
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.544.8

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-06>

EDN TIPH XV

Оригинальная статья / Original paper



**Обоснование перехода на эрбиевое топливо в реакторах типа ВВЭР-1000
на основе сравнительного анализа коэффициентов реактивности для
гадолиниевого и эрбиевого выгорающих поглотителей**

А.Р. Музафаров  , В.И. Савандер 

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация
 anvar1996@yandex.ru

Аннотация. В работе приведены результаты нейтронно-физического обоснования замены выгорающего поглотителя гадолиния, размещаемого в небольшом числе твэлов (твэгов), на эрбий, размещаемый во всех твэлах ТВС. Для гадолиниевого поглотителя выбрана схема размещения твэгов, моделирующая их реальное расположение в ТВС с максимальной концентрацией гадолиния в твэгах (8 %). В выбранной схеме твэг, расположенный в центре, симметрично окружен двумя рядами твэлов, с общим их количеством 18 штук. При выборе весового содержания эрбия в твэлах принимается во внимание не только общий компенсируемый запас реактивности за кампанию, но и внутренне присущие свойства безопасности, такие, как плотностной и полный температурный коэффициенты реактивности по теплоносителю топливной загрузки, что позволяет уменьшить негативное влияние эрбия на выгорание выгружаемого топлива. К тому же однородное расположение эрбия в твэлах приводит к равномерному распределению энерговыделения по сравнению с гадолиниевым поглотителем. Сравнительный анализ нейтронно-физических характеристик реактора для рассматриваемых поглотителей ведется на элементарных ячейках и полиячейках с учетом упрощенных моделей выгорания при частичных перегрузках без перестановок ТВС. При условии применения трехкратной частичной перегрузки топлива в активной зоне образуются повторяющиеся структуры, состоящие из 3 ТВС с различными длительностями облучения. Полученные результаты наглядно демонстрируют что при условии равной компенсации избыточной реактивности коэффициенты реактивности для эрбиевого поглотителя имеют более высокие значения чем для гадолиниевого варианта. С учетом этого фактора можно подобрать такое весовое содержание эрбия в твэлах, при котором потери в выгорании будут незначительны.

Ключевые слова: Гадолиний, эрбий, плотностной коэффициент реактивности, Serpent, полный температурный коэффициент реактивности, ВВЭР, коэффициент размножения, избыточная реактивность, твэл, борный поглотитель.

Для цитирования: Музафаров А.Р., Савандер В.И. Обоснование перехода на эрбиевое топливо в реакторах типа ВВЭР-1000 на основе сравнительного анализа коэффициентов реактивности для гадолиниевого и эрбиевого выгорающих поглотителей. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(3):62–72. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-06>

For citation: Muzafarov A.R., Savander V.I. Justification of the transition to erbium fuel in VVER-1000 type reactors based on a comparative analysis of reactivity coefficients for gadolinium and erbium burnable absorbers. *Global nuclear safety*. 2024;14(3):62–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-06>

Justification of the transition to erbium fuel in VVER-1000 type reactors based on a comparative analysis of reactivity coefficients for gadolinium and erbium burnable absorbers

A.R. Muzafarov  , V.I. Savander 

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia Federation

 anvar1996@yandex.ru

Abstract. The paper presents the neutron-physical justification of replacement of the burn-up gadolinium absorber placed in a small number of fuel elements by erbium placed in all fuel elements of the fuel assembly. A scheme of fuel elements placement is chosen for the gadolinium absorber, modeling their real arrangement in fuel assemblies with maximum concentration of gadolinium in fuel elements (8%). In the selected scheme the center fuel element is symmetrically surrounded by two rows of fuel elements with the total number of fuel elements of 18. When selecting the weight content of erbium in fuel elements not only the total compensated reactivity reserve for the campaign is taken into account but also intrinsic safety properties such as the density and total temperature coefficients of reactivity on the fuel loading coolant which allows reducing the negative influence of erbium on the burnup of unloaded fuel. In addition, the erbium homogeneous arrangement in fuel elements leads to a uniform distribution of energy release in comparison with the gadolinium absorber. The comparative analysis of neutron-physical characteristics of the reactor is carried out for the considered absorbers on unit cells and polycells taking into account simplified burnup models at partial reloads without fuel assemblies rearrangements. Repetitive structures consisting of 3 fuel assemblies with different irradiation durations are formed under the condition of application of threefold partial fuel reloading in the core. The obtained results clearly demonstrate that the reactivity coefficients for the erbium absorber have higher values than for the gadolinium variant under the condition of equal compensation of excess reactivity. Taking this factor into account, it is possible to select such a weight content of erbium in fuel elements when losses in burnup will be insignificant.

Keywords: Gadolinium, erbium, density coefficient of reactivity, Serpent, total temperature coefficient of reactivity, VVER, multiplication coefficient, excess reactivity, fuel element, boron absorber.

Введение

В настоящее время для повышения экономической эффективности АЭС с реакторами типа ВВЭР осуществляются кампании длительностью 1,5 года. В перспективе рассматривается переход и на двухгодичные кампании. Применение удлиненных кампаний приводит к увеличению запаса реактивности реактора, который необходимо компенсировать как с помощью жидкостной системы, так и с применением выгорающих поглотителей, интегрированных в топливную матрицу [1–2].

