

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭРБИЯ В КАЧЕСТВЕ ВЫГОРАЮЩЕГО ПОГЛОТИТЕЛЯ В РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР ПРИ РАБОТЕ НА УДЛИНЕННЫХ КАМПАНИЯХ

**С.Х. Альассаф, В.И. Савандер, А.А. Хассан**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
115409, Москва, Каширское шоссе, 31*



Представлены результаты расчетно-теоретического анализа, касающиеся применения эрбия в качестве выгорающего поглотителя в реакторах типа ВВЭР. Рассматриваются частичные перегрузки топлива с удлинёнными кампаниями (полтора – два года), причем для полугодовой кампании кратность перегрузки равна трём, а для двухгодичной – двум. Предполагается, что эрбий размещается во всех ТВЭлах ТВС с одинаковым весовым содержанием. Оценивалось влияние весового содержания эрбия на такие нейтронно-физические характеристики реактора и топлива, как выгорание, коэффициенты реактивности, остаточный объем «жидкостного» регулирования» и объемы образовавшихся жидких радиоактивных отходов (ЖРО).

Расчеты проводились по упрощенной модели перегрузок без перестановок ТВС. Рассматривалась бесконечная решетка полиячеек, состоящих из ТВС с разными временами пребывания в активной зоне. Учет утечки нейтронов из активной зоны осуществлялся выбором критического значения  $K_{\infty}$  в конце кампании.

Эрбий не полностью выгорает за кампанию, что сказывается на снижении выгорания топлива по сравнению с жидкостной системой компенсации избыточной реактивности. Снижение составляет 0.7% на 0.1% весовой загрузки эрбия в ТВЭлы. Однако при этом снижается и максимальное содержание борного поглотителя в теплоносителе, и накопление ЖРО в соотношении 5% на 0.1% весовой загрузки эрбия.

Эрбий влияет на спектральную составляющую температурного коэффициента реактивности по теплоносителю, которая оказывается отрицательной даже при малой весовой доле в ТВЭлах, а уменьшение доли борного поглотителя приводит к положительному значению плотностного коэффициента реактивности. В результате полный температурный коэффициент реактивности по теплоносителю имеет отрицательное значение в течение всей кампании.

**Ключевые слова:** ВВЭР, выгорающий поглотитель, эрбий, запас реактивности, GETERA, жидкостная система компенсации избыточной реактивности, жидкие радиоактивные отходы (ЖРО).

## ВВЕДЕНИЕ

Увеличение длительности кампании в реакторах с частичной перегрузкой топлива приводит к увеличению КИУМ и снижению удельных затрат на ядерно-опасные операции по перегрузке топлива, что в совокупности приводит к повышению экономической эффективности АЭС. Однако с увеличением длины кампании реактора пропорционально возрастает запас реактивности топливной загрузки, который необходимо компенсировать в течение всей кампании. Для этой цели в реакторах типа ВВЭР-1000 используется наряду с жидкостной системой, основанной на растворении в теплоносителе борного поглотителя, интегрированный в топливо выгорающий поглотитель на основе гадолиния. Если использовать только жидкостное регулирование, то при большом запасе реактивности плотностной коэффициент реактивности может стать отрицательным, а температурный коэффициент реактивности по теплоносителю – положительным. Поэтому необходимо снижать максимальную концентрацию борного поглотителя в теплоносителе за счет повышения доли запаса реактивности, компенсируемого с применением выгорающих поглотителей.

В российских реакторах типа ВВЭР наибольшее распространение получил сильный поглотитель тепловых нейтронов – природный гадолиний [1]. Его размещают в небольшом числе топливных элементов (ТВЭлах), но с относительно большой концентрацией, что создает сильную блокировку потока тепловых нейтронов в ТВЭлах. Концентрация гадолиния подбирается из условия, чтобы он полностью выгорел в топливе подпитки за первый цикл облучения. В этом случае он не влияет на среднее выгорание выгружаемого топлива, которое можно было бы получить в случае чисто жидкостной системы компенсации избыточной реактивности. В связи с тем, что ТВЭги снижают поток тепловых нейтронов в соседних с ними ТВЭлах, в ТВС будет возникать существенная неравномерность поля энерговыделения. Кроме того, обогащение топлива в ТВЭгах меньше чем в ТВЭлах, что при большом числе ТВЭгов приводит к снижению загрузки урана в активную зону. Не лишне отметить, что наличие гадолиния в ТВЭгах снижает коэффициент теплопроводности топлива.

