

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039

**СНИЖЕНИЕ ОБЪЕМА БОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗАПАСА
РЕАКТИВНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЫГОРАЮЩЕГО
ПОГЛОТИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ (Gd_2O_3) В ТОПЛИВЕ
РЕАКТОРА ВВЭР-1200**

© 2019 М.А. Абу Сондос, В.М. Демин, В.И. Савандер

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Рассматриваются различные схемы размещения выгорающего поглотителя в системе компенсации избыточной реактивности в реакторе типа ВВЭР при удлинённых кампаниях с целью снижения максимальной концентрации борного поглотителя. На основе по вариантной оптимизации анализируется влияние способа размещения выгорающего поглотителя в твэгах (гомогенное и гетерогенное) и количество размещаемого выгорающего поглотителя в них, на максимальную величину запаса реактивности, компенсируемую системой борного регулирования.

Ключевые слова: Выгорающий поглотитель (ВП), гомогенный (ГВП) и гетерогенный (ГТВП) выгорающий поглотитель, Serpent, ВВЭР, ТВС, полиячейка, максимальная концентрация борной кислоты, система жидкостного регулирования, избыточная реактивность, коэффициент размножения ТВС (K_{∞}).

Поступила в редакцию 19.06.2019

После доработки 05.07.2019

Принята к публикации 07.07.2019

Введение

В реакторах ВВЭР по мере усовершенствования топливного цикла переходят на удлинённые кампании реактора, при этом также требуется повышение обогащения топлива подпитки. Для компенсации возникающей избыточной реактивности на одну кампанию применяется как традиционная система, основанная на борном регулировании, так и размещение в топливе выгорающих поглотителей, в основном гадолиния. Учитывая, что при высокой концентрации борного поглотителя в теплоносителе плотностной коэффициент реактивности по теплоносителю может принимать отрицательные значения, что при высокой концентрации борного поглотителя в теплоносителе плотностной коэффициент реактивности по теплоносителю может принимать отрицательные значения, что при выбранных параметрах решетки влияет на условия ядерной безопасности реакторной установки АЭС (НП 082-07) [1-4, 11], необходимо всемерно увеличивать долю избыточной реактивности, компенсируемую с помощью выгорающих поглотителей [5-9].

В идеале снижение концентрации выгорающего поглотителя при работе реактора должно было бы происходить так, чтобы высвобождаемая при этом реактивность примерно соответствовала падению реактивности за счет выгорания топлива. В этом случае существенно сокращается применение подвижных органов регулирования для поддержания критичности при работе реактора в стационарном режиме, а диапазон изменения концентраций борной кислоты будет наименьшим. Считается, что такого идеального соответствия в водо-водяных реакторах достичь невозможно, хотя положительный эффект от применения выгорающих поглотителей весьма ощутим [10].

Скорость изменения количества ядер ВП во времени описывается уравнением, которое абсолютно аналогично уравнению выгорания для ^{235}U . Тогда:

$$\frac{dN_{\text{ВП}}}{dN_5} = \frac{N_{\text{ВП}} \sigma_a^{\text{ВП}} \phi_{\text{ВП}}}{N_5 \sigma_a^5 \phi_5}$$

При гомогенном размещении ВП в топливе (ГВП) поток тепловых нейтронов, действующих на выгорающий поглотитель и на ^{235}U , будет одинаковым $\phi_{\text{ВП}} = \phi_5$ и отношение скоростей выгорания ВП и ^{235}U зависит от изменения $N_{\text{ВП}}$ и N_5 во времени. В реальной ТВС, где ВП размещается только в нескольких из 312 твэлов, распределение потока тепловых нейтронов по твэлам зависит от количества ВП в каждом твэле, количества твэгов и обогащения топлива. Поскольку сечение поглощения тепловых нейтронов для Gd высокое [12], его наличие в ТВС сильно влияет на распределение потоков тепловых нейтронов, что оказывает существенную роль на скорость выгорания различных изотопов в ТВС.

При гетерогенном размещении ВП в ТВС (ГТВП) он сначала выгорает в поверхностном слое (с объемом $2\pi r dr$), где расположен ВП, а затем поверхностные слои становятся прозрачными, и начинается уже объемное выгорание (в объеме πr^2) [10]. Поэтому, снижение избыточной реактивности за счет ВП в этом случае меньше, чем для гомогенного размещения.

Для описания частичных перегрузок примем следующую модель. Во-первых, будем рассматривать перегрузки без перестановок ТВС. В этом случае в активной зоне можно выделить элемент периодичности, состоящий из ТВС с различными длительностями облучения. Во-вторых, коэффициент размножения поляячейки периодичности в простейшем случае возьмем равным среднему арифметическому по всей совокупности ТВС, образующих поляячейку. В этом случае изменение коэффициента размножения поляячейки со временем можно представить в следующем виде:

$$\bar{K}^{POLY}(t) = \frac{K_{\infty}^{TBC}(t) + K_{\infty}^{TBC}(t+T) + K_{\infty}^{TBC}(t+2T)}{3} \quad (1)$$

Длина кампании реактора определяется из условия, что в конце кампании усредненный коэффициент размножения поляячейки равен критическому значению, обеспечивающему значение $K_{\text{эф}}=1$.

$$\bar{K}_{\infty}^{POLY}(T) = \frac{K_{\infty}^{TBC}(T) + K_{\infty}^{TBC}(2T) + K_{\infty}^{TBC}(3T)}{3} = K_{\infty}^{CRIT} \quad (2)$$

В первую очередь в качестве базового случая рассмотрим применение этой модели для варианта без компенсации избыточной реактивности (В1, табл. 1). Для полутора годичной кампании кратность перегрузки будет равна трем. Рассмотрим зависимость коэффициента размножения от времени (выгорания) для ТВС без гадолия. Удлиненную кампанию для трехкратной перегрузки топлива примем равной 480 суток. Тогда с помощью соотношения 2 для коэффициента размножения ТВС без выгорающего поглотителя на конец кампании получим значение K_{∞}^{CRIT} , которое будет использовано для всех остальных вариантов.

