

УДК 621.0+532.5

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_3_63

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПЛИВА С КЮРИЕВОЙ ФРАКЦИЕЙ В РЕАКТОРЕ РБЕЦ

Т.С. Дикова

ORCID: 0009-0001-6217-4669 e-mail: dikovats@oiate.ru
Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
Обнинск, Россия

Д.Д. Цветкова

ORCID: 0009-0005-6965-6387 e-mail: lysinadd@oiate.ru
Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
Обнинск, Россия

А.М. Терехова

ORCID: 0000-0003-1151-3912 e-mail: AMTerekhova@mephi.ru
Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
Обнинск, Россия

Исследована возможность выжигания минорных актинидов в реакторе на быстрых нейтронах с топливом, включающим минорные актиниды. Проанализированы различные подходы к трансмутации минорных актинидов, рассматривается модель гетерогенного реактора, использующего уран-кюриево-нитридное топливо. Проведены вычислительные исследования трансмутации минорных актинидов в быстром реакторе естественной циркуляции (РБЕЦ). Обосновано, что успешное внедрение реакторов на кюриево-нитридном топливе открывает перспективы использования минорных актинидов в качестве альтернативного топлива. В результате радиоактивность отработавшего ядерного топлива может быть значительно снижена.

Ключевые слова: нитридное топливо, минорные актиниды, трансмутация, уран-кюриево-нитридное топливо, реактор на быстрых нейтронах, РБЕЦ.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дикова, Т.С. Исследование топлива с кюриевой фракцией в реакторе РБЕЦ / Т.С. Дикова, Д.Д. Цветкова, А.М. Терехова // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 63-70.
DOI: 10.46960/1816-210X_2023_3_63

STUDY OF FUEL WITH A CURIUM FRACTION IN THE RBEC REACTOR

T.S. Dikova

ORCID: 0009-0001-6217-4669 e-mail: dikovats@oiate.ru
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)
Obninsk, Russia

D.D. Tsvetkova

ORCID: 0009-0005-6965-6387 e-mail: lysinadd@oiate.ru
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)
Obninsk, Russia

A.M. Terekhova

ORCID: 0000-0003-1151-3912 e-mail: AMTerekhova@mephi.ru
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)
Obninsk, Russia

Abstract. This article is devoted to the possibility of burning minor actinides in a fast neutron reactor with fuel including minor actinides. The following problems are study: approaches to the transmutation of minor actinides; creation of a model of a heterogeneous reactor using uranium-curium nitride fuel; computational studies of the transmutation of minor actinides in a fast neutron reactor. It has been proven that successful introduction of curium-fuel reactors provides the prospects for the use of minor actinides as alternative fuel. As a result, the radioactivity of spent nuclear fuel can be significantly reduced.

Key words: nitride fuel, minor actinides, transmutation, uranium-curium fuel, fast neutron reactor, RBEC.

FOR CITATION: T.S. Dikova, D.D. Tsvetkova, A.M. Terekhova. Study of fuel with a curium fraction in the RBEC reactor. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 3. С. 63-70. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_3_63

Введение

Проблема переработки и утилизации минорных актинидов (МА) актуальна в связи с тем, что они вносят основной вклад в радиоактивность отработавшего ядерного топлива. Добавление минорных актинидов в качестве фракций в основную топливную композицию является одним из перспективных способов уменьшения активности отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) [1]. Возможность добавления кюриевой фракции в топливо рассматривалась в ряде работ [2]. Аргументом в пользу добавления фракций с МА в топливо служит получение электроэнергии и снижение доли минорных актинидов одновременно.

