (внутри) — доля Pu 18,2 % ($V = 704602 \text{ см}^3$);
- ЗСО (в середине) — доля Pu 20,1 % ($V = 512328 \text{ см}^3$);
- ЗБО (снаружи) — доля Pu 23,0 % ($V = 661630 \text{ см}^3$).

Исследовались два варианта добавления Am-241: 0,5% Am-241 и 0,9% Am-241.

Плутониевый вектор: Pu-239 58 %, Pu-238 0 %, Pu-240 30 %, Pu-241 11 %, Pu-242 1 %

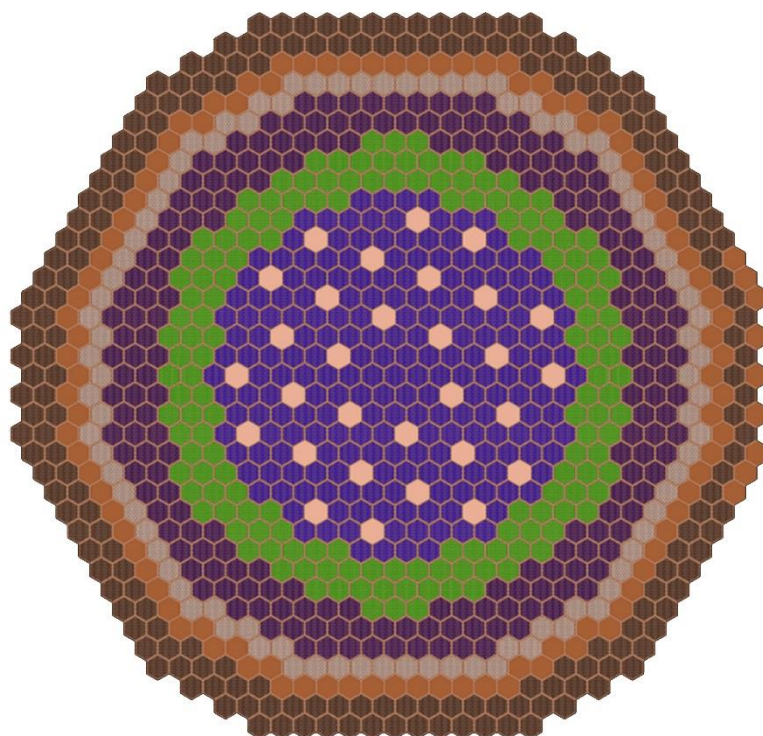


Рис. 13. Расчётная модель реактора типа БН-800 с МОКС-топливом

3.2 Результаты расчётных исследований выжигания Am в зонах реактора типа БН с МОКС-топливом

Сравнение БН с УОКС-топливом показывает более низкий запас реактивности по сравнению с вариантом БН с МОКС-топливом

Таблица 10. Изменение $K_{эф}$ от времени в вариантах выжигания Am в вариантах БН с МОКС-топливом

Вариант топлива	Время облучения, дней					
	0	10	20	50	150	365
МОКС 0,5 % Am	1,148	1,143	1,142	1,135	1,113	1,069
МОКС 0,9 % Am	1,143	1,141	1,14	1,131	1,11	1,071

Таблица 11. Изменение массы Am (кг) от времени для содержания америция в топливе БН МОКС 0,5 %. Зона ЗМО

Время облучения, дней	ЗМО: МОКС БН 0,5 %					
	Am-241	Am-242	Am-242m	Am-243	Am-244	Am-244m
0	2,89E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
10	2,89E+01	1,49E-02	2,11E-03	1,83E-03	2,47E-08	3,48E-08
20	2,88E+01	2,26E-02	8,38E-03	9,51E-03	2,42E-07	1,85E-07
50	2,88E+01	2,29E-02	2,08E-02	2,51E-02	7,16E-07	4,90E-07
100	2,86E+01	2,29E-02	4,13E-02	5,16E-02	1,53E-06	1,02E-06
150	2,82E+01	2,27E-02	1,00E-01	1,35E-01	4,10E-06	2,67E-06
250	2,66E+01	2,17E-02	2,70E-01	4,39E-01	1,36E-05	8,81E-06
365	2,34E+01	1,96E-02	5,19E-01	1,21E+00	3,88E-05	2,50E-05

Таблица 12. Изменение массы Am (кг) от времени для содержания америция в топливе БН МОКС 0,5 %. Зона ЗСО