Жидкостная система компенсации, основанная на растворении борного поглотителя в теплоносителе, является регулируемой и в силу гомогенного размещения поглотителя по всей активной зоне не вызывает локальных возмущений в распределении потока тепловых нейтронов и энерговыделения. Эти факторы жидкостной системы компенсации избыточной реактивности обеспечивают

критичность реактора в течение всей кампании, практически полное отсутствие борного поглотителя в конце кампании поэтому жидкостное регулирование не влияет на выгорание выгружаемого топлива, которое определяется заданным запасом реактивности на всю кампанию.

Однако наличие в теплоносителе дополнительного поглотителя негативно влияет на плотностной коэффициент реактивности, что накладывает ограничение на предельную концентрацию борного поглотителя в теплоносителе. Поэтому для реализации удлиненных кампаний необходимо использовать выгорающие поглотители, интегрированные в топливную матрицу [3–5].

В реакторах типа ВВЭР для этой цели используется гадолиний в виде оксидного соединения Gd_2O_3 . Основным достоинством этого поглотителя является то, что он полностью выгорает в топливе за одну кампанию. Микросечения радиационного захвата

нейтронов двумя изотопами гадолиния Gd^{155} и Gd^{157} на несколько порядков больше, чем у основного делящегося изотопа U^{235} , поэтому гадолиний размещают в небольшом числе ТВЭгов так, чтобы обеспечить сильную блокировку потока тепловых нейтронов внутри ТВЭга, но при этом частично снижается поток тепловых нейтронов и в окружающих его ТВЭлах. В результате возникает неравномерное распределение энерговыделения по ТВС, характеризуемое небольшим коэффициентом неравномерности. В результате общий коэффициент неравномерности по радиусу активной зоны по сравнению с гомогенным поглотителем (жидкостное регулирование) повышается. Для его компенсации потребуется увеличить количество свежих ТВС, загружаемых в периферийную область активной зоны, что слегка понизит среднее выгорание выгружаемого топлива [6–9].

Если применять слабый поглотитель, как, например, эрбий, то его можно разместить во всех ТВЭлах, создавая гомогенно размещенный поглотитель, который не создает неравномерности энерговыделения по ТВС. Однако слабый поглотитель не полностью выгорает в топливе, так что его остаточное количество отбирает часть полного запаса реактивности, снижая выгорание выгружаемого топлива. Потеря в выгорании тем больше, чем выше содержание эрбиевого поглотителя в топливе подпитки [10–12].

Таким образом и гадолиний, и эрбий приводят к некоторой потере в среднем выгорании выгружаемого топлива по сравнению с жидкостной системой компенсации избыточной реактивности. Количество выгорающего поглотителя, размещаемого в ТВЭлах и ТВЭгах, определяется той долей от полного запаса реактивности, которая остается после применения жидкостной системы с максимальной допустимой концентрацией борного поглотителя в теплоносителе. Сама максимальная концентрация борного поглотителя определяется величиной плотностного и полного температурного коэффициентов реактивности [13–16].

Для обоснования использования эрбия в качестве выгорающего поглотителя в реакторах типа ВВЭР необходимо сопоставить

их параметры внутренне присущих свойств безопасности, а именно, плотностной и полный температурный коэффициенты реактивности, учитывая влияние на эти коэффициенты реактивности концентрации борного поглотителя в теплоносителе.

Постановка задачи

Рассмотрим влияние борного поглотителя, растворенного в теплоносителе, на коэффициенты реактивности при наличии в топливе выгорающего поглотителя, в качестве которых рассмотрим природный гадолиний и природный эрбий. Наличие борного поглотителя в теплоносителе, который предназначен выполнять роль компенсатора избыточной реактивности в процессе выгорания, оказывает негативное воздействие на величину и знак плотностного коэффициента реактивности.

Отметим тот факт, что в конце топливной кампании, выгружаемые ТВС, содержащие ТВЭги, не содержат выгорающего поглотителя, а теплоноситель не содержит борного поглотителя. Таким образом, выгоревшие ТВС представляют из себя элементарные уран водные ячейки. Поэтому в качестве реперных значений для коэффициентов реактивности их значения для чисто уран-водной ячейки, при этом теплофизические параметры теплоносителя и топлива примем такими же, как и для реактора ВВЭР-1000. Будем рассматривать замкнутую критическую ячейку, для которой $K_{эф} = K_{\infty} = 1$. Для этого необходимо подобрать обогащение топлива, обеспечивающее критичность. Полученные коэффициенты реактивности по плотности и температуре теплоносителя примем за эталонные. В дальнейшем будем рассматривать элементарные ячейки и полиячейки, содержащие как борный поглотитель, так и выгорающие поглотители в топливе.

Рассмотрим влияние борного поглотителя, растворенного в теплоносителе, на коэффициенты реактивности при наличии в топливе выгорающих поглотителей, в качестве которых выбраны природный гадолиний и природный эрбий. Для варианта с эрбиевым поглотителем рассматривается та же самая элементарная ячейка, причем весовое содержание эрбия в топливе задается, а варьи-

руется содержание борного поглотителя в теплоносителе и подбирается обогащение топлива для поддержания критичности.

Расчетная модель для варианта с гадолинием имеет более сложную структуру. Рассматривается полячейка, в центре которой находится твэг, окруженный двумя слоями твэлов. Такая полячейка, содержащая два ряда твэлов вокруг твэга, общее количество которых составляет 18 твэлов, моделирует ТВС действующих реакторов ВВЭР, содержащую относительно малое число твэгов в ТВС (рис. 1). Содержание гадолиния в твэгах принята равной 8 % весовых по отношению к топливу. Обогащение топлива подбирается из условия критичности полячейки и одинаково для твэлов и твэгов. Для таких замкнутых полячек будем определять коэффициенты реактивности по плотности и температуре теплоносителя при различных содержаниях борного поглотителя в нем.