В ряду минорных актинидов обычно выделяют америций, нептуний и кюрий, именно они рассматриваются как основные кандидаты на выжигание, поскольку являются доминирующими по массе. Отработавшее ядерное топливо содержит около 1 % минорных актинидов, т.е. трансурановых изотопов нептуния (Np-237), америция (Am-241, Am-243) и кюрия (Cm-244, Cm-245, Cm-246). Пропорции фракций нептуния, америция и кюрия в МА зависят от типа топлива, используемого в ядерных реакторах, и глубины его выгорания. Темпы наработки отработавшего ядерного топлива и минорных актинидов опубликованы МАГАТЭ [3], т.е. на 1 т ОЯТ приходится 64,7 г кюрия [4].

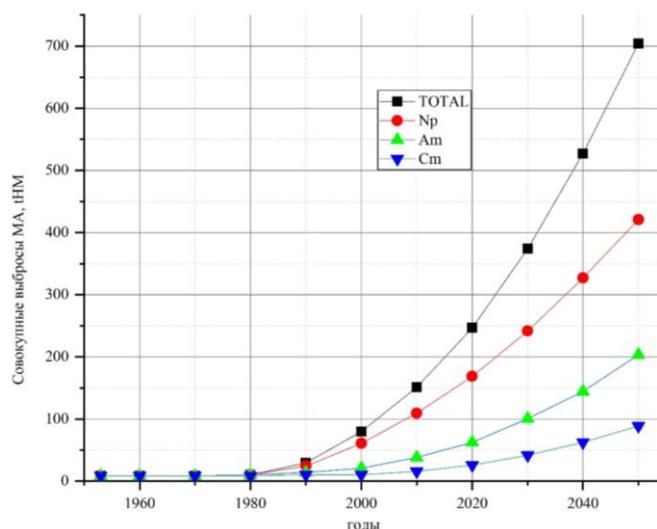


Рис. 1. Оценочный запас второстепенных актинидов во всем мире

Fig. 1. Estimated stock of minor actinides worldwide

В данной работе рассматривается возможность выжигания кюрия в быстрых ядерных реакторах на примере РБЕЦ (быстрого реактора естественной циркуляции). Выбор реактора на быстрых нейтронах мотивирован тем, что в ряде работ [2, 5-7] указывалось, что выжигание минорных актинидов в быстром спектре предпочтительнее, чем в тепловом. Несмотря на то, что у Cm-244 период полураспада составляет 18,1 г., его длительное хранение может вы-

звать проблему нераспространения из-за наработки плутония. Примерно через 3 г. выдержки кюриевая фракция будет состоять в основном из трех изотопов кюрия: Cm-244, Cm-245 и Cm-246. Если рассматривать нейтронно-физические свойства данных изотопов кюрия, можно сделать вывод, что Cm-244 является делящимся материалом, и его размножающие свойства лучше по сравнению с плутонием [8]. Изотопы Cm-244 и Cm-244 выгодно отличаются от изотопов U- 238 и U-235 с точки зрения нейтронно-физических свойств.

Вычислительные методы и математическая модель реактора

Для построения математической модели исследуемого реактора использовался программный комплекс «SERPENT». Он представляет собой непрерывный энергетический код, реализующий метод Монте-Карло. Особенность данного программного комплекса заключается в удобной механике реализации как 2D- и 3D-геометрий топливных элементов, так и активных зон реакторов [9]. CSG-модель геометрии, состоящая из материала ячеек и определяемая произвольным типом поверхности, используется и дает ряд преимуществ программному комплексу SERPENT. Также комплекс имеет дополнительные геометрии, которые можно использовать для проектирования топлива [10-11]. В ПК SERPENT применяются библиотеки непрерывных сечений взаимодействия нейтронов со средой, представленные в ACE-формате. Это позволяет использовать в расчетах сведения о сечениях из таких файлов оцененных ядерных данных, как ENDF/B, JEFF и т.д. Данные характеристики позволили нам при помощи этого программного комплекса построить модель гетерогенной зоны реактора РБЕЦ и произвести ее расчет.