Эти недостатки не возникают в случае применения относительно слабых поглотителей, которые можно размещать либо во всех ТВЭлах [2], либо в значительной их части, что равносильно применению гомогенного поглотителя по всей ТВС. При этом малые концентрации такого поглотителя в ТВЭлах не требуют применения пониженного обогащения и не влияют на теплопроводность топлива. В качестве такого поглотителя в России используется природный эрбий. Использование эрбия снимает проблему обеспечения ядерной безопасности при производстве и обращении со свежим топливом при повышении его обогащения выше 5% [3]. Особенностью эрбия как поглотителя тепловых нейтронов является то, что зависимость его микросечения поглощения в этой области энергий имеет резонанс при энергии  $E = 0.41$  эВ [4]. Эта особенность приводит к тому, что спектральная составляющая полного температурного коэффициента реактивности по теплоносителю будет иметь отрицательные значения, что обеспечивает отрицательное значение и полного температурного коэффициента даже при относительно небольших количествах эрбия в ТВЭлах. При использовании эрбия в ТВЭлах коэффициент теплопроводности топлива практически не изменяется. Однако изотопы эрбия не успевают выгореть за кампанию [5], в результате чего выгорание топлива будет зависеть от содержания эрбия в ТВЭлах.

В настоящее время в реакторах типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 освоена полутрагодичная кампания с длительностью 480 суток и дальнейшим повышением до 510 – 540 суток [6]. При обогащении топлива подпитки до 4.95% такая кампания достигается за счет применения смешанной перегрузки топлива, при которой одна часть ТВС эксплуатируется в активной зоне три кампании, а другая – только две. При этом значительно

повышается годовой расход природного урана. То же самое будет иметь место при внедрении двухгодичной кампании, но при этом возрастает и запас реактивности на выгорание. Для снижения расхода природного урана необходимо осуществлять кратные перегрузки, при которых все ТВС выдерживаются в активной зоне одинаковое число кампаний. Это достигается повышением начального обогащения топлива подпитки за уровень 5% [7]. В работе рассматривается именно такой вариант, причем для полугодовой кампании принимается трехкратная перегрузка топлива, а для двухгодичной – двукратная.

### РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ

В рамках упрощенной модели выгорания топлива при частичных перегрузках выполнена оценка влияния количества эрбиевого поглотителя, размещаемого в качестве выгорающего поглотителя во всех твэлах ТВС, на выгорание выгружаемого топлива, коэффициенты реактивности по плотности и температуре теплоносителя и объем жидкостной системы компенсации. Основное упрощение заключается в том, что рассматриваются перегрузки без перестановок ТВС в активной зоне.

Расчетные исследования выполнялись с помощью программы GETERA [8], которая позволяет определять пространственно-энергетическое распределение нейтронов в элементарных ячейках и в выделенных периодических фрагментах активной зоны на основе метода вероятности первых столкновений, а также изменение коэффициента размножения и изотопного состава топлива в процессе выгорания при частичных перегрузках топлива.

Модель для расчета основывалась на выделении периодической решетки полиячеек, состоящих из ТВС с различными временами облучения в активной зоне. Рассматриваются частичные перегрузки без перестановок [8] при средних значениях температуры теплоносителя и топлива.