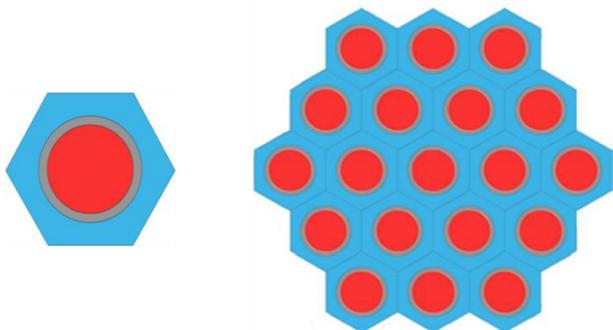


Рисунок 1. Элементарная ячейка и полячейка
Figure 1. Elementary cell and polycell

При анализе результатов необходимо отметить две основные физические величины, которые оказывают наибольшее влияние на плотностной коэффициент реактивности: это величина ϕ – вероятность избежать резонансного поглощения нейтронов в процессе замедления и величина θ – коэффициент использования тепловых нейтронов. Величина ϕ работает как положительная обратная связь, то есть при повышении плотности теплоносителя ϕ возрастает, а величина θ приводит к отрицательной обратной связи, то есть при повышении плотности θ уменьшается.

Наличие выгорающих поглотителей оказывает слабое влияние на величину ϕ и по-

этому главную роль играет изменение величины θ . При использовании гадолиния за счет сильного поглощения тепловых нейтронов происходит блокировка потока тепловых нейтронов в твэге и в ближнем ряду твэлов, так что величина θ уменьшается при большом содержании гадолиния в твэгах, а, следовательно, возрастает роль борного поглотителя за счет увеличения поглощения в теплоносителе. Отметим, что при концентрации борной кислоты в теплоносителе 1 г/кг макросечение поглощения В-10 в два раза больше, чем макросечение поглощения водорода в теплоносителе. Эрбий не блокирует поглощение тепловых нейтронов в твэлах, снижая роль поглощения в теплоносителе. Поэтому отрицательное воздействие повышения поглощения нейтронов, растворенном в воде борном поглотителе будет ниже в эрбиевом варианте, чем в гадолиниевом варианте.

Следовательно, можно ожидать, что плотностной коэффициент реактивности при использовании в качестве выгорающего поглотителя эрбия будет по амплитуде выше, чем при использовании гадолиния в твэгах. Кроме того, и спектральная составляющая полного температурного коэффициента реактивности по температуре теплоносителя для эрбия будет отрицательной, а по амплитуде выше, чем при использовании твэгов, поскольку изотоп эрбия Er-167 имеет резонанс при энергии 0,41 эВ. При повышении температуры нейтронного газа усредненное по спектру тепловых нейтронов микросечение поглощения гадолиния уменьшается, что также будет способствовать отрицательной величине спектральной составляющей и для гадолиния.

Методика для проведения расчетов

Оценка весового содержания эрбия при переходе на уран-эрбиевое топливо

В расчетах рассматривается ТВС реактора ВВЭР-1000 с обогащением топлива 4,9 %. При выборе весового содержания эрбия необходимо принять во внимание как величину запаса реактивности, компенсируемый гадолинием в действующих реакторах, так и потерю в удельной энерговыработке из-за неполного выгорания эрбия в топливе. Для

оценки запаса реактивности, компенсируемого выгорающими поглотителями, рассматриваются элементарная ячейка для вариантов с эрбием и поляйчейка для варианта с гадолинием. Основной вариант - это применение твэгов с содержанием гадолиния 8 %. Задавая концентрацию борной кислоты в теплоносителе подбираем такое обогащение топлива в твэлах и твэгах так, чтобы поляйчейка была критичной. Для полученного значения обогащения рассчитывается коэффициент размножения элементарной уран-водной ячейки и далее плотностной и полный температурный коэффициенты реактивности. Поскольку для замкнутой ячейки $K_{ЭФ} = K_{\infty}$, то запас реактивности, компенсируемый выгорающими поглотителями, вычисляется обычным путем (1):

$$\rho = \frac{K_{ЭФ} - 1}{K_{ЭФ}}. \quad (1)$$

Плотностной коэффициент реактивности, спектральная составляющая полного коэффициента реактивности и величина полного температурного коэффициента реактивности вычисляются с помощью обычных выражений (2), (3), (4):

$$\frac{\delta\rho}{\delta\gamma} = \frac{\Delta\rho}{\Delta\gamma} = \frac{1}{\Delta\gamma} \times \frac{(K_{\infty}(\gamma \pm \Delta\gamma) - 1)}{K_{\infty}(\gamma \pm \Delta\gamma)}, \quad (2)$$

$$\frac{\delta\rho}{\delta T} = \frac{\Delta\rho}{\Delta T} = \frac{1}{\Delta T} \times \frac{(K_{\infty}(T \pm \Delta T) - 1)}{K_{\infty}(T \pm \Delta T)}, \quad (3)$$

$$\frac{d\rho}{dT} = \frac{\delta\rho}{\delta T} + \frac{\delta\rho}{\delta\gamma} \times \frac{\delta\gamma}{\delta T}, \quad (4)$$

где $\delta\rho/\delta\gamma$, $\delta\rho/\delta T$ и $d\rho/dT$ – плотностной, спектральный и полный температурный коэффициент реактивности;