Математическая модель строилась на основе реактора РБЕЦ, прототип которого был разработан НИЦ «Курчатовский институт». В проекте РБЕЦ тепловой мощностью 900 МВт и электрической мощностью 340 МВт конструкция и теплогидравлические параметры основываются на проверенных технических решениях и имевшемся на тот момент опыте использования топлива, конструкционных материалов и технологий жидкометаллического теплоносителя [11]. Теплоносителем в данной модели реактора служит свинец-висмут. Активная зона представляет собой 12 участков, отличающихся друг от друга различными параметрами (температурой и составом материалов) (рис. 2). Материалов всего четыре: топливо активной зоны (которое также может отличаться по обогащению в зависимости от подзоны), теплоноситель, топливо зоны воспроизводства и конструкционная сталь.

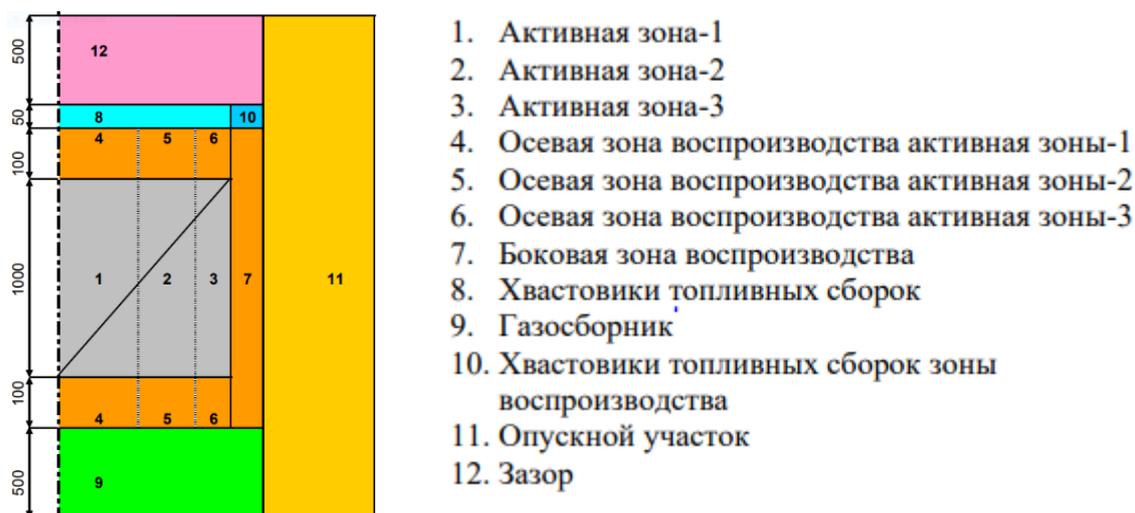


Рис. 2. Вертикальный профиль активной зоны реактора РБЕЦ

Fig. 2. Vertical section of the RBEC reactor core

В качестве стандартного топлива в данном реакторе используется (Pu+U)N с обогащенным на 0,1 % по U-235 отвалным ураном. В настоящем исследовании (Cm+U)N используется также с отвалным ураном, обогащенным 0,1 % по U-235. Мы применяем нитрид кюрия, основываясь на данных [11-12], описывающих топливо реактора РБЕЦ. При этом нитридное топливо по многим параметрам превосходит оксидное; его теплопроводность примерно в 7 раз, а плотность – в 1,3 раза больше, чем у оксидного топлива. Оно хорошо совместимо со сталями, из которых делают оболочки твэлов [13]. Были рассчитаны объемные доли топлива, которые необходимы для функционирования реактора: UN-0.92 и CmN-0.08.

В результате математического моделирования получена визуализация математической модели активной зоны (рис. 3).