В первую очередь рассматривалась задача об оценке влияния весовой доли эрбия в твэлах на выгорание выгружаемого топлива [9]. Весовое содержание двуокиси эрбия в твэлах варьировалось в интервале от 0.3 до 1.1% с интервалом 0.2% весовых. В качестве реперного варианта был взят вариант с жидкостной системой компенсации избыточной реактивности без использования выгорающих поглотителей. Далее проводился расчет выгорания выгружаемого топлива для всех вариантов с эрбиевым топливом и вычислялась относительная потеря в выгорании по отношению к реперному варианту  $(B_0 - B(x_{Er}))/B_0$ , где  $B_0$  – выгорание топлива без эрбия, а  $x_{Er}$  – весовое содержание эрбия в твэлах. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

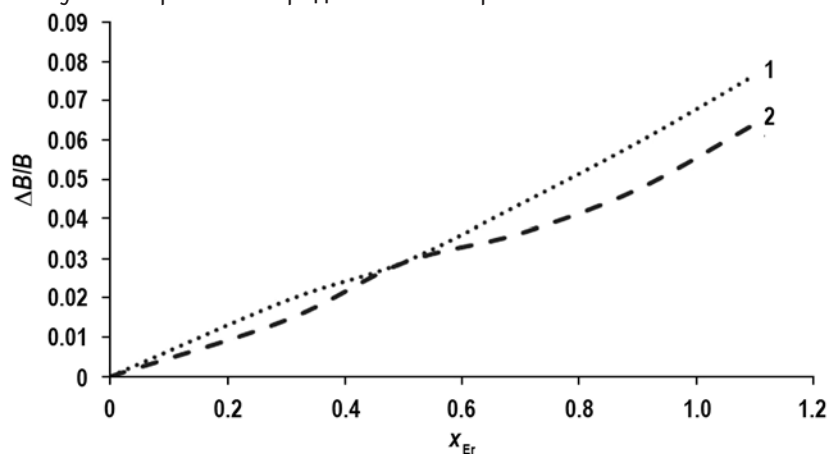


Рис. 1. Зависимость относительной величины проигрыша в выгорании топлива от содержания эрбия в твэлах: 1 – полугодовая кампания; 2 – двухгодичная кампания

При относительно небольших нагрузках двуокиси эрбия в твэлы вплоть до 1% зависимость потери в выгорании от содержания эрбия в твэлах имеет линейный характер и по величине существенно меньше, чем потери при переходе с годичной кампании на полутора- и двухгодичные кампании (10 – 20%).

Рассмотрим влияние эрбиевого поглотителя на полный температурный коэффициент реактивности по теплоносителю. Как известно, он состоит из двух слагаемых

$$\frac{d\rho}{dT_{th}} = \frac{\partial\rho}{\partial T_{th}}(\gamma_{th} = \text{const}) + \frac{\partial\rho}{\partial\gamma_{th}}(T_{th} = \text{const}) \frac{\partial\gamma_{th}}{\partial T_{th}}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – реактивность;  $T_{th}$  – температура теплоносителя;  $\gamma_{th}$  – плотность теплоносителя.

Первое слагаемое, которое обозначим как  $\alpha_m$ , есть спектральная составляющая, которая связана с изменением температуры нейтронного газа при изменении температуры замедлителя. Для неделящихся изотопов зависимость микросечения радиационного захвата от энергии в тепловой области меняется по закону  $1/V$ , так что при повышении температуры замедлителя усредненное по тепловому спектру микросечение будет снижаться. У делящихся изотопов в тепловой области спектра имеется резонанс ( $E = 0.3$  эВ), в результате чего усредненные сечения радиационного захвата и деления будут возрастать с повышением температуры замедлителя. В отсутствие эрбия этот коэффициент реактивности будет положительным. Но поскольку четные изотопы эрбия также имеют резонанс при энергии  $E = 0.41$  эВ, то суммарный эффект может быть отрицательным. Так что этот коэффициент, в основном, определяется концентрацией эрбия в топливе. Поэтому при наличии определенного количества эрбия в топливе это слагаемое будет иметь отрицательный знак.

Второе слагаемое, обозначаемое как  $\alpha_\gamma$ , есть плотностной коэффициент реактивности, который при использовании жидкостной системы компенсации избыточной реактивности в существенной степени определяется содержанием бора в теплоносителе. Чем выше концентрация бора в теплоносителе, тем меньше величина плотностного коэффициента реактивности. Расчет показал, что для чисто жидкостной системы компенсации избыточной реактивности для двухгодичной кампании эта величина в начале очередной кампании оказалась отрицательной. В результате для этого случая полный температурный коэффициент реактивности оказался положительным.