$\Delta\rho$ – приращение реактивности;

$\Delta\gamma$ – приращение плотности теплоносителя;

K_{∞} – коэффициент размножения нейтронов;

ΔT – приращение температуры теплоносителя;

$\delta\gamma/\delta T$ – теплофизический параметр;

Частичные перегрузки

При частичных перегрузках топлива с перестановками ТВС внутри активной зоны, как это имеет место в действующих реакторах типа ВВЭР, в активной зоне создается

сложная картограмма размещения ТВС с различными длительностями облучения. В этом случае понятие коэффициентов реактивности для всей активной зоны теряют свое значение. Рассмотрим упрощенную схему частичных перегрузок без перестановок. В этом случае в активной зоне образуются структуры из ТВС, типа поляйчек, состоящие из ТВС, отличающиеся числом кампаний в активной зоне. Будем считать, что активная зона состоит из таких поляйчек. Тогда анализ коэффициентов реактивности будем проводить, рассматривая одну замкнутую поляйчку. При трехкратной схеме перегрузки топлива поляйчейка будет состоять из трех ТВС, а именно – ТВС первой, второй и третьей кампании. Получается периодическая структура. Отметим важное обстоятельство для вариантов с использованием гадолиния – во всех ТВС после первой кампании отсутствует выгорающий поглотитель. Это важный фактор, который надо учитывать при расчете коэффициентов реактивности. Так как мы рассматриваем замкнутую поляйчку, то учет утечки нейтронов в реакторе осуществляется путем замены $K_{ЭФ}$ на K_{∞} . Если принять вероятность утечки равной 0,05, то условие критичности будет $K_{\infty}^{CRIT} = 1,05$. Предполагая, что в конце кампании $K_{\infty}^{POLY} = K_{\infty}^{CRIT}$, находим продолжительность кампании по условию (5):

$$K_{\infty}^{POLY}(t) = \frac{K_{\infty}^{TBC}(t) + K_{\infty}^{TBC}(T+t) + K_{\infty}^{TBC}(2T+t)}{3}, \quad (5)$$

где $K_{\infty}^{POLY}(t)$ – коэффициент размножения поляйчейки;

$K_{\infty}^{TBC}(t)$ – коэффициент размножения ТВС;

K_{∞}^{CRIT} – критическое значение коэффициента размножения;

$K_{\infty}^{ЯЧ}(t)$ – зависимость для ячейки периодичности в ТВС, то есть для слоеной цилиндрической ячейки.

Зная продолжительность кампании, находим концентрации нуклидов при этих шагах выгорания и создаем поляйчку, моделирующую активную зону при 3-х кратной перегрузке. Все расчеты проводились в прецизионном программном коде Serpent (2.1.32) с

использованием библиотеки ядерных данных ENDFb7 [17].

Анализ результатов исследования

Перед началом были проведены расчеты значений $K_{\infty}^{TBC}(t)$ с топливом без выгорающих поглотителей для моделей, представленных на рисунке 1. Полученные значения представлены на рисунке 2, причем все они практически совпадают. Это позволяет упростить расчеты, так как указанные ячейки моделируют значения коэффициента размножения ТВС.

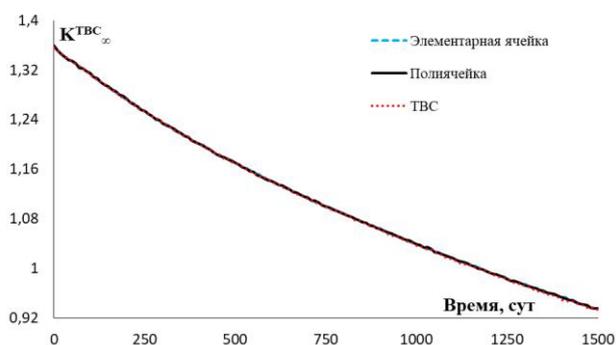


Рисунок 2. Зависимости $K_{\infty}^{TBC}(t)$ для различных моделей

Figure 2. Dependencies $K_{\infty}^{TBC}(t)$ for different models

На первом этапе производился расчет для элементарной ячейки и полячейки. Результаты для эрбия приведены для трех значений весового содержания: 1,1 %, 0,5 % и 0,2 %. Концентрации борной кислоты задавались от 2 г/кг до 8 г/кг с шагом 2 г/кг. Для каждого варианта подбирались обогащение топлива по U-235, при котором соответствующая ячейка или полячейка оказывались критическими. Именно по этому обогащению затем рассчитывался запас реактивности уран-водной ячейки и полячейки, который компенсируется с помощью выгорающих и борного поглотителей.

На рисунке 3 представлены изменения обогащения по урану 235 в элементарной ячейке и полячейке в зависимости от концентрации борной кислоты в теплоносителе.

При сопоставлении варианта с гадолинием с вариантами для эрбиевого топлива, можно отметить, что при содержании эрбия 0,5 % весовых эти зависимости примерно соответствуют друг другу. Следовательно, с точки зрения величины компенсируемой ре-

активности, для замены выгорающего поглотителя гадолиния на эрбиевое топливо весовое содержание эрбия можно принять в районе 0,5 весовых.