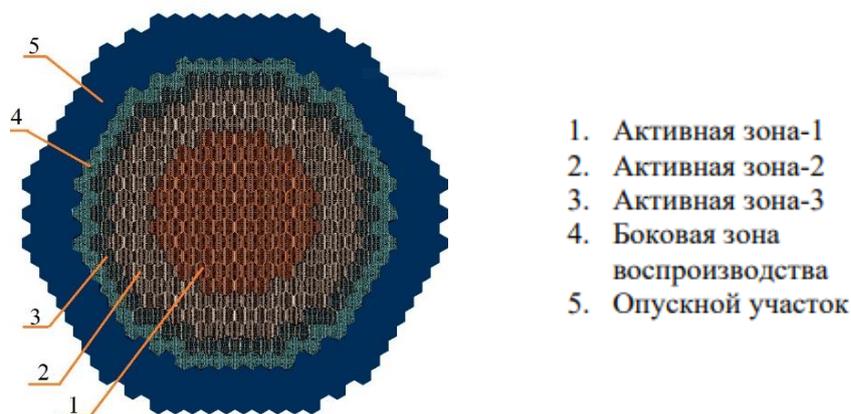


Рис. 3. Горизонтальный профиль активной зоны реактора РБЕЦ

Fig. 3. Horizontal section of the RBEC reactor core

Результаты моделирования

В результате проведения сессии расчетов, реализованных с помощью вышеописанного ПК SERPENT и библиотеки JEFF3.1.1 [14], был получен ряд данных, графическая интерпретация которых приведена далее.

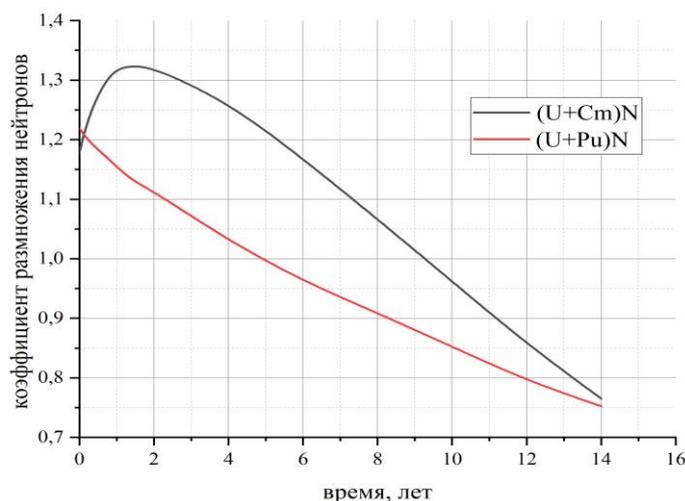


Рис. 4. Сравнение коэффициента размножения кюриевого и плутониевого топлив

Fig. 4. The comparison of multiplication factor of curium and plutonium fuels

Анализ ядерных концентраций осколков деления в топливной композиции на момент конца топливной кампании показывает, что с точки зрения содержания минорных актинидов (их концентрации минимальны) данный метод демонстрирует эффективность. На графике для наглядности приведены результаты на момент конца топливной кампании уран-плутониевого топлива, из сравнения которых можно сделать вывод, что уран-кюриевоое топливо в меньшей степени способствует накоплению минорных актинидов и плутония. Однако концентрация плутония может способствовать поднятию вопроса о нераспространении [16].