Постановка задачи

Для расчетного анализа поставленной задачи были выбраны несколько вариантов использования ВП в ТВС с разными концентрациями и разным расположением в них (варианты В₁-В₁₀). Для каждого из них был проведен расчет изменения коэффициента размножения ТВС в зависимости от глубины выгорания топлива. Исходные данные по загрузке ВП в ТВС и их геометрические характеристики для этих вариантов представлены в таблице 1 и на рисунках 1а, 1б и 2.

Таблица 1 – Распределение ВП в рассмотренных вариантах расчетов [Distribution of BA in the considered variants of calculations]

Вариант	Масса Gd, г/ТВС	Количество и состав топлива твэлов и твэгов
В ₁		312-4,90%(²³⁵ U)
В ₂	878 (ГВП)	300-4,95%(²³⁵ U) и 12-3,65%(²³⁵ U) с 5,0%Gd ₂ O ₃
В ₃	878 (ГВП)	288-4,95%(²³⁵ U) и 24-4,30%(²³⁵ U) с 2,5%Gd ₂ O ₃
В ₄	890 (ГВП)	228-4,95%(²³⁵ U) и 84-4,80%(²³⁵ U) с 0,7%Gd ₂ O ₃
В ₅	1409 (ГВП)	288-4,95%(²³⁵ U) и 24-4,30%(²³⁵ U) с 4,0%Gd ₂ O ₃
В ₆	1928 (ГВП)	288-5,00%(²³⁵ U) и 24-3,70%(²³⁵ U) с 5,5%Gd ₂ O ₃
В ₇	2611 (ГВП)	288-5,00%(²³⁵ U) и 24-3,70%(²³⁵ U) с 7,5%Gd ₂ O ₃
В ₈	1762 (ГВП)	282-5,00%(²³⁵ U) и 30-3,90%(²³⁵ U) с 4,0%Gd ₂ O ₃
В ₉	2644 (ГВП)	276-5,00%(²³⁵ U) и 36-4,13%(²³⁵ U) с 5,0%Gd ₂ O ₃
В ₁₀	3523 (ГВП)	270-5,00%(²³⁵ U) и 42-4,26%(²³⁵ U) с 5,7%Gd ₂ O ₃
В ₁₁	887 (ГТВП)	312-4,90%(²³⁵ U), 84-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0142 см (в отверстие твэга)
В ₁₂	1420 (ГТВП)	312-4,90%(²³⁵ U), 84-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0195 см (в отверстие твэга)
В ₁₃	1952 (ГТВП)	312-4,90%(²³⁵ U), 84-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0291 см (в отверстие твэга)
В ₁₄	2662 (ГТВП)	312-4,90%(²³⁵ U), 84-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0478 см (в отверстие твэга)
В ₁₅	887 (ГТВП)	312-4,90%(²³⁵ U), 126-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0131 см (в отверстие твэга)
В ₁₆	1775 (ГТВП)	312-4,90%(²³⁵ U), 180-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0167 см (в отверстие твэга)
В ₁₇	2661 (ГТВП)	312-4,90%(²³⁵ U), 222-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0131 см (в отверстие твэга)
В ₁₈	3549 (ГТВП)	312-4,90%(²³⁵ U), 240-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0167 см (в отверстие твэга)
В ₁₉	2653 (ГВП) и (ГТВП)	288-4,95%(²³⁵ U), 93-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0161 см (в отверстие твэга) и 24-4,3%(²³⁵ U) с 3,75% Gd ₂ O ₃ .
В ₂₀	3536 (ГВП) и (ГТВП)	282-5,0%(²³⁵ U), 102-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0202 см (в отверстие твэга) и 30-4,0%(²³⁵ U) с 40% Gd ₂ O ₃ .

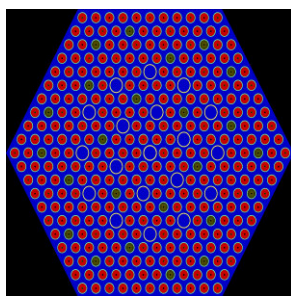


Рисунок 1а – Размещение ВП в ТВС (В₃, В₅-В₇)
[The placement of the BAs in FA (B₃, B₅-B₇)]

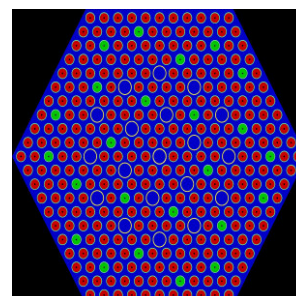


Рисунок 1б – Размещение ВП в ТВС (В₈-В₁₁) [The placement of the BAs in FA (B₈-B₁₁)]

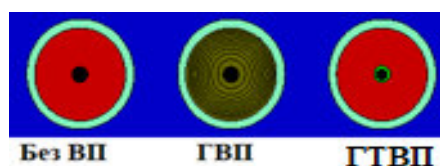


Рисунок 2 – Геометрия твэлов (без ВП, ГВП и ГТВП) [The geometry of the fuel rods (without the BAs, HBA, and NHBA)]

Для расчета зависимости коэффициента размножения ТВС от глубины выгорания топлива использовался код SERPENT (2.1.30) [13] и библиотека ядерных данных ENDFb7 [14]. Расчет осуществлялся при средних стандартных значениях температур топлива и теплоносителя и средней плотности теплоносителя.

