

УДК 621.039.5

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.10>

Оригинальная статья / Original paper

Использование минорных актинидов в качестве выгорающих поглотителей в ядерных реакторах на тепловых нейтронах

В.В. Колесов¹, В.В. Коробейников², К.А. Исанов²¹ ИАТЭ НИЯУ МИФИ,

249039, Калужская обл, г. Обнинск, Студгородок, 1

² АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

249033, Калужская обл, г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

Реферат. В настоящее время наибольшее распространение получили реакторные установки типа ВВЭР. Стратегия развития ядерной энергетики России базируется на переходе к двухкомпонентной системе ядерной энергетики, в состав которой входят и реакторы на быстрых нейтронах. Однако еще долгое время ядерная энергетика будет базироваться на тепловых реакторах типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Важным в настоящее время является усовершенствование реакторов данного типа в направлении повышения глубины выгорания ядерного топлива, которая обеспечивается длительными топливными циклами и удлинением кампании реактора. Одной из проблем ядерной энергетики является наработка и накопление минорных актинидов в отработавшем ядерном топливе. Особое внимание к минорным актинидам связано с их высокой радиоактивностью и длительными периодами полураспада, составляющими сотни и даже миллионы лет. В настоящее время пока нет определенного подхода к их обращению – нельзя их просто захоранивать в связи с очень длительным временем сокращения их радиоактивности. Предполагается, что наиболее подходящим решением для их обезвреживания является выжигание и трансмутация в ядерных реакторах. В этом случае возможно снижение их количества и, следовательно, радиоактивности отходов перед окончательным захоронением. Конечно, при этом часть нейтронов, полезных для производства энергии, уйдет на ядерные превращения вредных минорных актинидов в менее вредные. Исследованы возможности применения минорных актинидов в качестве выгорающих поглотителей в реакторах на тепловых нейтронах. Это позволит повысить эффективность работы реактора вместо ее снижения при их рутинном выжигании. В основном для исследований применялись Am и Np с разнообразными нуклидными составами. Проведено сравнение видов ядерного топлива по эффективности использования минорных актинидов в качестве выгорающих поглотителей и их выжигания.

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

Для цитирования: Колесов В.В., Коробейников В.В., Исанов К.А. Использование минорных актинидов в качестве выгорающих поглотителей в ядерных реакторах на тепловых нейтронах. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;1:141–151. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.10>

Введение

Важной и сложной для решения является проблема минорных актинидов. Минорные актиниды – это радиоактивные изотопы америция, кюрия, нептуния. В настоящее время во всем мире обращение с минорными актинидами (МА) сводится к отправке их в хранилища в составе отработанного ядерного топлива. Исследуются также варианты их захоронения в долгосрочных могильниках вместе с продуктами деления. Главная особенность МА в том, что они остаются опасными в течение очень длительных периодов времени, исчисляющихся тысячами и даже миллионами лет. Для существующей и перспективной крупномасштабной ядерной энергетики исследуются разные варианты обращения с МА. Из самых распространенных подходов является выжигание МА в ядерных реакторах. Основная задача – это полное уничтожение или перевод в форму с низким уровнем радиоактивности. Рассматриваются также разные варианты трансмутационного топливного цикла, которые существенно снижают опасность МА [1–4]. Изучается много подходов к обращению с МА, но решение отмеченной выше проблемы пока широко рассматривается только на уровне математического моделирования с использованием программных комплексов и ядерных данных [5, 6].

В данной работе изучается возможность применения Am и Np в качестве выгорающих поглотителей в ядерных реакторах на тепловых нейтронах.

О выгорающих поглотителях

Одними из наиболее распространенных реакторных установок для АЭС являются водо-водяные установки. Важным элементом стратегии развития ядерной энергетики является переход к двухкомпонентной системе ядерной энергетики, в состав которой входят и реакторы на быстрых нейтронах. Усовершенствование реакторов разного типа в настоящее время ведется в направлении повышения глубины выгорания ядерного топлива, которое обеспечивается длительными топливными циклами и удлинением кампании реактора. Удлинение кампании позволяет уменьшить затраты энергии на собственные нужды и частоту выгрузки отработанного топлива.