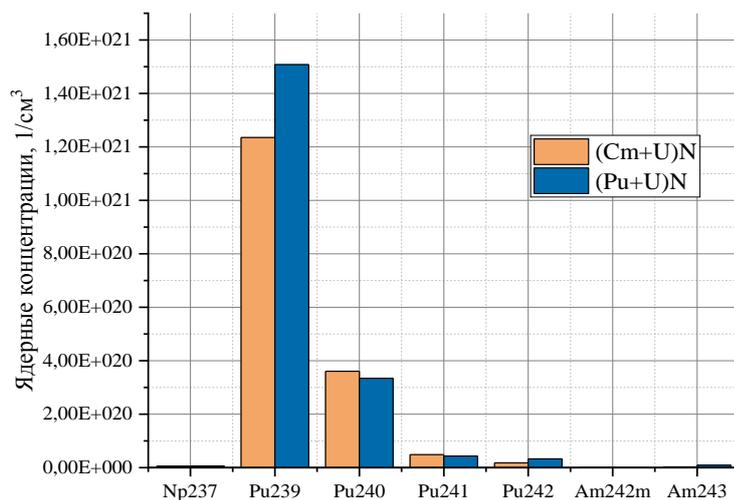


Рис. 7. Ядерные концентрации некоторых изотопов на конец кампании

Fig. 7. Nuclear densities of isotopic composition of spent fuel

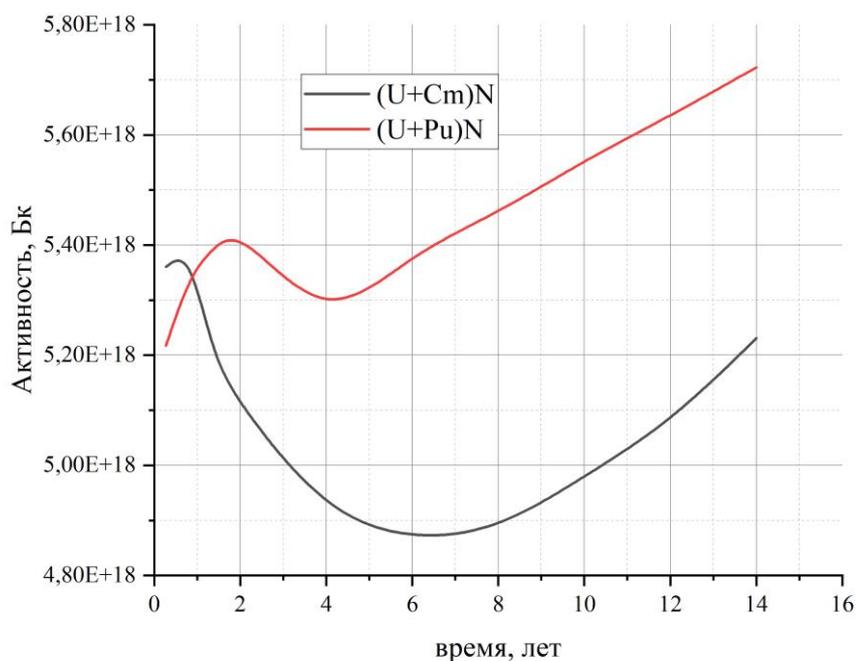


Рис. 8. Изменение активности топлива за период топливной кампании

Fig. 8. The activity of fuel dependence from time

Исследование изменение активности топлива в период топливной кампании представляет дополнительный интерес для исследования, поскольку изначальная цель – это снижение активности ОЯТ. По итогам сравнительных наблюдений динамики стандартного и уран-кюриевого топлива (рис. 8) активности обоих видов топлива имеют условно минимальное значение. Однако уран-кюриево топливо более выражено снижает свою активность и достигает минимальной точки на шестом году топливной кампании. Следовательно, продление топливной кампании не представляется целесообразным.

Заключение

Проведены исследования выжигания изотопов кюрия путем добавления его к топливной композиции. Выявлен ряд преимуществ такого типа топлива по сравнению со стандартно используемым в реакторе типа РБЕЦ:

- существенно меньшее накопление минорных актинидов;
- значительное снижение активности топлива относительно начального уровня;
- существенный дополнительный оперативный запас реактивности.

При этом необходимо принимать во внимание присутствие существенного количества изотопов плутония на момент конца топливной кампании, вследствие чего может возникнуть проблема нераспространения.