Время облучения, дней	ЗСО: МОКС БН 0,5 %					
	Am-241	Am-242	Am-242m	Am-243	Am-244	Am-244m
0	2,10E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
10	2,10E+01	8,42E-03	1,19E-03	1,13E-03	1,18E-08	1,65E-08
20	2,10E+01	1,28E-02	4,76E-03	5,87E-03	1,16E-07	8,87E-08
50	2,10E+01	1,31E-02	1,19E-02	1,55E-02	3,46E-07	2,37E-07
100	2,09E+01	1,30E-02	2,36E-02	3,18E-02	7,33E-07	4,86E-07
150	2,07E+01	1,30E-02	5,76E-02	8,19E-02	1,93E-06	1,26E-06
250	2,01E+01	1,29E-02	1,61E-01	2,66E-01	6,45E-06	4,16E-06
365	1,86E+01	1,24E-02	3,32E-01	7,29E-01	1,85E-05	1,19E-05

Таблица 13. Изменение массы Am (кг) от времени для содержания америция в топливе БН МОКС 0,5 %. Зона ЗБО

Время облучения, дней	ЗБО: МОКС БН 0,5 %ЗБО					
	Am-241	Am-242	Am-242m	Am-243	Am-244	Am-244m
0	2,71E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
10	2,71E+01	7,13E-03	1,01E-03	1,09E-03	7,48E-09	1,05E-08
20	2,71E+01	1,09E-02	4,05E-03	5,71E-03	7,44E-08	5,68E-08
50	2,72E+01	1,11E-02	1,01E-02	1,50E-02	2,20E-07	1,50E-07
100	2,72E+01	1,11E-02	2,01E-02	3,07E-02	4,63E-07	3,07E-07
150	2,73E+01	1,12E-02	4,99E-02	7,88E-02	1,22E-06	7,96E-07
250	2,74E+01	1,16E-02	1,46E-01	2,52E-01	4,05E-06	2,61E-06
365	2,73E+01	1,21E-02	3,31E-01	6,79E-01	1,14E-05	7,37E-06

Таблица 14. Изменение массы Am (кг) от времени для содержания америция в топливе БН МОКС 0,9 %. Зона ЗМО

Время облучения, дней	ЗМО: МОКС БН 0,9 % Am-241					
	Am-241	Am-242	Am-242m	Am-243	Am-244	Am-244m
0	5,20E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
10	5,20E+01	2,65E-02	3,75E-03	1,81E-03	2,41E-08	3,38E-08
20	5,19E+01	4,04E-02	1,50E-02	9,47E-03	2,40E-07	1,83E-07
50	5,16E+01	4,08E-02	3,71E-02	2,50E-02	7,08E-07	4,85E-07
100	5,13E+01	4,05E-02	7,34E-02	5,15E-02	1,51E-06	1,00E-06
150	5,01E+01	3,98E-02	1,77E-01	1,34E-01	4,02E-06	2,62E-06
250	4,64E+01	3,74E-02	4,73E-01	4,45E-01	1,37E-05	8,83E-06
365	3,91E+01	3,26E-02	8,90E-01	1,26E+00	4,01E-05	2,59E-05

Таблица 15. Изменение массы Am (кг) от времени для содержания америция в топливе БН МОКС 0,9%. Зона ЗСО

Время облучения, дней	МОКС БН 0,9 % Am-241					
	Am-24	Am-242	Am-242m	Am-243	Am-244	Am-244m
0	3,78E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
10	3,78E+01	1,50E-02	2,13E-03	1,12E-03	1,16E-08	1,63E-08
20	3,77E+01	2,29E-02	8,49E-03	5,84E-03	1,14E-07	8,74E-08
50	3,76E+01	2,33E-02	2,12E-02	1,53E-02	3,39E-07	2,32E-07
100	3,74E+01	2,32E-02	4,20E-02	3,15E-02	7,20E-07	4,77E-07
150	3,69E+01	2,30E-02	1,03E-01	8,21E-02	1,93E-06	1,26E-06
250	3,50E+01	2,22E-02	2,83E-01	2,68E-01	6,47E-06	4,18E-06
365	3,09E+01	2,05E-02	5,68E-01	7,52E-01	1,90E-05	1,22E-05

Таблица 16. Изменение массы Am(кг) от времени для содержания америция в топливе БН МОКС 0,9 %. Зона ЗБО