Результаты расчетных исследований

На первом этапе расчетных исследований были рассмотрены варианты В₁-В₄, в которых изменялось число твэгов в ТВС, но при этом общее количество гадолиния и урана-235 в ТВС оставалось неизменным. Вариант В₁ предполагает чисто жидкостное регулирование запаса реактивности без использования выгорающего поглотителя. Для выбранного количества гадолиния в ТВС он успевает выгореть за одну кампанию. В этом случае в выражение усредненного коэффициента размножения (формула (2) слагаемые ($K_{\infty}(T+t) + K_{\infty}(2T+t)$) будут одинаковыми для всех этих вариантов. Поэтому характер изменения усредненного коэффициента размножения полиячейки $\bar{K}_{\infty}^{POLY}(t)$ временным изменением коэффициента размножения ТВС $K_{\infty}^{TBC}(t)$ на интервале первой кампании ТВС. Соответствующие расчетные характеристики рассматриваемых величин представлены на рисунках 3 и 4.

При малом числе твэгов в ТВС на один твэг в среднем приходится много твэлов и основное влияние на временное изменение $\bar{K}_{\infty}^{POLY}(t)$ оказывают именно твэлы. Суммарное воздействие таково, что выгорание топлива в ТВС приводит к снижению этой величины, а выгорание гадолиния приводит к ее росту. Но поскольку в начале кампании из-за блокировки внутренних слоев твэга выгорание гадолиния происходит медленно, влияние твэлов в начале кампании невелико. Поэтому наличие твэгов снижает начальную величину $\bar{K}_{\infty}^{POLY}(0)$ и приводит к более медленному снижению этой величины. В дальнейшем по мере выгорания гадолиния и снижения его блокировки роль твэга возрастает и резко увеличивается спад коэффициента размножения полиячейки, приближаясь к зависимости для варианта без твэгов.

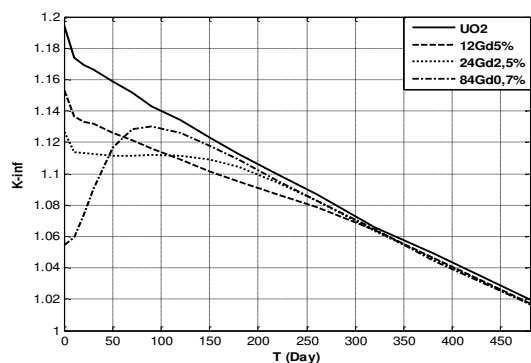


Рисунок 3 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ полиячейки для вариантов В₁-В₄ [$K_{\text{инф}}$ of poly-cell depending on burnup depth for variants В₁-В₄]

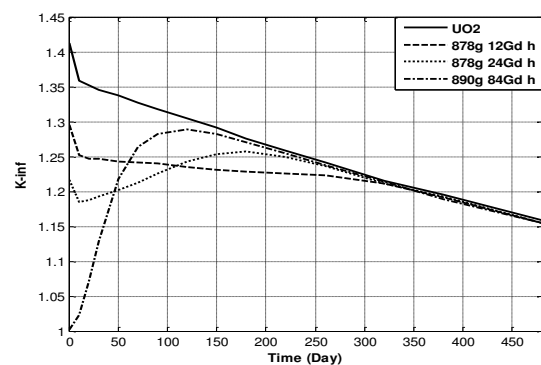


Рисунок 4 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ ТВС в первой кампании для вариантов В₁-В₄ [$K_{\text{инф}}$ of FA in first campaign depending on burnup depth for variants В₁-В₄]

Увеличивая количество твэгов при одновременном снижении загрузки гадолиния в твэл приводит к резкому изменению характера временного поведения $\bar{K}_{\infty}^{POLY}(t)$ за счет увеличения роли твэгов и уменьшения числа твэлов, приходящихся на один твэг.

Поэтому снижение реактивности за счет ВП увеличивается, что приводит к уменьшению коэффициента размножения нейтронов в начале кампании. Однако быстрое выгорание Gd высвобождает реактивность и приводит к росту коэффициента размножения нейтронов (В₄). В результате этого имеет место выбег реактивности в варианте В₄ вплоть до момента времени порядка 80 суток. Максимальный коэффициент размножения нейтронов в этом варианте уменьшается от значения для базового варианта В₁ на 0,064 ($\Delta K_{\text{инф.макс.}} = 0,064$). В варианте В₃ соотношение скорости

высвобождения реактивности и скорости уменьшения запаса реактивности за счет выгорания топлива до момента времени 150-200 суток примерно равны и максимальный коэффициент размножения нейтронов уменьшается по сравнению с базовым вариантом V_1 на 0,068 ($\Delta K_{\text{инф.макс.}} = 0,068$). Таким образом, минимальное значение максимальной величины коэффициента размножения полячейки за первую кампанию, а значит и минимальное значение концентрации борного поглотителя для жидкостной системы регулирования, достигается для варианта V_3 .