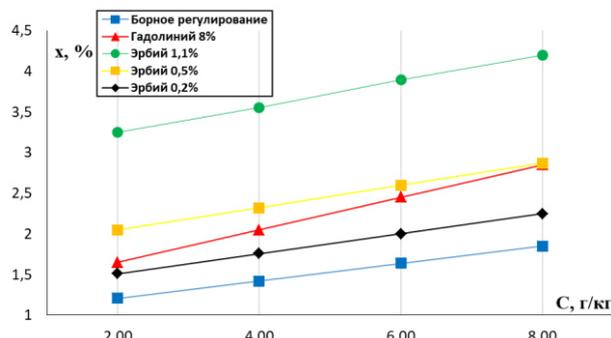


Рисунок 3. Зависимость обогащения по U-235 от концентрации борной кислоты

Figure 3. Dependence of U-235 enrichment on boric acid concentration

Результаты расчетов по коэффициентам реактивности приведены на рисунках 4 и 5, где показаны зависимости относительных значений плотностного и полного температурного коэффициентов реактивности по теплоносителю в зависимости от концентрации борного поглотителя для различного весового содержания эрбия в твэлах по указанной методике для элементарной ячейки и полячейки. Для сопоставления результатов приведены так же зависимости этих коэффициентов реактивности для варианта с гадолинием, весовое содержание которого принято равным 8 %. Все значения взяты по отношению к реперному варианту. Представленные в работе относительные данные имеют меньшую погрешность по сравнению с абсолютными, поскольку источник погрешности один и тот же.

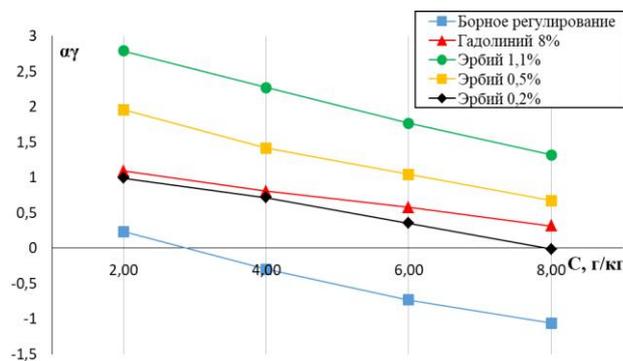


Рисунок 4. Плотностной коэффициент реактивности

Figure 4. Density coefficient of reactivity

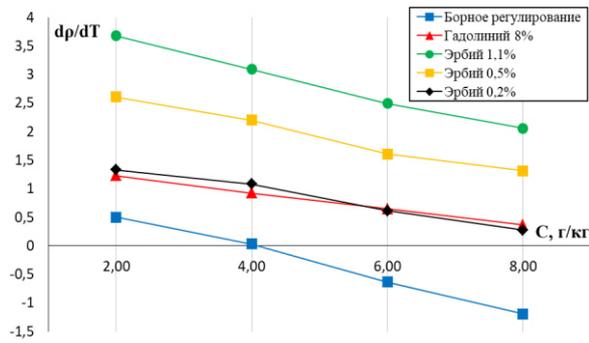


Рисунок 5. Полный температурный коэффициент реактивности

Figure 5. Full temperature coefficient of Reactivity

По представленным относительным значениям можно сделать следующие выводы. Во-первых, для обоих выгорающих поглотителей коэффициенты реактивности по плотности теплоносителя во всем диапазоне изменения содержания борного поглотителя имеют положительные значения, а полный температурный коэффициент реактивности

по температуре теплоносителя для всех вариантов имеет отрицательные значения.

Во-вторых, амплитудные значения коэффициентов реактивности для эрбиевого выгорающего поглотителя выше, чем для гадолиниевого, вплоть до весового содержания эрбия в 0,2 %, при котором они примерно одинаковы. Однако вариант 0,2 % эрбия компенсирует меньший запас реактивности в отличие от гадолиниевого варианта. Поэтому и на основании сравнения коэффициентов реактивности можно сделать вывод о требуемом содержании эрбия в ТВЭлах для замены выгорающего поглотителя гадолиния на эрбий, а именно 0,5 % весовых.

Для построения модели частичных перегрузок без перестановок при 3-х кратной перегрузке в случае с гадолинием был выполнен переход к модели активной зоны (рис. 6). При схеме расположения ТВЭгов 1:18 в ТВС будет находиться 16 ТВЭгов. Аналогичный переход из элементарной ячейки был выполнен для всех вариантов с эрбием.