Время облучения, дней	0,9 % Am-241					
	Am-241	Am-242	Am-242m	Am-243	Am-244	Am-244m
0	4,88E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
10	4,88E+01	1,28E-02	1,81E-03	1,09E-03	7,46E-09	1,05E-08
20	4,88E+01	1,95E-02	7,23E-03	5,66E-03	7,31E-08	5,58E-08
50	4,87E+01	1,99E-02	1,81E-02	1,50E-02	2,18E-07	1,49E-07
100	4,87E+01	1,99E-02	3,60E-02	3,06E-02	4,62E-07	3,06E-07
150	4,84E+01	1,99E-02	8,91E-02	7,88E-02	1,22E-06	7,95E-07
250	4,74E+01	1,99E-02	2,56E-01	2,53E-01	4,04E-06	2,61E-06
365	4,49E+01	1,97E-02	5,64E-01	6,91E-01	1,15E-05	7,44E-06

Таблица 17. Сравнение изменений массы Am от времени для содержания америция в топливе БН МОКС 0,9 % в зависимости от зоны

Время облучения, дней	ЗМО	ЗСО	ЗБО
	Am-241	Am-241	Am-241
0	5,20E+01	3,78E+01	4,88E+01
10	5,20E+01	3,78E+01	4,88E+01
20	5,19E+01	3,77E+01	4,88E+01
50	5,16E+01	3,76E+01	4,87E+01
100	5,13E+01	3,74E+01	4,87E+01
150	5,01E+01	3,69E+01	4,84E+01
250	4,64E+01	3,50E+01	4,74E+01
365	3,91E+01	3,09E+01	4,49E+01