Библиографический список

1. IAEA, International Atomic Energy Agency. Status of Minor Actinide Fuel Development, Nuclear Energy Series, NF-T-4.6, IAEA Publishing, Vienna, Austria. 2009.С. 9.
2. **Dikova, T.S.** Investigation the possibility of burning Cm a curium fuel reactor // T.S. Dikova, Yu.E. Karazhelevskaya, A.M. Terekhova// Journal of Physics: Conference Series. 1-6. 1689. 2020. doi:10.1088/1742-6596/1689/1/012048.
3. IAEA, International Atomic Energy Agency. Nuclear Fuel Cycle Simulation System (VISTA), IAEA-TECDOC-1535, IAEA Publishing, Vienna. 2007.
4. **Culbreth, W.** Separations campaign (TRP) transmutation research program projects // W. Culbreth, E. Bakker, J. Viggato // University of Nevada, Las Vegas, 2002.
5. **Osaka, M.** Analysis of Curium in Mixed Oxide Fuel Irradiated in the Experimental Fast Reactor JOYO for the Evaluation of Its Transmutation Behavior // M. Osaka, S. Koyama, T. Mitsugashira // Journal of Nuclear Science and Technology. 2004.
6. IAEA, International atomic energy agency, Use of Fast Reactors for Actinide Transmutation (Proceedings of a Specialists Meeting, Obninsk, Russian Federation, 22-24 September 1992), IAEA-TECDOC-693, IAEA, Vienna (1993).
7. **Posey, J.C.** Curium-244 isotopic power fuel-chemical recovery from commercial power reactor fuels. Isotopes Development Center Oak Ridge National Laboratory Post Office Box X Oak Ridge, TN 37830. 1973.
8. **Leppanen, J.** PSG2/SERPENT – A Continious Energy Monte-Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. VTT Technical Research Centre of Finland release, Helsinki. 2012.
9. **Третьякевич, С.С.** Программные средства, применяемые для анализа и обоснования безопасности атомной электростанции в части нейтронно-физических вычислений. Использование кода PSG2/SERPENT для расчета K_{eff} уран-водо-графитовых систем // С.С. Третьякевич, Ф.А Сперанский. А.Ю. Аникин, Д.К. Герасимов, А.В. Курындин, А.А. Строганов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. Обнинск, 2011. Вып. 3. С. 72-76.
10. **Аникин, А.Ю.** Верификация программного средства PSG2/SERPENT для расчета K_{eff} уранводных систем // А.Ю. Аникин, Д.К. Герасимов, А.В. Курындин, К.Ю. Соколов, А.А. Строганов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. Обнинск, 2012. Вып. 3. С. 70-73.
11. **Алексеев, П.Н.** Оптимизация концептуальных решений для свинцово-висмутового быстрого реактора РБЕЦ-М // Алексеев П.Н., Микитюк К.О., Васильев.А.А// Атомная энергия, 2004. Т. 97. Вып. 2. С. 115-125.

12. **Хорасанов, Г.Л.** Некоторые макрохарактеристики активных зон быстрых реакторов средней мощности / Г.Л. Хорасанов, А.И. Блохин // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2012. № 3. С. 18.
13. **Потапов, А.М.** Оценка термодинамических свойств нитрида кюрия // Компьютерное моделирование физико-химических свойств стекол и расплавов: труды XII Российского семинара. – Курган, 2014. С. 51-52.
14. **Leppanen, J.** PSG2/SERPENT – A Continious Energy MonteCarlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, – Helsinki: VTT Technical Research Centre of Finland, 2015. Электронный ресурс: http://montecarlo.vtt.fi/download/Serpent_manual.pdf (дата доступа 24.02.2022)
15. **Sintsov, A.E.** Some features of the combustion of the curium fraction of younger actinides in a neutron field // A.E. Sintsov, V.A. Apse, A.N. Shmelev // Izvestiya Wysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernaya Energetika, 2004, 98, Obninsk, Russian federation. 2004.
16. **Amiard, J.-C.** Disarmament and Decommissioning in the Nuclear Domain // John Wiley & Sons Limited, Vol. 4. 2021.

*Дата поступления
в редакцию: 20.01.2023*

*Дата принятия
к публикации: 25.07.2023*