Использование выгорающих поглотителей дает целый ряд очевидных преимуществ и возможностей:

- сведение к минимуму числа подвижных поглощающих стержней [7], оставляя их в таком количестве, которое требуется только для оперативного регулирования;
- увеличение первоначальной загрузки топлива в активную зону реактора, которая требуется для увеличения длительности кампании без повышения начального запаса реактивности;
- выравнивание распределения энерговыделения по объему реактора;
- регулирование температурного коэффициента реактивности.

Физические аспекты обоснования применения минорных актинидов в качестве выгорающих поглотителей в реакторах на тепловых нейтронах

Ранее в работе [12] были приведены критические массы интересующих нас минорных актинидов, которые имеют приемлемую критическую массу (табл. 1). Таким образом, они вполне могут быть использованы в качестве топлива ядерных реакторов. Особенностью некоторых минорных актинидов, например Am-241, является тот факт, что кроме выжигания «чужих» минорных актинидов он дополнительно нарабатывает

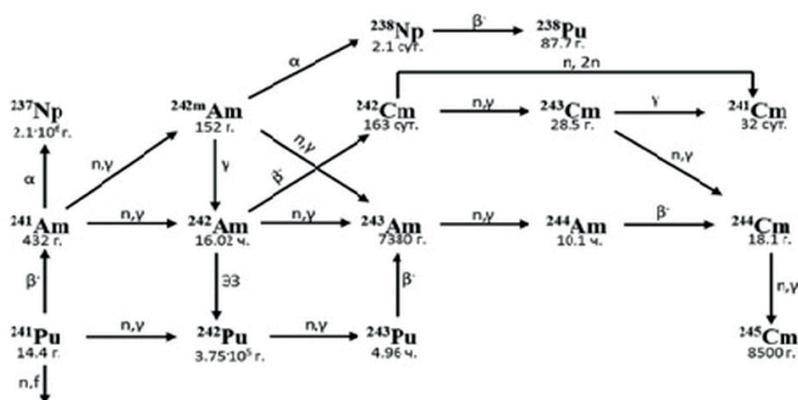


Рис. 1. Цепочки наработки минорных актинидов

Таблица 1

Сравнение критических масс минорных актинидов

Нуклид	$T_{1/2}$, лет	Тепловыделение, Вт/кг	Критмасса, кг
Np-237	$2,144 \cdot 10^6$	0,021	58,97
Am-241	432,6	115	69,56
Am-242m	141	4,5	11,62
Am-243	7370	6,4	144,27
Cm-242	162,8 сут	121228	375,31
Cm-243	29,1	1860	12,05
Cm-244	18,1	$2,8 \cdot 10^3$	27,79
Cm-245	8500	5,7	12,59
Cm-246	4760	10	48,61

«свои». В работах [13,14] исследовалась возможность использования в качестве топлива одних МА. Были сделаны выводы, что топливо в виде Am и Np-237 может использоваться только в реакторах на быстрых нейтронах. Это следует из того факта, что только в быстром спектре их сечения деления значительно превышают сечения захвата. В работе [14] приведены примеры энергетической зависимости сечения деления и радиационного захвата для ряда минорных актинидов, из которых следует, что для всех рассмотренных нуклидов кроме Am-242, Am-242m, Cm-243, Cm-245 и Cm-247 сечение радиационного захвата больше сечения деления вплоть до энергий 1 МэВ. При больших энергиях наблюдается обратная картина.

В работе [15] на результатах расчетов активных зон модельного реактора показано, что одновременно с трансмутацией появляется возможность выработки электроэнергии. При этом однако наблюдается достаточно низкое значение β_{eff} , что существенно осложняет эксплуатацию такого реактора. После захвата нейтрона Am-241, имеющий высокое сечение захвата в широкой области энергий, превращается в нуклид Am-242m с существенно более высоким сечением деления во всей области энергий. Таким образом, был нуклид, захватывающий нейтроны, образовался новый нуклид, способный делиться при поглощении нейтронов. Можно предположить, что при определенных условиях кампания реактора, содержащего добавки Am-241, может увеличиться либо можно снизить исходный запас реактивности.

Для расчетных исследований различных композиций, содержащих минорные актиниды, использовался программный код Serpent, реализующий метод Монте-Карло. Возможности и алгоритмы кода Serpent описаны в работе [16]. В коде Serpent реализована возможность моделирования изменения изотопного состава топлива в процессе работы ядерного реактора, что является важным для проведения данных исследований.