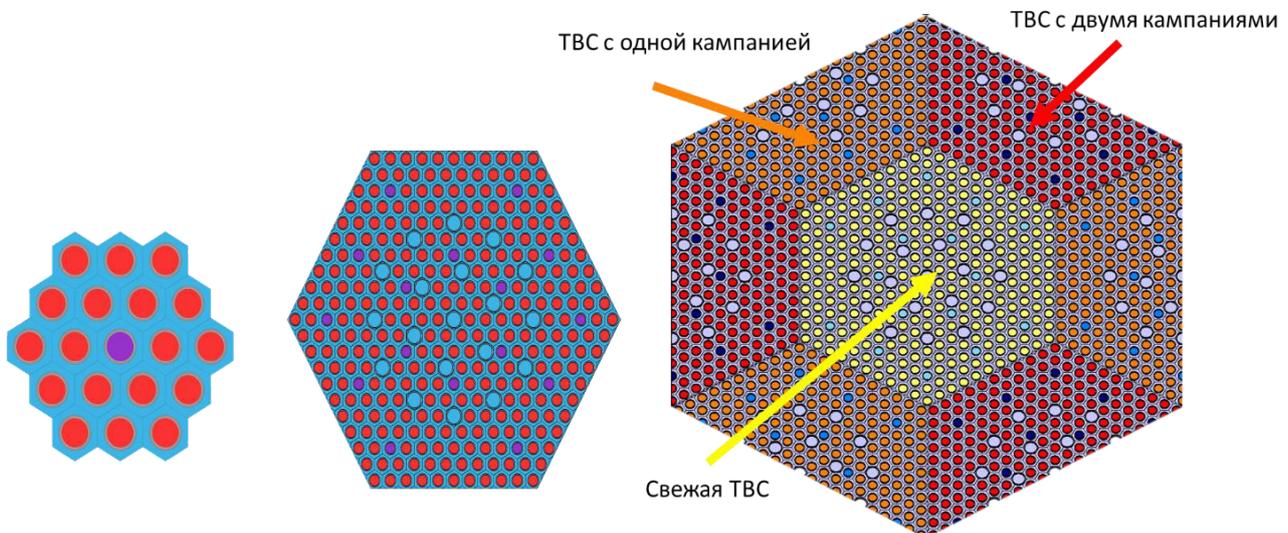


Рисунок 6. Переход с полячейки к модели активной зоны при 3-х кратной перегрузке
Figure 6. Transition from a polycell to a core model with 3-fold refueling

Для всех вариантов с выгорающими поглотителями была выполнена проверка изменения коэффициентов размножения за кампанию для трех моделей рисунках 7 и 8.

Значения коэффициентов размножения при одинаковых концентрациях совпадают для всех моделей. Это доказывает, что водотопливные соотношения моделей одинако-

вые и геометрические размеры рассчитаны правильно. Модель частичных перегрузок (см. рис. 6) собранная из ТВС с различным временем облучения моделирует активную зону реактора ВВЭР при 3-х кратной перегрузке. Согласно представленным графикам, варианты Gd 8 % и Er 0,5 % имеют равный запас на жидкостную систему компенсации.

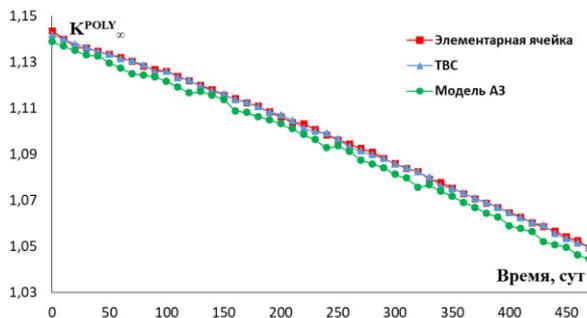


Рисунок 7. Зависимость $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для варианта эрбий 0,5%

Figure 7. Dependence $K_{\infty}^{POLY}(t)$ for the erbium 0,5% option

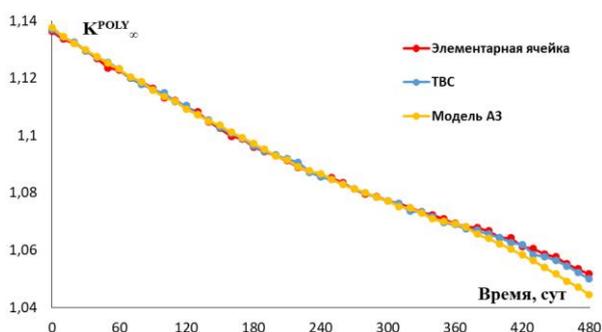


Рисунок 8. Зависимость $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для варианта гадолиний 8%

Figure 8. Dependence $K_{\infty}^{POLY}(t)$ for gadolinium 8% option

Далее для модели активной зоны, состоящей из периодической структуры из трех ТВС с различными длительностями кампании топлива, были рассчитаны коэффициенты реактивности и выгорание выгружаемого топлива для варианта с гадолинием и варианта с эрбием, содержание эрбия в топливе было выбрано 0,5 % весовых. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Относительные значения коэффициентов реактивности с использованием модели частичных перегрузок для всех исследуемых вариантов

Table 1. Relative values of reactivity coefficients using the partial overload model for all studied variants

№	Вариант	Плотностной	Полный температурный	Потери в выгорании
1	Er 1,1 %	1,34	1,42	12 %
2	Er 0,5 %	0,78	0,75	2 %
3	Er 0,2 %	0,13	0,15	-
4	Gd 8 %	0,56	0,53	-

Обсуждение полученных данных

При повышении весового содержания эрбия в ТВЭлах увеличивается доля компенсируемого избыточного запаса реактивности и снижается концентрация добавляемого борного поглотителя в теплоноситель для достижения критичности. К тому же, исходя из табличных значений, улучшаются значения коэффициентов реактивности. По этой причине максимальные значения достигнуты для варианта с весовым содержанием эрбия 1,1 %. Однако при этом увеличиваются потери в выгорании выгружаемого топлива.

В связи с тем, что варианты эрбий 0,5 % и гадолиний 8% имеют равный начальный запас, то для этих вариантов использовалась одинаковая концентрация борной кислоты. Данное условие позволяет оценить изменения параметров безопасности для эрбия и гадолиния при равном влиянии борного поглотителя в теплоносителе. В связи с большой блокировкой потока тепловых нейтронов в ТВЭге, вызванной большим весовым содержанием гадолиния, это приводит к увеличению поглощения на боре в теплоносителе и снижается значения плотностного коэффициента реактивности по сравнению с эрбием. В случае с эрбием однородное расположение не приводит к депрессии потока и как результат влияние поглощения на боре не играет существенной роли, как это происходит в варианте с гадолинием. Более высокие значения полного температурного коэффициента реактивности обусловлено резонансом эрбия-167 в тепловой области, как указывалось выше. При этом для варианта с эрбиевым поглотителем достигнуты пренебрежительно малые потери в выгорании 2%. Полученные расчетные значения для элементарных ячеек, полячек и модели частичных перегрузок полностью совпадают с предположениями, выдвинутыми ранее.