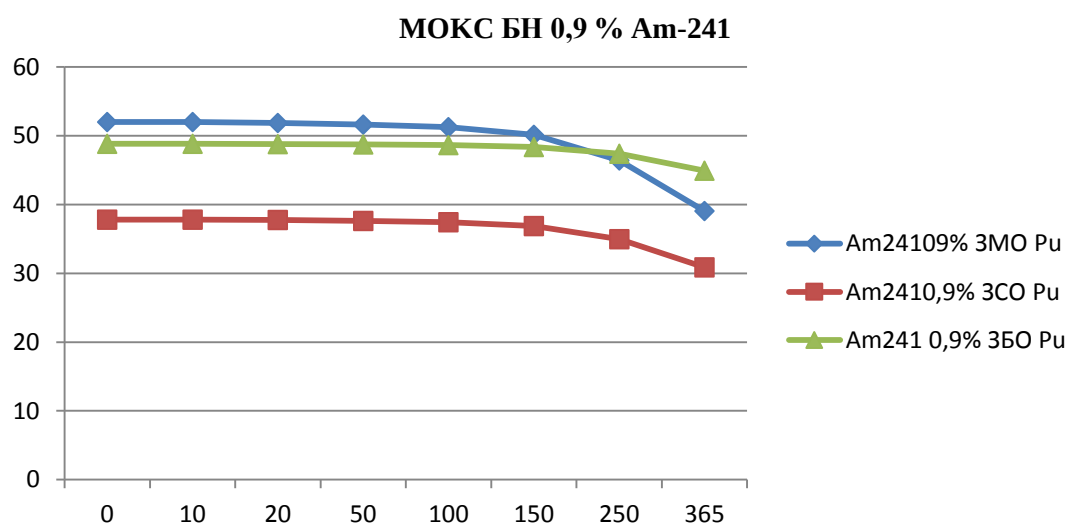


Рис. 14. Сравнение выжигания Am за год для БН МОКС с содержанием Am-241 0,9 %

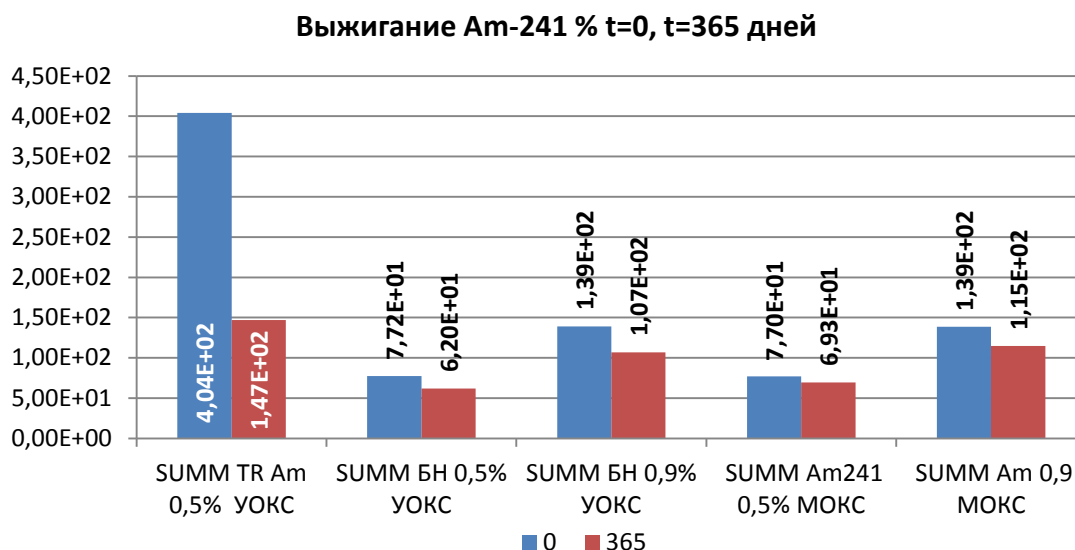


Рис. 15. Сравнение выжигания Am-241 за год для ВВЭР, БН УОКС и БН МОКС с разным содержанием Am

Из результатов, приведённых на рисунке 15, следует, что эффективности выжигания Am при одинаковых его добавках в соответствующие зоны очень близки для БН с УОКС и МОКС-топливом. Существенно отличаются от БН с разными видами топлива результаты выжигания Am в реакторе на тепловых нейтронах. Начальная масса загружаемого америция в реактор на тепловых нейтронах гораздо выше, по сравнению с БН, при одном и том же процентном содержании с реакторами БН. Видно, что темп выжигания тоже существенно выше.

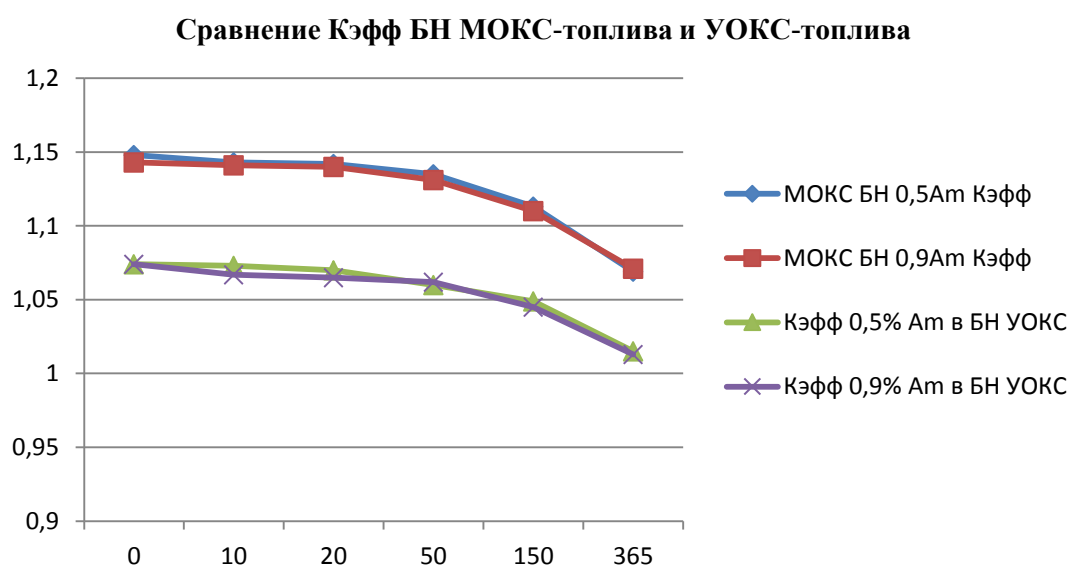


Рис. 16. Сравнение изменений $K_{эф}$ за год для БН УОКС и БН МОКС с разным содержанием Am

Из результатов сравнения систем с разными добавками Am и разными видами топлива (рис. 16) следует, что $K_{эф}$ слабо зависит от величины добавки Am, но отличается от вида топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены сравнительные расчетные исследования выжигания Am-241 в реакторах на тепловых и быстрых нейтронах при добавках Am-241 в топливо 0,5 % и 0,9 %.

Результаты исследований показали, что добавки Am-241 в топливо реакторов ВВЭР и БН позволяют не только снизить начальный запас реактивности, но и продлить кампанию реактора.

Сравнение потребления U-235 в процессе кампании показало, что потребление урана в варианте с добавкой америция в топливо ниже, чем в варианте без добавки.