Исследование композиций активных зон тепловых реакторов типа ВВЭР с добавлением Am и Np-237 в состав топлива

Для исследований использовалась расчетная модель реактора типа ВВЭР-1200. 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 и является упрощенной.

Рассматривались шесть вариантов активных зон с разными видами топлива

Таблица 2

Варианты топливных композиций

Вариант	AmO ₂ (%)	NpO ₂	PuO ₂ (%)	UO ₂ (%)	U-235 (%)
BT1	0,9 (америциевый вектор)	0	9	90,1	2
BT2	0	0	6	94	2
BT3	0	0,9	9	90,1	2
BT4	0,9 (только Am-241)	0	9	90,1	2
BT5	0,9 (америциевый вектор)	0	0	99,1	6
BT6	0,9 (только Am-241)	0	0	99,1	6

с добавлением Am или Np. Варианты топливных композиций приведены в табл. 2.

Плутониевый вектор: Pu-239 – 58 %, Pu-240 – 30 %, Pu-241 – 11 %, Pu-242 – 1 %.

Америциевый вектор: Am-241 – 80 %, Am-242m – 1 %, Am-243 – 19 %.

Из приведенных выше шести вариантов следует, что варианты BT1–BT4 в качестве топлива используют окись плутония в смеси с Am или Np-237, а варианты BT5 и BT6 – окись урана. В таблице 3 приведена зависимость эффективного коэффициента размножения от времени облучения для разных вариантов топливных композиций ядерных реакторов на тепловых нейтронах.

Таблица 3

Значения K_{eff} для разных вариантов топливных композиций

Дней	$K_{eff}BT1$	$K_{eff}BT2$	$K_{eff}BT3$	$K_{eff}BT4$	$K_{eff}BT5$	$K_{eff}BT6$
0	1,10E+00	1,17E+00	1,14E+00	1,09E+00	1,09E+00	1,06E+00
50	1,08E+00	1,13E+00	1,11E+00	1,07E+00	1,07E+00	1,05E+00
150	1,06E+00	1,11E+00	1,10E+00	1,06E+00	1,08E+00	1,07E+00
365	1,05E+00	1,08E+00	1,07E+00	1,04E+00	1,07E+00	1,07E+00
730	1,02E+00	1,03E+00	1,03E+00	1,02E+00	1,04E+00	1,03E+00
1095	9,86E–01	9,78E–01	9,87E–01	9,85E–01	9,86E–01	9,83E–01

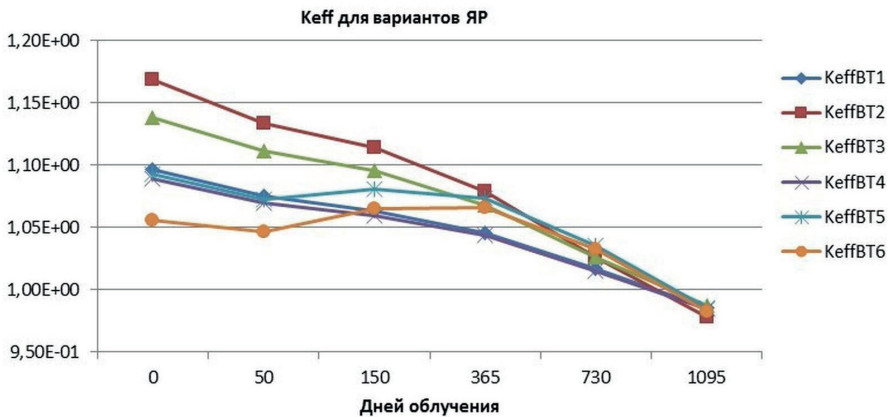


Рис. 2. Сравнение коэффициентов размножения для разных композиций реакторов типа ВВЭР в зависимости от времени облучения

На рисунке 2 приведено графическое представление данных из табл. 3.

Из результатов расчета видно, что варианты с добавкой оксида Am (варианты BT1, BT4, BT5 и BT6) «стартуют» с более низкого запаса реактивности по сравнению с вариантом без добавки Am и приходят к нулевому запасу реактивности примерно в одно и то же время, что, как отмечено выше, имеет преимущество при эксплуатации реактора. Замена окиси америция в топливе на окись нептуния (вариант BT3) приводит к ухудшению кампании, замена Am-241 на америциевый вектор (варианты BT5 и BT6) также приводит к ухудшению кампании, а добавка окиси плутония с одновременным уменьшением доли окиси урана в топливе и увеличением его обогащения (вариант BT4) приводит к «выполаживанию» кампании.

