

УДК 539.17

П.Д. Кучерова, А.Л. Терентьев, учащиеся (УО НДТ)
Научный руководитель И.А. Некало, старший преподаватель (БНТУ)
г. Минск

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ

В результате радиоактивного распада ядер происходит выделение значительного количества энергии, которая поглощается в веществе, приводя к превращению кинетической энергии вылетающих частиц в тепловую.

Особое внимание стоит уделить такому нуклиду как ^{241}Am , который, в основном, подвержен α -распаду, имеет высокую активность и период полураспада в 432,5 года. Америций является искусственным элементом и его получают путем облучения ^{238}U по следующей схеме (рис. 1):

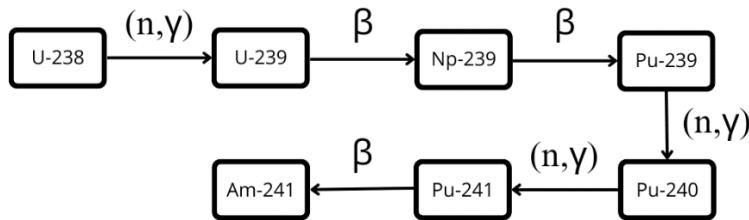


Рис. 1. Схема получения Am-241

Реакторный плутоний состоит на 5-25% из ^{241}Pu , который, в результате, β -распада самопроизвольно превращается в ^{241}Am [1].

В данной статье рассматривается полезное использование ^{241}Am в активной зоне реактора на тепловых нейтронах. Использование америция в составе топливной матрицы позволит равномерно распределить нейтронный поток и наработать короткоживущие нуклиды (рис.2).

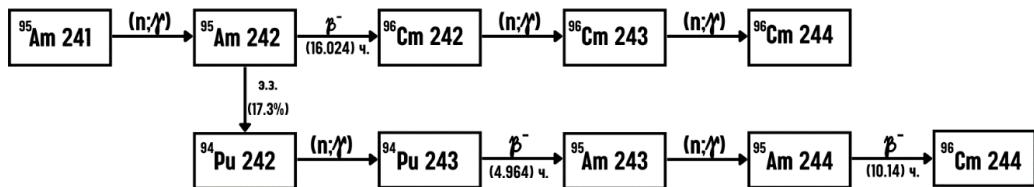


Рис. 2. Схема наработки Кюрия [2]

В схеме, изображенной на рисунке 2, имеется такой элемент как Ст-242, у которого период полураспада составляет 162,8 дня, а тепловыделение от этого нуклида составляет 121 Вт/г [3].

Можно рассчитать количество наработанного Ст-242 в активной зоне реактора путем составления системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dN_{Am}^{241}}{dt} = -\Phi \cdot \sigma_c^{241} \cdot N_{Am}^{241}(t) - \lambda_{Am}^{241} \cdot N_{Am}^{241}(t) \\ \frac{dN_{Am}^{242}}{dt} = \Phi \cdot \sigma_c^{241} \cdot N_{Am}^{241}(t) - \lambda_{Am}^{242} \cdot N_{Am}^{242}(t) \\ \frac{dN_{Cm}^{243}}{dt} = \lambda_{Am}^{242} \cdot N_{Am}^{242}(t) - \lambda_{Cm}^{242} \cdot N_{Cm}^{242}(t) \end{cases} \quad (1)$$

где Φ – плотность потока тепловых нейтронов, $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$; λ_{Am}^{241} – постоянная распада Am-241, с^{-1} ; σ_c – эффективное сечение захвата нейтронов; N_{Am}^{241} – число структурных единиц в массе Am-241.

Плотность потока тепловых нейтронов рассчитывается по следующей формуле:

$$\Phi = \frac{N}{\Sigma_f^{U^{235}} \cdot V_{A3} \cdot Q_f} \quad (2)$$

где N – тепловая мощность реактора, Вт; V – объем активной зоны реактора, см^3 ; Q_f – энергия деления ядра U^{235} , равная $3,244 \cdot 10^{-11}$ Дж; d – диаметр активной зоны, см; h – высота активной зоны, см; $\Sigma_f^{U^{235}}$ – макроскопическое сечение деления U^{235} , которое находится по следующей формуле:

$$\Sigma_f^{U^{235}} = \sigma_f^{235} \cdot \vartheta = 584,9773 \cdot 10^{-24} \cdot 3,16 \cdot 10^{20} = 0,185 \text{ см}^{-1} \quad (3)$$

где σ_f^{235} – микроскопическое сечение деления U^{235} , равное при 0,0253 эВ 584,9773 барн; ϑ – ядерная концентрация U^{235} , см^{-3} .