Во второй серии вариантов был проведен расчёт для гомогенного размещения гадолиния в 24 твэгах (ГВП (V_3, V_5-V_7)), но с разной общей массой ВП, а следовательно, и с его разной концентрацией в твэгах. Результаты расчетов показаны на рисунках 5 и 6.

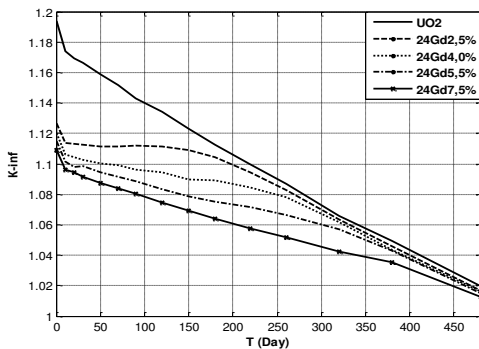


Рисунок 5 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ полячейки для вариантов V_1, V_3, V_5-V_7 [$K_{\text{инф}}$ of poly-cell depending on burnup depth for variants V_1, V_3, V_5-V_7]

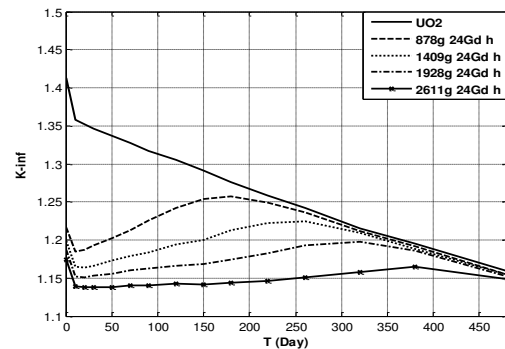


Рисунок 6 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ ТВС в первой кампании для вариантов V_1, V_3, V_5-V_7 [$K_{\text{инф}}$ of FA in first campaign depending on burnup depth for variants V_1, V_3, V_5-V_7]

С повышением концентрации ВП в твэгах, блокировка потока тепловых нейтронов повышается, а скорость выгорания ВП на начальном этапе снижается при увеличении загрузки гадолиния в твэг. В результате увеличение загрузки гадолиния в твэг в этом случае не оправдано, так как максимум коэффициента размножения приходится на начало кампании, а его величина слабо снижается. Поэтому концентрация борного поглотителя будет слегка снижаться. Однако снижение реактивности за счет добавочной загрузки ВП не эквивалентны соответствующему увеличению его массы и концентрации. В частности уменьшение максимального коэффициента размножения нейтронов полячейки от базового состояния V_1 : $\Delta K_{\text{инф.макс.}} = 0,068; 0,074; 0,079$ и $0,085$ соответственно для вариантов V_3, V_5-V_7 , что в процентном отношении существенно меньше степени увеличения его массы.

Следовательно, для повышения влияния твэгов на характер изменения коэффициента размножения полячейки во времени необходимо снижать долю твэлов, приходящихся на один твэг, то есть повышать число твэгов в ТВС, и при этом повышать загрузку гадолиния в твэг. В этом случае начальное значение $K_{\infty}^{\text{TBC}}(0)$ будет снижаться, а постепенное разблокирование гадолиния в твэге приводит к медленному росту $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$, что в совокупности приводит к существенному снижению максимального значения к $\bar{K}_{\infty}^{\text{POLY}}(t)$, то есть снижает максимальную концентрацию борного поглотителя в активной зоне реактора. На рисунках 7 и 8 предоставлены расчетные данные изменения $\bar{K}_{\infty}^{\text{POLY}}(t)$ и $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$ при различном числе твэгов в ТВС (24, 30, 36 и 42) и различной загрузке ВП в твэг (890; 1762; 2644 и 3523 г Gd на ТВС) варианты (V_3, V_8-V_{10})).

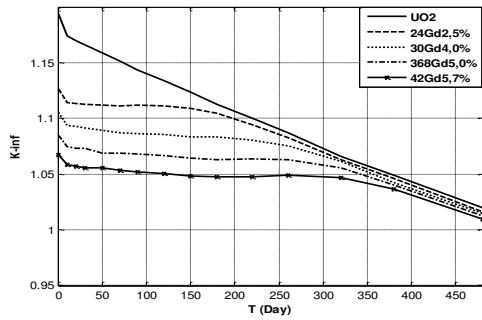


Рисунок 7 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ полячейки для вариантов B_1, B_3, B_8-B_{10} [$K_{\text{инф}}$ of poly-cell depending on burnup depth for variants B_1, B_3, B_8-B_{10}]

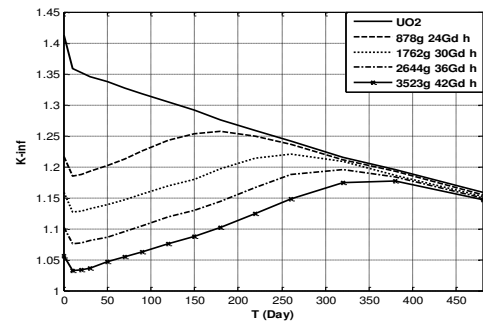


Рисунок 8 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ ТВС в первом кампании для вариантов B_1, B_3, B_8-B_{10} [$K_{\text{инф}}$ of FA in first campaign depending on burnup depth for variants B_1, B_3, B_8-B_{10}]