Вариант с Np-237 таких преимуществ в реакторе на тепловых нейтронах не показал.

В таблице 4 представлены значения β_{eff} для разных топливных композиций. Данные характеристики важны для безопасной эксплуатации реактора. Для вариантов, содержащих Am в сочетании с МОКС-топливом (варианты BT1 – BT4) параметр β_{eff} ниже, чем для вариантов с урановым топливом (варианты BT5, BT6).

Таблица 4

Значения β_{eff} для разных вариантов композиций реакторов типа ВВЭР

Вариант	BT1	BT2	BT3	BT4	BT5	BT6
β_{eff}	4,03E-03	4,16E-03	4,03E-03	4,05E-03	6,96E-03	7,05E-03

На рисунках 3, 4 приведены результаты расчетов по изменению концентраций америция в зависимости от времени облучения. Как уже отмечалось выше, подходы, рассмотренные в данном материале, включают в себя задачу не только выжигания Am, но и использования энергии, производимой им при делении. Таким образом, при добавлении Am в топливо решаются задачи сокращения потребления традиционных топливных материалов – урана и плутония.

Выжигание в % Am (BT4) в зависимости от времени

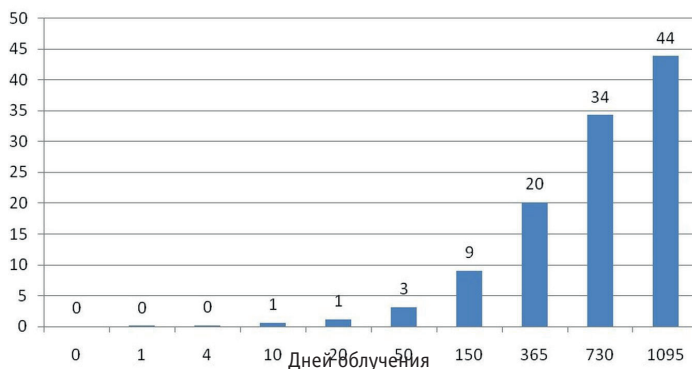


Рис. 3. Изменение в зависимости от времени выжженного Am в варианте BT4, использующем МОКС-топливо

Выжигание в % Am (BT5) в зависимости от времени

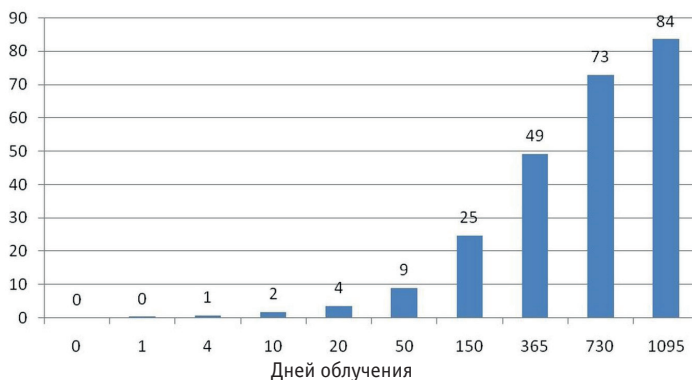


Рис. 4. Изменение в зависимости от времени выжженного Am в варианте BT5, использующем в качестве топлива уран

Варианты ВТ5 и ВТ6 используют урановое топливо и поэтому эффективность выгорания Ам выше по сравнению с МОКС-топливом. При использовании МОКС-топлива увеличивается скорость накопления дополнительного Ам из Рu. На рисунках 5, 6 приведены результаты, иллюстрирующие изменения концентраций Рu и Ам в зависимости от времени.