Для решения системы дифференциальных уравнений (1) необходимо задать начальные условия: масса диоксида америция будет равна 20 кг; изотопный состав америция на 100% состоит из изотопа Am-241; энергия налетающих нейтронов будет равна 0,0253 эВ; кампания составит 4 года; америций будет использоваться в составе топлива топливных сборок для реактора ВВЭР-1200.

Решая систему дифференциальных уравнений (1), получим график, изображенный на рисунке 3, где показана зависимость количества наработанного См-242 от дней.

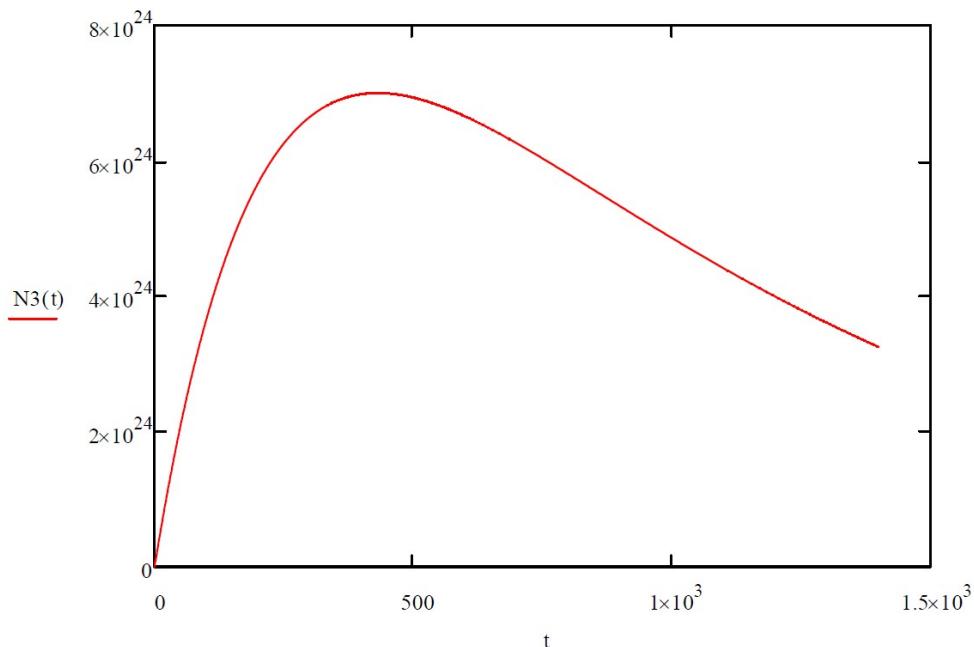


Рис. 3. Изменение количества См-242 от времени

Отработавшие тепловыделяющие сборки (ОТВС) после отработки направляют в бассейны выдержки, где оно будет выдерживаться еще не менее 3 лет. с Учетом топливной кампании в 4 года, график количества наработанного См-242 составит (рис. 4).

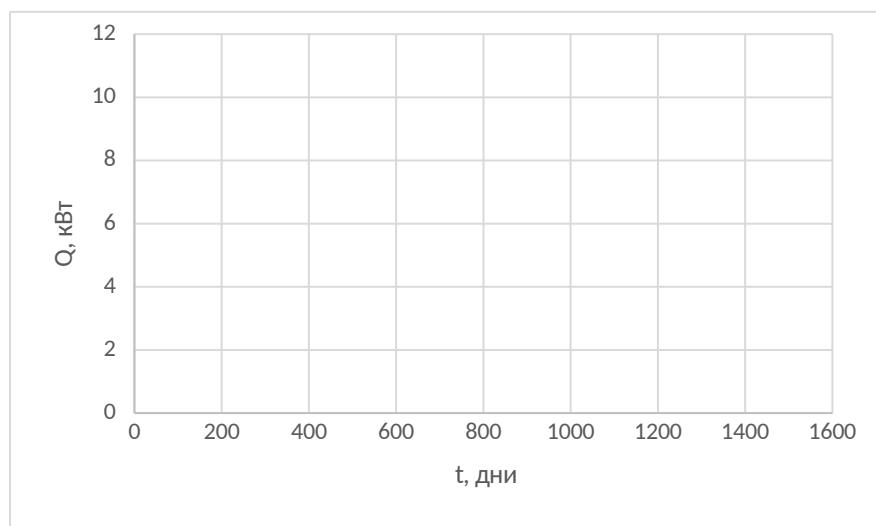


Рис. 4. Тепловыделения от См-242 в составе топливных сборок за период топливной кампании