Результаты расчетов показывают влияния обоих факторов на закон изменения со временем величины $\bar{K}_{\infty}^{\text{POLY}}(t)$. Во-первых, эта величина остается в течении большей части кампании примерно постоянной величиной, во-вторых, эта величина снижается по мере увеличения числа твэгов и загрузки гадолиния в твэг, однако при этом весь гадолий не успевает выгореть в течении кампании и, тем самым, снижает выгорание выгружаемого топлива. При этом запас реактивности на жидкостное регулирование для варианта B_{10} примерно в четыре раза меньше, чем для эталонного варианта без выгорающих поглотителей.

В следующем наборе вариантов (варианты $B_{11}-B_{14}$) было зафиксировано общее число твэгов в ТВС, но в каждом из них весь гадолий размещался гетерогенно в малой области по периферии центрального отверстия твэга, причем с повышением общей массы ВП толщина слоя гадолия также возрастала (0,11; 0,2; 0,29 и 0,48 мм соответственно). Расчетные зависимости коэффициентов размножения ТВС и полячейки из ТВС для этих вариантов приедены на рисунках 9 и 10.

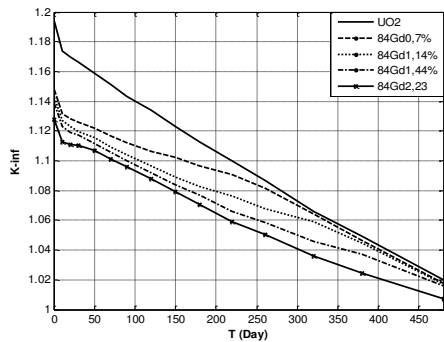


Рисунок 9 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ полячейки для вариантов $B_1, B_{11}-B_{14}$ [$K_{\text{инф}}$ of poly-cell depending on burnup depth for variants $B_1, B_{11}-B_{14}$]

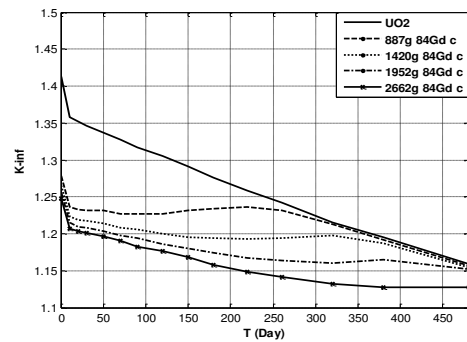


Рисунок 10 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ ТВС в первой кампании для вариантов $B_1, B_{11}-B_{14}$ [$K_{\text{инф}}$ of FA in first campaign depending on burnup depth for variants $B_1, B_{11}-B_{14}$]

С повышением концентрации ВП в твэгах, блокировка потока тепловых нейтронов повышается, а скорость выгорания ВП уменьшается, что приводит к удлинению времени его выгорания. Отметим, что и в этом случае снижение начального запаса реактивности за счет применения ВП не адекватно соответствующему увеличению его массы и концентрации в твэге. Соответствующее снижение максимального коэффициента размножения нейтронов в полячейке относительно базового варианта без ВП (B_1) равны: $\Delta K_{\text{инф, макс.}} = 0,046; 0,051; 0,056$ и $0,066$ соответственно для вариантов $B_{11}-B_{14}$, что существенно меньше аналогичных значений для вариантов с гомогенным размещением ВП в твэгах.

В следующем наборе вариантов (B_{15} - B_{18}) изменялось как общее количество гадолиния в ТВС (887; 1775; 2662 и 3549 г Gd), так и общее число твэгов в ТВС (126, 180, 222 и 240), но при этом весь гадолиний в твэгах размещался гетерогенно, как и в предыдущем наборе вариантов, а с повышением количества ВП в ТВС возрастало и число твэгов. На рисунке 11 предоставлены результаты расчетов для этих вариантов.

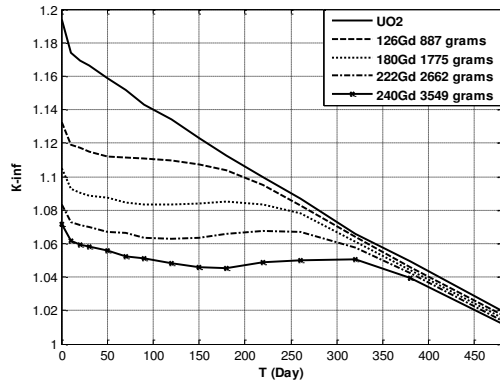


Рисунок 11а – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ полячейки для вариантов B_1, B_{15} - B_{18} [K_{inf} of poly-cell depending on burnup depth for variants B_1, B_{15} - B_{18}]