Рис. 5. Изменение в зависимости от времени концентраций Рu в вариантах ВТ1, ВТ4 – ВТ6, использующих в качестве МОКС-топлива (ВТ1, ВТ4) или уран (ВТ5, ВТ6)

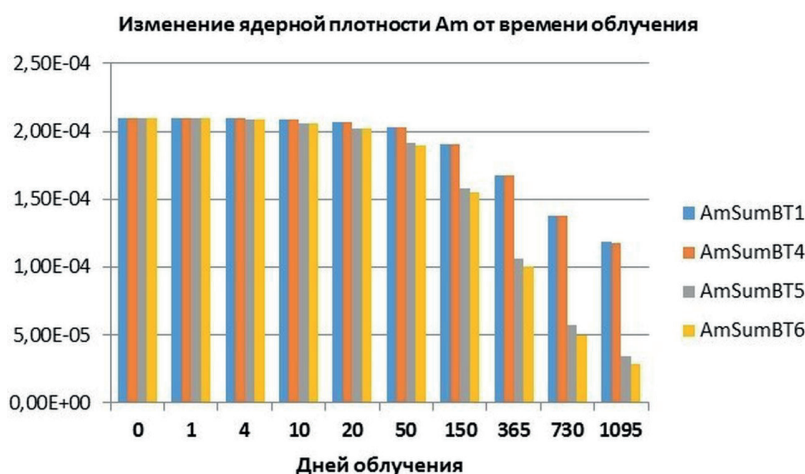


Рис. 6. Изменение в зависимости от времени концентрации Ам в вариантах ВТ1, ВТ4 – ВТ6, использующих в качестве топлива уран и плутоний

Заключение

В работе представлены результаты теоретических и расчетных исследований, позволяющие сделать вывод о возможности применения минорных актинидов в качестве выгорающих поглотителей в реакторах на тепловых нейтронах.

Рассмотрено урановое и МОКС-топливо с разными долями оксида Ам и Нр. Изучено влияние различной величины добавок на нейтронно-физические свойства модельных реакторов и эффективность выжигания МА.

Показано, что америций, используемый в качестве добавки в МОКС- или урановое топливо в реакторе типа ВВЭР, в ряде случаев позволяет снизить начальный запас реактивности, что является заметным преимуществом. Сравнение вариантов с добавкой Am-241 в МОКС- и урановое топливо в реакторе типа ВВЭР показало существенное снижение концентрации Am-241 в процессе кампании, а также появление Am-242m, который в данном случае является топливным материалом. Однако наиболее высокие темпы выгорания америция оказались в варианте с урановым топливом. Результаты исследования использования америция в качестве выгорающего поглотителя показывают дополнительный путь к сокращению его накопления в цикле реакторов на тепловых нейтронах.

Использование америция в свежем МОКС-топливе для реакторов на тепловых нейтронах не приводит к значительному снижению эффективной доли запаздывающих нейтронов, что важно при обосновании безопасности эксплуатации такого реактора. Добавки америция и нептуния позволяют значительно сократить потребление урана и плутония, снизить запас реактивности и увеличить длительности кампании. Результаты исследований авторов могут быть использованы при выжигании минорных актинидов, нарабатывающихся в российских и зарубежных реакторах.

Литература

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. *18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT18), Beijing, China, August 7–12, 2005*. SMiRT18-W02-2.
2. Salvatores M., Slessarev I., Uematsu M. A Global Physics Approach to Transmutation of Radioactive Nuclei. *Nuclear Science and Engineering*. 1994;116(1):1–18. DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE94-A21476>
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 20.07.2024).
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. ISBN 92-64-02296-1.
5. Oak Ridge National Laboratory. Preliminary Multicycle Transuranic Actinide Partitioning-Transmutation Studies. 2007, ORNL/TM-2007/24. URL: https://www.academia.edu/50125953/Preliminary_Multicycle_Transuranic_Actinide_Partitioning_Transmutation_Studies?hb-sb-sw=54457475 (дата обращения 20.07.2024).
6. Takaki N. Neutronic potential of water cooled reactor with actinide closed fuel cycle. *Progress in Nuclear Energy*. 2000;37(1-4):223–228. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(00\)00050-0](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(00)00050-0)
7. Захаров А.С., Коноплев К.А., Косолапов И.М., Онегин М.С., Полтавский А.С., Смольский С.Л., Фридман С.Р. Выгорающий поглотитель для модернизированных ТВС реактора ПИК. В сб. «IV Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» 27–30 сентября 2016 г.». М.: АО «НИКИЭТ», 2016, т. 1, с. 338–349.
8. Самойлов О.Б., Алексеев В.И., Галицких В.Ю. Анализ эффективности расширенного применения борного выгорающего поглотителя в активных зонах транспортных реакторов. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2014;3:90–95.

9. Колесов В.В., Коробейников В.В., Исанов К.А. Эффективность использования минорных актиноидов в качестве выгорающих поглотителей в ядерных реакторах с разными спектрами. Препринт ФЭИ-3308. Обнинск: АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2024, 39 с. ISBN 978-5-907108-37-0.