Заключение

В представленной работе анализировалась замена гадолиниевого поглотителя на уран-эрбиевое топливо при переходе на удлиненные топливные кампании при частичных перегрузках исходя из характеристик безопасности, точнее плотностного и

полного температурного коэффициентов реактивности. Расчеты были выполнены в два этапа, для элементарных ячеек и полиячеек на первом и на модели частичных перегрузок на втором этапе. При этом полученные данные для этих моделей хорошо совпадают между собой.

В широком диапазоне изменения содержания борного поглотителя в теплоносителе значения плотностного и полного температурного коэффициента реактивности для вариантов с эрбием в качестве выгорающего поглотителя имеют более высокие амплитудные значения, чем для варианта с гадолинием. Показана тенденция возрастания амплитудных значений указанных коэффициентов реактивности, по мере возрастания весового содержания эрбия в ТВЭлах. Для варианта с максимальным весовым содержанием гадолиния в ТВЭлах был подобран вариант с весовым содержанием эрбия, при котором компенсируется одинаковая избыточная реактивность без потерь в выгорании топлива с эрбием.

При этом исходя из полученных значений при трёхкратной перегрузке оптимальное весовое содержание эрбия будет находиться в пределах 0,2 % – 0,5 %, но ближе к 0,5 %. Учитывая, что весовое содержание берется

по отношению к топливу. При переходе на массовые единицы это примерно составит от 1,030 кг до 2,576 кг эрбия на одну ТВС. В этом случае не будет происходить проигрыш в выгорании и будут получены такие же коэффициенты реактивности, как в случае с гадолинием. При этом за счет снижения весового содержания поглотителя в топливе увеличится доля урана, что позволит увеличить энерговыработку. Последнее условие важно для создания запаса реактивности при переходе на двухгодичные топливные кампании. При изменении кратности, включая и дробные кратности, меняется запас реактивности, на одну кампанию, который и надо компенсировать в том числе и эрбием. С увеличением кратности запас реактивности падает, следовательно, весовая доля эрбия будет снижаться. И, наоборот, при снижении кратности запас реактивности растет. В той же пропорции будет расти и весовая доля эрбия в топливе. Однородное расположение эрбия не приведёт к неравномерности поля энерговыделения, избыточный запас реактивности на протяжении всей кампании будет снижаться. Заметим, что наш результат получен для упрощенной модели и результаты расчетов по программе БИПР могут слегка измениться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Савандер В.И., Альсассф С.Х. Анализ эффективности применения удлиненных кампаний на зарубежных АЭС с реактором типа ВВЭР. *Ядерная физика и инжиниринг*. 2019;10(1):5–8. <https://doi.org/10.1134/S2079562918040152>
2. Хащламунов Т.М., Выговский С.Б. Исследование возможности повышения экономичности использования топлива на АЭС с ВВЭР-1000 для 18-ти месячного топливного цикла. *Ядерная физика и инжиниринг*. 2018;9(2):107–116. <https://doi.org/10.1134/S2079562917060100>
3. Бергельсон Б.Р., Белоног В.В., Герасимов А.С., Тихомиров Г.В. Глубина выгорания ядерного топлива ВВЭР с разными поглотителями. *Атомная энергия*. 2010;109(4):194–197. Режим доступа: <http://ap.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1513> (дата обращения: 20.05.2024).
4. Bergelson B.R., Belonog V.V., Gerasimov A.S., Tikhomirov G.V. VVER nuclear fuel burnup with different absorbers. *Atomic energy*. 2011;109:240–245. <https://doi.org/10.1007/s10512-011-9351-2>
4. Музафаров А.Р., Савандер В.И. Использование выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР для снижения доли запаса реактивности, компенсируемого жидкостной системой при удлиненных кампаниях. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;2(43):42–54. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-02-05>
5. Khoshaval F., Foroutan Sh. Sh., Zolfaghari A., Minuchehr H. Evaluation of burnable absorber rods effect on neutronic performance in fuel assembly of WWER-1000 reactor. *Annals of nuclear energy*. 2016;87:648–658. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.10.012>
6. Музафаров А.Р., Савандер В.И. Использование выгорающих поглотителей для снижения водообмена при жидкостном регулировании в реакторах типа ВВЭР. *Атомная энергия*.

2023.134(5–6):216–221. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5300/0> (дата обращения: 01.06.2024).

Muzafarov A.R., Savander V.I. Use of burnable absorbers for reducing water exchange during the VVER liquid control. *Atomic energy*. 2023. 134:290–298. <https://doi.org/10.1007/s10512-024-01057-z>

7. Galperin A., Segev M., Radkowsky A. Substitution of the Soluble Boron Reactivity Control System of a Pressurized Water Reactor by Gadolinium Burnable Poisons. *Nuclear technology*. 1986;75(2):127–133. <https://doi.org/10.13182/NT86-A33855>

8. Hwanyeal Y., Mohd-Syukri Y., Yonghee K. A reduced boron ORP100 core based on the BigT burnable absorber. *Nuclear engineering and technology*. 2016;75:127–133. <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.12.010>

9. Абу Сондос М.А., Демин В.М., Савандер В.И. Снижение объема борного регулирования запаса реактивности при использовании выгорающего поглотителя на основе (GD₂O₃) в топливе реактора ВВЭР-1200. *Глобальная ядерная безопасность*. 2019;3(32):56–65. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qkvfcfe&ysclid=lylivnaec1851156176> (дата обращения: 10.06.2024).