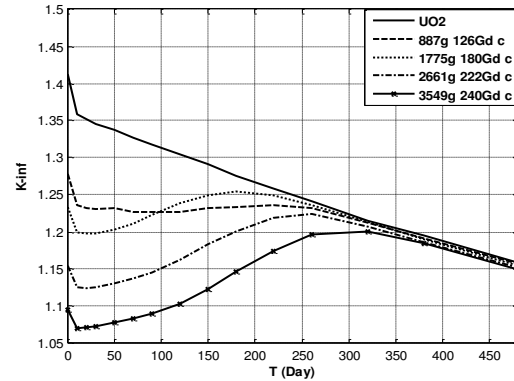


Рисунок 11б – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ ТВС в первой кампании для вариантов B_1, B_{15} - B_{18} [K_{inf} of FA in first campaign depending on burnup depth for variants B_1, B_{15} - B_{18}]

Сравнивая результаты на рисунках 10а и 10б с аналогичными на рисунках 7а и 7б, можно отметить практически полное совпадение. Во-первых, во всех рассматриваемых вариантах можно выделить большой интервал кампании, для которого величина коэффициента размножения слабо меняется с выгоранием. Во-вторых, с увеличением числа твэгов и одновременном повышении количества ВП в них, возрастает интервал слабого изменения коэффициента размножения полячейки и снижается значение этой величины. Тем самым снижается и остаточный запас реактивности на жидкостную систему компенсации, но с небольшой потерей в выгорании топлива. Необходимо отметить, что для получения таких результатов при гетерогенном размещении ВП требуется выделять существенно большее число твэгов. Для снижения общего числа твэгов в ТВС можно осуществить смешанное размещение ВП в них (варианты B_{19} и B_{20}). Результаты расчетов представлены на рисунках 12 и 13.

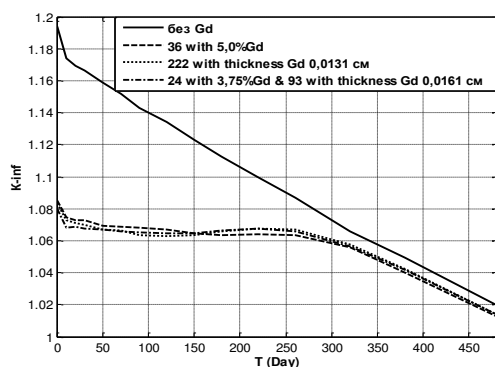


Рисунок 12 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ полячейки для вариантов B_1, B_9, B_{17} и B_{19} [K_{inf} of poly-cell depending on burnup depth for variants B_1, B_9, B_{17} и B_{19}]

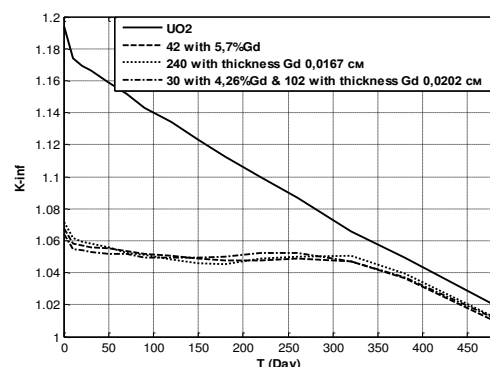


Рисунок 13 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ полячейки для вариантов B_1, B_{10}, B_{18} и B_{20} [K_{inf} of poly-cell depending on burnup depth for variants B_1, B_{10}, B_{18} и B_{20}]

Совместное использование гомогенного (ГВП) и гетерогенного (ГТВП) ВП приводит к наибольшей компенсации реактивности в начале кампании. В таблице 2 представлено $\Delta K_{\text{инф. макс.}}$ и $\Delta K_{\text{(конец кампании)}}$ для вариантов В₉, В₁₀, В₁₇, В₁₈, В₁₉ и В₂₀.

Таблица 2 – $\Delta K_{\text{инф. макс.}}$ и $\Delta K_{\text{инф (в конце кампании)}}$ для вариантов В₉, В₁₀, В₁₇, В₁₈, В₁₉ и В₂₀ [$\Delta K_{\text{inf. макс.}}$ и $\Delta K_{\text{inf in the end of campaign}}$ for variants В₉, В₁₀, В₁₇, В₁₈, В₁₉ и В₂₀]

Масса ВП (кг/ТВС)	2,65			3,55		
	ГВП	ГТВП	ГВП и ГТВП	ГВП	ГТВП	ГВП и ГТВП
Размещение ВП в ТВС						
$\Delta K_{\text{инф. макс.}}$	0,109	0,111	0,125	0,126	0,122	0,130
$\Delta K_{\text{(в конце кампании)}}$	0,008	0,006	0,006	0,010	0,008	0,008

Из таблицы 2 видно, что использование гомогенного (ГВП) и гетерогенного (ГТВП) размещение ВП приводит к снижению $K_{\text{инф. макс}}$ так и $K_{\text{(конец кампании)}}$, что означает существенное снижение применения жидкостной системы компенсации избыточной реактивности. В таблице 3 представлено $\Delta K_{\text{инф. макс.}}$ и $\Delta K_{\text{(конец кампании)}}$ для вариантов В₃, В₈, В₁₅ В₁₆.