10. Matveev V.I., Ivanov A.P., Efimenko E.M. Concept of Specialized Fast Reactor for Minor Actinide Burning. *Proceedings of a Specialists Meeting held in Obninsk. Russian Federation. 22–24 September 1992.* IAEA-TECDOC-693. IAEA, 1993, 114 p.

11. Ганев И.Х., Лопаткин А.В. Орлов В.В. Гетерогенная трансмутация Am, Cm, Np в активной зоне реактора типа БРЕСТ. *Атомная энергия.* 2000;89(5):362–365. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3104> (дата обращения 20.07.2024).

12. 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.

13. 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.

14. Коробейников В.В., Колесов В.В., Игнатьев И.А. Расчетное моделирование выжигания минорных актиноидов 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.

15. Коробейников В.В., Колесов В.В., Терехова А.М., Каражелевская Ю.Е. Исследование возможности выжигания минорных актиноидов в быстром реакторе с металлическим топливом на основе только минорных актиноидов. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы.* 2020;1:59–68. DOI: <https://doi.org/10.55176/2414-1038-2020-1-59-68>

16. Leppanen J. Serpent – a Continious-energy Monte-Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. Helsinki, VTT Technical Research Centre of Finland, 2015, 164 p. URL: <https://serpent.vtt.fi/serpent/download/> (дата обращения 20.07.2024).

Поступила в редакцию 22.10.2024

После доработки 25.02.2025

Принята к опубликованию 14.03.2025

Авторы

Колесов Валерий Васильевич доцент, к.ф.-м.н.,

E-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

Коробейников Валерий Васильевич, главный научный сотрудник, профессор, д.ф.-м.н.,

E-mail: vvkorobeynikov@ippe.ru

Исанов Кирилл Алексеевич, инженер-исследователь,

E-mail: isanov_kirill@mail.ru

UDC 621.039.5

The Use of Minor Actinides as Burnout Absorbers in Thermal Neutron Nuclear Reactors**Kolesov V.V.¹, Korobeynikov V.V.², Isanov K.A.²**¹ IATE MEPhI,

1 Stugorodok, 249039 Obninsk, Kaluga reg., Russia

² IPPE JSC,

1 Bondarenko Sq. 249033 Obninsk, Kaluga reg., Russia

Abstract

Currently, the most widely used reactor units are VVER type. The strategy for the development of nuclear energy in Russia is based on the transition to a two-component nuclear energy system, which also includes fast neutron reactors. However, for a long time, nuclear energy will be based on VVER-1000 and VVER-1200 thermal reactors. It is currently important to improve reactors of this type in the direction of increasing the burn up depth of nuclear fuel, which is ensured by long fuel cycles and an extension of the reactor campaign.

One of the problems of nuclear energy is the production and accumulation of minor actinides in spent nuclear fuel. Special attention to minor actinides is associated with their high radioactivity and long half-lives, amounting to hundreds and even millions of years. At present, there is no specific approach to their handling. As noted above, they cannot simply be buried due to the very long time it takes to reduce their radioactivity.

It is assumed that the most suitable solution for their disposal is burning and transmutation in nuclear reactors. In this case, it is possible to reduce their quantity and, consequently, reduce the radioactivity of the waste before final disposal. Of course, some of the neutrons useful for energy production will go to nuclear transformations of harmful minor actinides into less harmful ones.

This paper examines the possibilities of using minor actinides as burnable absorbers in thermal neutron reactors. This will increase the efficiency of the reactor instead of reducing it with their routine burning. Basically, Am and Np with various nuclide compositions were used for the studies.

A comparison of nuclear fuel types was made in terms of the efficiency of using minor actinides as burnable absorbers and their burning.

Keywords: transmutation, burnout of minor actinides, spent fuel, radioactivity, biological hazard, spent fuel storage, neutron spectrum, heterogeneity.

For citation: Kolesov V.V., Korobeynikov V.V., Isanov K.A. The Use of Minor Actinides as Burnout Absorbers in Thermal Neutron Nuclear Reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;1:141–151. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.10> (in Russian).