Сравнение результатов выжигания Am-241 в тепловом и быстром реакторах показало лучший темп выжигания в тепловом реакторе и большую массу Am-241 в исходной загрузке.

Сравнение темпов выжигания Am-241 в реакторе БН с МОКС-топливом показало близкие результаты с реактором БН на урановом топливе.

Доля запаздывающих нейтронов в реакторах на тепловых и быстрых нейтронах с добавлением 0,5 % и 0,9 % в топливо практически не отличается от вариантов без добавки Am-241, что важно при обосновании безопасности.

Целесообразно провести расчётные исследования вариантов выжигания минорных актинидов в сценариях двухкомпонентных ЯЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bergelson B., Gerasimov A., Zaritskaya T., Kiselev G., Volovik A. Decay heat power and radiotoxicity of spent uranium, plutonium and thorium fuel at long-term storage. Beijing: SMiRT18, 2005, *18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*.

2. Salvatores M., Slessarev I., Uematsu M. A Global Physics Approach to Transmutation of Radioactive Nuclei. *Nuclear Science and Engineering*. 1994, v. 116, p. 1—18.

3. Japan Atomic Energy Agency – Nuclear Data Center. Japanese standard library for fast breeder reactors, thermal reactors, fusion neutronics and shielding calculations, and other applications (JENDL-4.0). JAEA-NDC, 2010. — URL: <https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j40/j40.html> (дата обращения 10.02.2025).

4. OECD NEA. French R&D on the Partitioning and Transmutation of Long-lived Radionuclides: An International Peer Review of the 2005 CEA Report. Papers: OECD Publishing, 2006.

5. Oak Ridge National Laboratory. Preliminary Multicycle Transuranic Actinide Partitioning-Transmutation Studies. 2007. ORNL/TM-2007/24.
6. Naoyuki Takaki. Neutronic potential of water cooled reactor with actinide closed fuel cycle. *Progress in Nuclear Energy*, 2000, v. 37, p. 1—4.
7. Kloosterman, J.L. Multiple Recycling of Plutonium in Advanced PWRs. Netherlands Energy Research Foundation (ECN), 1998.
8. Gilles Youinou. Plutonium Multirecycling in Standard PWRs Loaded with Evolutionary Fuels. *Nuclear science and engineering*, 2005, v. 151.
9. Atomic Energy of Canada Limited (AECL). Scenarios for the Transmutation of Actinides in Candu Reactors: Company Wide. Ontario: AECL, 2010. CW-123700-CONF-010.
10. Kostadin Zashev. Transmutation of Vver-1000 Spent Nuclear Fuel in Candu Reactors. София: ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2017.
11. Коробейников В.В., Колесов В.В., Терехова А.М., Каражелевская Ю.Е. Исследования возможности выжигания и трансмутации Am-241 в реакторе с америциевым топливом: Препринт ФЭИ – 3284. — Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2018. — 14 с. ISBN 978-5-907108-08-0.
12. Косякин Д.А., Коробейников В.В., Стогов В.Ю. Исследование зависимости эффективности трансмутации Am-241 от энергетической структуры плотности нейтронного потока: Препринт ФЭИ – 3294. — Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» — 2021. — 32 с. ISBN 978-5-907108-30-1.
13. Коробейников В.В., Колесов В.В., Игнатъев И.А. Расчётное моделирование выжигания минорных актинидов в реакторе на быстрых нейтронах с топливом без урана и плутония: Препринт ФЭИ-3299. Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2022. — 32 с. ISBN 978-5-907108-37-0.
14. Коробейников В.В., Колесов В.В., Каражелевская Ю.Е., Терехова А.М. Исследование возможности выжигания минорных актинидов в быстром реакторе с металлическим топливом на основе только минорных актинидов // ВАНТ. Серия Ядерно-реакторные константы. — 2020. — Вып.1. — С. 59—68. DOI: 10.55176/2414-1038-2020-1-59-68.
15. Колесов В.В., Коробейников В.В., Михалёв А.В., Пупко Л.П. Влияние спектральных и гетерогенных эффектов на эффективность выжигания минорных актинидов // ВАНТ. Серия Ядерно-реакторные константы. — 2023. — Вып.1. — С. 74—90.
16. Jaakko Leppanen. PSG2/SERPENT — A Continious Energy Monte-Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. — Helsinki: VTT Technical Research Centre of Finland, 2015. – URL: http://montecarlo.vtt.fi/download/Serpent_manual.pdf (дата обращения 10.02.2025).