Таблица 3 – $\Delta K_{\text{инф. макс.}}$ и $\Delta K_{\text{инф (в конце кампании)}}$ для варианты В₃, В₈, В₁₅ В₁₆ [$\Delta K_{\text{inf. макс.}}$ и $\Delta K_{\text{inf in the end of campaign}}$ for variants В₃, В₈, В₁₅ В₁₆]

Масса ВП (кг)	0,88	0,89	1,76	1,78
Размещение ВП в ТВС	ГВП	ГТВП	ГВП	ГТВП
$\Delta K_{\text{инф. макс.}}$	0,068	0,063	0,089	0,089
$\Delta K_{\text{(в конце кампании)}}$	0,003	0,001	0,005	0,004

Выводы

В данной работе анализировалось влияние размещения ВП, число твэгов в ТВС и концентрации Gd в каждом твэге на коэффициент размножения нейтронов в полячейке для реактора ВВЭР с удлинёнными кампаниями. Снижение коэффициента размножения нейтронов уменьшает запас реактивности на компенсацию жидкостной системой. В результате резко снижается концентрация бора в теплоносителе, что благотворно сказывается на плотностном коэффициенте реактивности.

Результаты расчетов показывают, что снижение коэффициента размножения нейтронов происходит как за счет увеличения количества ВП в твэге, так и за счет увеличения числа твэгов. При этом, в течение большого интервала времени первой кампании сам коэффициент размножения нейтронов не меняется в процессе выгорания топлива. Это связано с тем фактом, что снижение реактивности реакторов в процессе выгорания топлива компенсируется ростом реактивности за счет выгорания ВП. В результате упрощается регулирование реактора оперативной системы органов регулирования.

Оказалось, что одинаковых результатов можно получить как с помощью ГВП, так и с помощью ГТВП, но ГВП требует для получения того же результата существенно меньшего числа твэгов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Burnable Absorbers – Burnable Poisons. URL: [tps://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/burnable-absorbers-burnable-poisons/](https://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/burnable-absorbers-burnable-poisons/) (accessed 21.01.2018).
2. Galperin A, Segev M, Radkowsky. A. Substitution of the Soluble Boron Reactivity Control System of a Pressurized Water Reactor by Gadolinium Burnable Poisons. Nucl. Technol., 75 (1986), P. 127-133. Published online: 10 May 2017. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.13182/NT86-A33855>.
3. Fiorini G. L, Gautier G. M, Bergamaschi Y. Feasibility Studies of a Soluble Boron-Free 900-MW (electric) PWR, Safety Systems: Consequences of the Partial or Total Elimination of Soluble Boron

- on Plant Safety and Plant Systems Architecture. Nucl. Technol., 127 (1999), pp. 239-258. Published online: 10 May 2017. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.13182/NT99-A2999>.
4. Jones R.C. Boron Dilution Reactivity Transients: A Regulatory Perspective. Proceedings of the OECD/NEA/CSNI Specialist Meeting on Boron Dilution Reactivity Transients, State College (PA), Oct 18–20 (1995). URL : https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:43012298.
 5. Стогов, Ю. В. Перспективные технологии использования оксидного уран-гадолиниевого топлива в легководных реакторах / Ю. В. Стогов, Н. И. Белоусов, В. И. Савандер [и др.] // Материалы XIV семинара по проблемам физики реакторов. – Москва : МИФИ, 2006. – С. 45-47.
 6. Balestieri D. A. STUDY OF UO_2/Gd_2O_3 CJMPOSITE FUEL. IAEA-TECDOC-1036. Vienna (Austria).1998. P. 63-72.
 7. Ермолин, В. С. О размещении гадолиния в центральном отверстии твэлов водо-водяных реакторов / В. С. Ермолин, В. С. Окунев // Физика-технические проблемы ядерной энергетики. – Научная сессия МИФИ-2008. – С. 101-102.
 8. Бергельсон, Б. П. Глубина выгорания ядерного топлива ВВЭР с разными поглотителями / Б. П. Бергельсон [и др.] // Атомная энергия. – Т. 109, Вып. 4. – Октябрь, 2010. – С. 240-245.
 9. Абдельгафар Галахом, А. Исследование возможности использования сплава европия и Пирекса в качестве выгорающего поглотителя в PWR / А. Абдельгафар Галахом // Анналы атомной энергетики. – Т. 110. – Декабрь, 2017. – С. 1127-1133.
 10. Андрушенко, С. А. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 / С. А. Андрушенко [и др]. – Москва : Логос, 2010. – 604 с.
 11. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. – URL : <https://www.seogan.ru/np-082-07-pravila-yadernoiy-bezopasnosti-reaktornix-ustanovok-atomnix-stanciiy.html> (дата обращения: 16.4.2019).
 12. Varley F. Sears. Neutron scattering lengths and cross sections. Neutron News, Vol. 3, No. 3, 1992, pp. 26-37. Published online: 19 Aug 2006. Published online: 19 Aug 2006.
 13. Leppänen J. Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. VTT Technical Research Centre of Finland. (June 18, 2015).
 14. Chadwick M.B. et al. ENDF/B-VII.1 nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data. Nucl. Data Sheets, 112 (2011), P. 2887-2996, 10.1016/j.nds.2011.11.002.