References

1. Bergelson B., Gerasimov A., Zaritskaya T., Kiselev G., Volovik A. Decay heat power and radio-toxicity of spent uranium, plutonium and thorium fuel at long-term storage. *18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT18)*, Beijing, China, August 7–12, 2005. SMiRT18-W02-2.
2. Salvatores M., Slessarev I., Uematsu M. A Global Physics Approach to Transmutation of Radioactive Nuclei. *Nuclear Science and Engineering*. 1994;116(1):1–18. DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE94-A21476>
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> (accessed Jul. 20, 2024).

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. ISBN 92-64-02296-1.
5. Oak Ridge National Laboratory. Preliminary Multicycle Transuranic Actinide Partitioning-Transmutation Studies. 2007, ORNL/TM-2007/24. URL: https://www.academia.edu/50125953/Preliminary_Multicycle_Transuranic_Actinide_Partitioning_Transmutation_Studies?hb-sb-sw=54457475 (accessed Jul. 30, 2024).
6. Takaki N. Neutronic potential of water cooled reactor with actinide closed fuel cycle. *Progress in Nuclear Energy*. 2000;37(1-4):223–228. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(00\)00050-0](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(00)00050-0)
7. Zakharov A.S., Konoplev K.A., Kosolapov I.M., Onegin M.S., Poltavskiy A.S., Smol'skiy S.L., Fridman S.R. Burnable absorber for modernized fuel assemblies of the PIK reactor. In: *IV Int. scientific-technical. conf. "Innovative projects and technologies of nuclear power"*, September 27–30, 2016. M., JSC NIKIET Publ., 2016, vol. 1, p. 338–349 (in Russian).
8. Samoilov O.B., Alekseev V.I., Galitskikh V.Yu. Analysis of the efficiency of expanded use of boron burnable absorber in active zones of transport reactors. *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear and reactor constants*. 2014;3:90–95.
9. Kolesov V. V., Korobeynikov V. V., Isanov K. A. Efficiency of using minor actinides as burnable absorbers in nuclear reactors with different spectra. Preprint IPPE-3308. Obninsk, IPPE JSC Publ., 2024, 39 p. ISBN 978-5-907108-37-0.
10. Matveev V.I., Ivanov A.P., Efimenko E.M. Concept of Specialized Fast Reactor for Minor Actinide Burning. *Proceedings of a Specialists Meeting held in Obninsk, Russian Federation. September 22–24, 1992*. IAEA-TECDOC-693. IAEA, 1993, 114 p.
11. Ganey I.Kh., Lopatkin A.V., Orlov V.V. Heterogeneous transmutation of Am, Cm, Np in a BREST core. *Atomic Energy*. 2000;89:880–883. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1011386014512>
12. Korobeynikov V.V., Kolesov V.V., Terekhova A.M., Karazhelevskaya Yu.E. Studies of the possibility of burning and transmutation of Am-241 in a reactor with americium fuel. Preprint IPPE-3284. Obninsk, IPPE JSC Publ., 2018, 14 p. ISBN 978-5-907108-08-0.
13. Kosyakin D.A., Korobeynikov V.V., Stogov V.Yu. Study of the dependence of the Am-241 transmutation efficiency on the energy structure of the neutron flux density: Preprint IPPE-3294. Obninsk, IPPE JSC Publ., 2021, 32 p. ISBN 978-5-907108-30-1.
14. Korobeynikov V.V., Kolesov V.V., Ignatiev I.A. Computational modeling of minor actinide burnout in a fast neutron reactor with fuel without uranium and plutonium: Preprint IPPE-3299. Obninsk, IPPE JSC Publ., 2022, 32 p. ISBN 978-5-907108-37-0.
15. Korobeynikov V.V., Kolesov V.V., Karazhelevskaya Yu.E., Terekhova A.M. Study of the possibility of burning minor actinides in a fast reactor with metallic fuel based only on minor actinides. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants*. 2020;1:59–68. DOI: 10.55176/2414-1038-2020-1-59-68
16. Leppanen J. Serpent – a Continuous-energy Monte-Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. Helsinki, VTT Technical Research Centre of Finland, 2015, 164 p. URL: <https://serpent.vtt.fi/serpent/download/> (дата обращения 20.07.2024).

Authors

Valeriy V. Kolesov, Docent, Cand. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

Valeriy V. Korobeynikov, Principal Scientist, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: vvkorobeynikov@ippe.ru

Kirill A. Isanov, research engineer,

E-mail: isanov_kirill@mail.ru