

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):

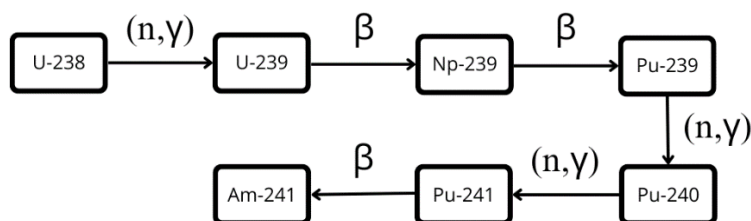


Рис. 1. Схема получения Am-241

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

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

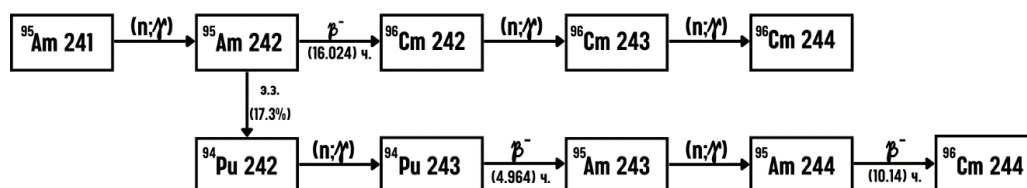


Рис. 2. Схема наработки Кюрия [2]

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

Можно рассчитать количество наработанного Cm-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 Cm-242 от дней.

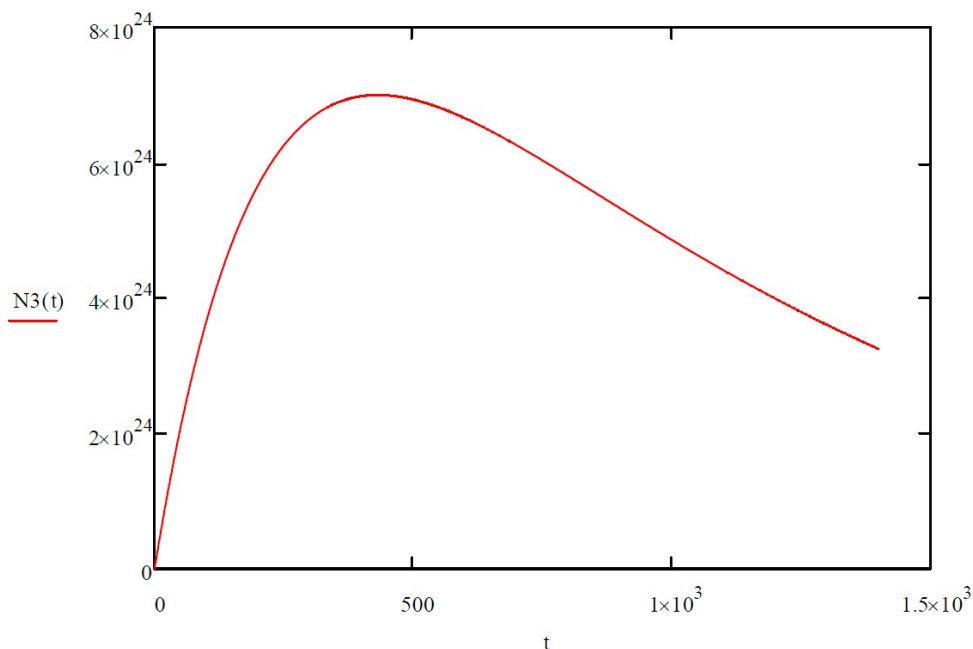


Рис. 3. Изменение количества Cm-242 от времени

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 Cm-242 составит (рис. 4).

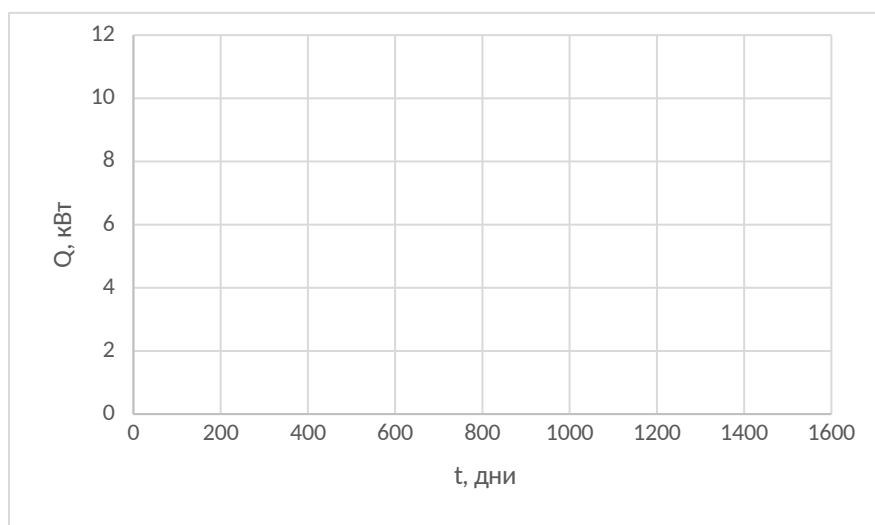


Рис. 4. Тепловыделения от Cm-242 в составе топливных сборок за период топливной кампании

The diagram shows a power plant layout. At the top is a condenser (ЦНД) with a cooling water inlet from the top. Below it is a pump (К) that circulates cooling water through a loop. The pump is driven by a motor (0,04 ат). The cooling water loop includes a condenser (ЦНД) and a pump (К). The main cycle consists of a boiler (ТН) connected to a turbine (ПНД), which is connected to a generator (КАА). The turbine (ПНД) is also connected to a condenser (ЦНД) via a dashed line, indicating a closed cycle. The condenser (ЦНД) is connected to a pump (К) which circulates cooling water through a loop. The pump (К) is driven by a motor (0,04 ат). The cooling water loop includes a condenser (ЦНД) and a pump (К). The main cycle consists of a boiler (ТН) connected to a turbine (ПНД), which is connected to a generator (КАА). The turbine (ПНД) is also connected to a condenser (ЦНД) via a dashed line, indicating a closed cycle. The condenser (ЦНД) is connected to a pump (К) which circulates cooling water through a loop. The pump (К) is driven by a motor (0,04 ат). The cooling water loop includes a condenser (ЦНД) and a pump (К).

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:

- 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