Abu Sondos M.A., Demin V.M., Savander V.I. 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. *Global nuclear safety*. 2019;3(32):107–116. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qkvfcfe&ysclid=lylivnaec1851156176> (accessed: 10.06.2024).

10. Muzafarov A.R., Savander V.I. Use of Erbium as a Burnable Absorber in VVER-Type Reactors in a Closed Fuel Cycle. *Physics of atomic nuclei*. 2023;86(12):2569–2576. <https://doi.org/10.1134/S1063778823120049>

11. Альсасаф С.Х., Савандер В.И., Хассан А.А. Использование эрбия в качестве выгорающего поглотителя в реакторах типа ВВЭР при работе на удлиненных кампаниях. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2020;3:62–71. <https://doi.org/10.26583/npe.2020.3.06>

Alassaf S.H., Savander V.I., Hassan A.A. Use of erbium as a burnable absorber for the VVER reactor core life extension. *Nuclear energy and technology*. 2020;6(4):275–279. <https://doi.org/10.3897/nucet.6.60563>

12. Pavlovichev A., Kosourov E., Shcherenko A. [et al.] Use of erbium as burnable poison for VVER reactors. *Kerntechnik*. 2013;78(4):272–279. <https://doi.org/10.3139/124.110371>

13. Недобежкин А.С., Савандер В.И., Музафаров А.Р. Сравнительный анализ коэффициентов реактивности для гадолиниевого и эрбиевого выгорающего поглотителя при использовании на удлиненных кампаниях в реакторах типа ВВЭР. Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2024)». Обнинск, 2024. С. 43–44. https://www.ippe.ru/images/science_info/conference/neutron2024/thesis-nf-2024.pdf (дата обращения: 20.06.2024).

Nedobezhkin A.S., Savander V.I., Muzafarov A.R. Comparative analysis of reactivity coefficients for gadolinium and erbium burnable absorbers when used in extended campaigns in VVER reactors. Collection of abstracts of reports of the scientific and technical conference «Neutronic-physical problems of nuclear energy» (Neutronics-2024). Obninsk 2024. P. 43–44. (In Russ.). Available at: https://www.ippe.ru/images/science_info/conference/neutron2024/thesis-nf-2024.pdf (accessed: 20.06.2024).

14. Hafez N., Shahbunder H., Amin E., Elfiki S.A., Abdel-Latif A. Study on criticality and reactivity coefficients of VVER-1200 reactor. *Progress in Nuclear Energy*. 2021;131:1–16. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103594>

15. Зимин В.Г., Выговский С.Б., Семёнов А.А., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. Расчетный анализ экспериментов по определению коэффициентов реактивности на ВВЭР-1000 3-го блока Калининский АЭС с помощью программного комплекса ПРОСТОР. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов*. 2013;4:34–45. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21005029&ysclid=lyljewaier545937988> (дата обращения: 25.06.2024).

Zimin V.G., Vygovsky S.B., Semyonov A.A., Davidenko V.D., Tsubulsky V.F. Calculation analysis of experiments to determine reactivity coefficients at VVER-1000 unit 3 of the Kalinin NPP using the PROSTOR software package. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Fizika yadernykh reaktorov*. 2013;4:34–45. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21005029&ysclid=lyljewaier545937988> (accessed: 25.06.2024).

16. Faghihi F., Fadaie A.H., Sayareh R. Reactivity coefficients simulation of the Iranian VVER-1000 nuclear reactor using WIMS and CITATION codes. *Progress in nuclear energy*. 2007;49:68–78. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2006.09.003>

17. Leppänen J. Serpent – a Continuous – energy Monte Carlo reactor physics burnup calculation code. VTT Technical Research Centre of Finland. (June 18, 2015). Available at: https://serpent.vtt.fi/serpent/download/Serpent_manual.pdf (accessed: 30.06.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Савандер В.И. – постановка задачи, руководство научно-исследовательской работой и проверка результатов, редактирование текста статьи;

Музафаров А.Р. – анализ предметной области, проведение нейтронно-физических расчетов и обработка полученных данных согласно поставленной задаче.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Внешнее финансирование отсутствует.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Владимир Игоревич Савандер, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-9309-5616>

e-mail: visavander@mephi.ru

Анвар Рустамович Музафаров, аспирант кафедры теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-5292-2697>

e-mail: anvar1996@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.06.2024

После доработки 02.09.2024

Принята к публикации 05.09.2024

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Savander V.I. – setting the task, directing the research work and checking the results, editing the text of the article;

Muzafarov A.R. – analyzing the subject area, carrying out neutron-physical calculations and processing of the obtained data according to the set task.

FUNDING:

There is no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Vladimir I. Savander, Can. Sci. (Phys.& Math.), Senior Researcher, Associate Professor, Department of Theoretical and Experimental Physics of Nuclear Reactors, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-9309-5616>

e-mail: visavander@mephi.ru

Anvar R. Muzafarov, Postgraduate student, Department of Theoretical and Experimental Physics of Nuclear Reactors, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-5292-2697>

e-mail: anvar1996@yandex.ru

Received 14.06.2024

Revision 02.09.2024

Accepted 05.09.2024