REFERENCES

- [1] Burnable Absorbers – Burnable Poisons. URL: [tps://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/burnable-absorbers-burnable-poisons/](https://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/burnable-absorbers-burnable-poisons/) (accessed 21.01.2018).
- [2] Galperin A, Segev M, Radkowsky. A. Substitution of the Soluble Boron Reactivity Control System of a Pressurized Water Reactor by Gadolinium Burnable Poisons. Nucl. Technol., 75 (1986), P. 127-133. Published online: 10 May 2017.
- [3] Fiorini G. L, Gautier G. M, Bergamaschi Y. Feasibility Studies of a Soluble Boron-Free 900-MW (electric) PWR, Safety Systems: Consequences of the Partial or Total Elimination of Soluble Boron on Plant Safety and Plant Systems Architecture. Nucl. Technol., 127 (1999), pp. 239-258. Published online: 10 May 2017.
- [4] Jones R.C. Boron Dilution Reactivity Transients: A Regulatory Perspective Proceedings of the OECD/NEA/CSNI Specialist Meeting on Boron Dilution Reactivity Transients, State College (PA), Oct 18–20 (1995).
- [5] Stogov Yu.V., Belousov N.I. Savander V.I. et al. Perspektivny`e tehnologii ispol`zovaniya oksidnogo uran-gadolinievogo topliva v legkovodny`x reaktorax [Promising Technologies for the Use of Uranium-Gadolinium Oxide Fuel in Light-Water Reactors]. Materialy` XIV seminar po problemam fiziki reaktorov [Proceedings of the XIV Seminar on Reactor Physics]. Moscow: MEFPhI. 2006. P. 45-47 (in Russian).
- [6] Balestieri D. A STUDY OF UO_2/Gd_2O_3 CJMPOSITE FUEL. IAEA-TECDOC-1036. Vienna (Austria).1998. P. 63-72.
- [7] Ermolin V.S., Orunev V.S. O razmeshhenii gadoliniya v central`nom otverstii tve`lov vodovodyany`x reaktorov [Placement of Gadolinium in the Central Opening of Water-Water Reactor Fuel Rods]. Fiziko-texnicheskie problemy` yadernoj e`nergeti [Physical and Technical Problems of Nuclear Power Engineering]. Nauchnaya sessiya MIFI [Scientific Session of MEFPhI]. 2008. P. 101-102 (in Russian).
- [8] Bergelson B., Belonog V., Gerasimov A. et al. Glubina vy`goraniya yadernogo topliva VVE`R s razny`mi poglotitelyami [Depth of Burn-Up of VVER Nuclear Fuel with Different Absorbers].

- Atomnaya e`nergiya [Atomic Energy]. V. 109 Vol. 4 October 2010. P. 240-245 (in Russian).
- [9] Abdelghafar Galahom A. Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya splava evropiya i Pireksa v kachestve szhigaemogo poglotitelya v PWR [Study of Possibility of Europium and Pyrex Alloy Using as Burnable Absorber in PWR]. Annaly` yadernoj e`nergii [Annals of Nuclear Energy]. Volume 110. December 2017. P. 1127-1133 (in Russian).
- [10] Andrushenko S. A., Afrov A. M., Vasil'ev B. Yu., Generalov V. N., Kosourov, K. B., Yu. M. Semchenkov, V. F. Ukraintsev NPP. IEC c reaktorm tepa VVER-1000 [NPP with the Reactor WWER-1000]. Moscow: Logo, 2010. ISBN 978-5-98704-4 (in Russian).
- [11] Rules of Nuclear Safety of Nuclear Power Plants. URL: <https://www.seogan.ru/np-082-07-pravila-yadernoiy-bezopasnosti-reaktornix-ustanovok-atomnix-stanciiy.html>. (Accessed 16.4.2019). (in Russian).
- [12] Varley F. Sears. Neutron Scattering Lengths and Cross Sections. Neutron News, Vol. 3, No. 3, 1992, pp. 26-37. Published online: 19 Aug 2006.
- [13] Leppänen J. SERPENT – a Continuous-Energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation. Code. VTT Technical Research Centre of Finland. (June 18, 2015).
- [14] Chadwick M.B. et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data. Nucl. Data Sheets, 112 (2011), P. 2887-2996, 10.1016/j.nds.2011.11.002.

Decrease the Volume of Boric Regulation of the Reactivity when Using the Burnable Absorber on the Basis of (GD2O3) in the Fuel Reactor WWER-1200

M.A. Abu Sodos¹, V.M. Demin², V.I. Savander³

Institute of Nuclear Physics and Technology (INP&T), National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409

¹ORCID iD: 0000-0003-3954-151X

Wos Researher ID: Abu Sodos Mahmoud Abdelrahman

e-mail: MAbusodos@mephi.ru

²ORCID iD: 0000-0003-3894-9396

Wos Researher ID: Demin Victor Makcemovich

e-mail: VMDemin@mephi.ru

³ORCID iD: 0000-0001-9309-5616

Wos Researher ID: Savander Vladimir Igorovech

e-mail: VISavander@mephi.ru

Abstract – The paper considers various schemes of placement of the burnable absorbers (BAs) in the system of compensation of excess reactivity in the reactor of WWER type at the extended campaigns for the purpose of decrease in the maximum concentration of the boron absorber. On the basis of the variant optimization the influence of the method of placing the burnable absorber in the fuel rods (homogeneous and heterogeneous) and the amount of the placed burnable absorbers in them on the maximum value of the reactivity reserve compensated by the boron control system are analyzed.

Keywords: Burnable absorber (BAs), homogeneous (HBA) and heterogeneous (NHBA) burnable absorber, Serpent, VVER, fuel assemblies (FA), poly-cell, the maximum concentration of boric acid, the liquid system of regulation, excess reactivity, neutron multiplication factor (K_{∞}).