113-4

Отработавшие тепловыделяющие сборки подлежат дальнейшему охлаждению в бассейне выдержки, вода в которых охлаждается специальной системой, соединенной с системой промконтура ответственных потребителей, выделяемое тепло от которых можно направить на регенеративную систему второго контура и повысить выдаваемую электрическую мощность паровой турбины за счет отключения одного и отборов (рис.5).

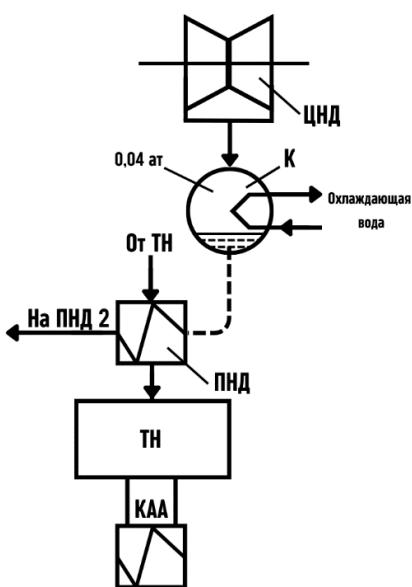


Рис. 5. Предлагаемая схема замыкания промконтура ответственных потребителей (КАА) и ПНД1 [4]

Для достижения более эффективного выгорания делящегося ядерного топлива можно использовать Am-241 в составе топливной матрицы топливных сборок и равномерно распределить его по активной зоне. Лучшее выгорание может произойти из-за спонтанного деления Сm-242 равное $8 \cdot 10^6$ нейtron/с.

При распаде См-242 получается Ru-238, который имеет эффективное сечение захвата нейтронов в 413 барн. Так что использования Am-241 в составе топлива может сильно повлиять на экономию урана в перспективе.

Если использовать регенеративные подогреватели для замыкания системы промконтура, то можно получить дополнительную электрическую мощность для паровой турбины, отключив один из отборов пара. Это положительно скажется на сроке окупаемости двухконтурной АЭС с реакторами ВВЭР-1200. Также предлагаемый вариант модернизации имеет следующие преимущества:

VI Международная молодежная научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»

113-5

17-23 ноября 2023 года

- уменьшение занимаемой площади за счет удаления брызгальных бассейнов;
- отсутствие дополнительных расходов на подготовку подпиточной воды для брызгальных бассейнов.

Список литературы:

1. Бать, Г.А. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов : учебное пособие для вузов / Г. А. Бать, В.Д. Байбаков, М.С. Алхутов ; под ред. Г. А. Батя. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 254 с.
2. Кучерова П. Д., Терентьев А. Л. Возможность использования Am-241 в топливных сборках для улучшения экономической эффективности в реакторах на тепловых нейтронах // научные исследования молодых учёных: сборник статей XXIV. – 2023. – С. 17.
3. Жизнин С.З. Радиоизотопные источники энергии. Обеспечение. Энергетическая безопасность. / С.З. Жизнин, В.М. Тимохов. – 2017 г. – 12 с.
4. Кучерова П. Д., Терентьев А. Л. Замыкание системы охлаждения ответственных потребителей АЭС с реактором ВВЭР-1200 через регенеративные подогреватели // Актуальные научные исследования: сборник статей XIII. – 2023. – С. 114-116.

Информация об авторах:

Кучерова Полина Дмитриевна, учащаяся УО «Национальный детский технопарк», 220114, Республика Беларусь, г. Минск, улица Франциска Скорины, 25к3, kucherovapolina10@gmail.com

Терентьев Альберт Леонидович, учащийся УО «Национальный детский технопарк», 220114, Республика Беларусь, г. Минск, улица Франциска Скорины, 25к3, alikterentev500@gmail.com

Некало Игорь Андреевич, старший преподаватель, БНТУ, 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65, nekalo@bntu.by