Поскольку в данной работе используется упрощенная модель частичных перегрузок топлива, то для расчетного анализа представлены относительные величины коэффициентов реактивности. В качестве нормировочных значений используются температурный коэффициент реактивности и его составляющие, отвечающие конечному состоянию реактора перед перегрузкой при использовании только жидкостной системы компенсации избыточной реактивности. В этом состоянии концентрация борного поглотителя равна нулю, и коэффициенты реактивности определяются только значением водотопливного отношения, которое во всех рассматриваемых вариантах одинаково. В частности, значения этих коэффициентов не зависят от кратности перегрузки.

Наибольшая концентрация борного поглотителя в активной зоне, как правило, достигается в начале очередной кампании. Эта величина была рассчитана для всех рассматриваемых вариантов. На рисунках 2, 3 представлено изменение коэффициента размножения полиаичейки от времени в течение всей кампании при различных нагрузках эрбия в топливе подпитки, из которых видно, что большого выбега реактивности при выгорании эрбия не наблюдается.

При вычислении коэффициентов реактивности в теплоноситель была добавлена такая концентрация борного поглотителя, которая обеспечивает критичность полиаичейки в начальный момент времени. После этого простым варьированием температуры тепло-

носителя и его плотности были определены спектральная и плотностная составляющие полного температурного коэффициента реактивности для всех рассматриваемых вариантов по длительности кампании и загрузки эрбия в твэлы. Относительные значения рассчитанных величин представлены на рис. 4 – 6.

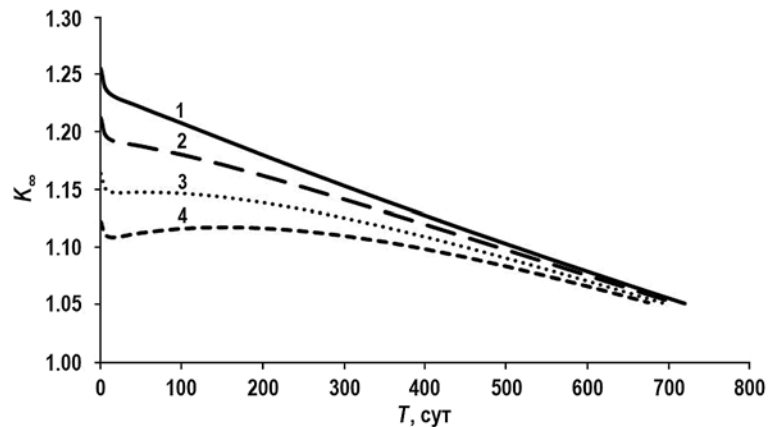


Рис. 2. Зависимость среднего по полячке коэффициента размножения от времени при различной загрузке эрбия в твэлы для двукратной перегрузки: 1 – Er 0%; 2 – Er 0.3%; 3 – Er 0.7%; 4 – 1.1%

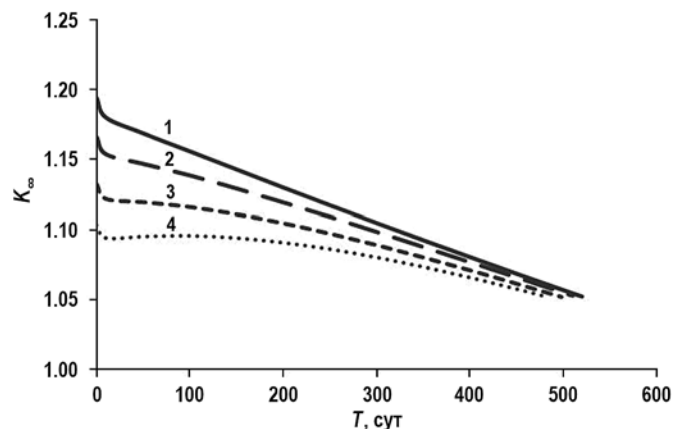


Рис. 3. Зависимость среднего по полячке коэффициента размножения от времени при различной загрузке эрбия в твэлы для трехкратной перегрузки: 1 – Er 0%; 2 – Er 0.3%; 3 – Er 0.7%; 4 – 1.1%

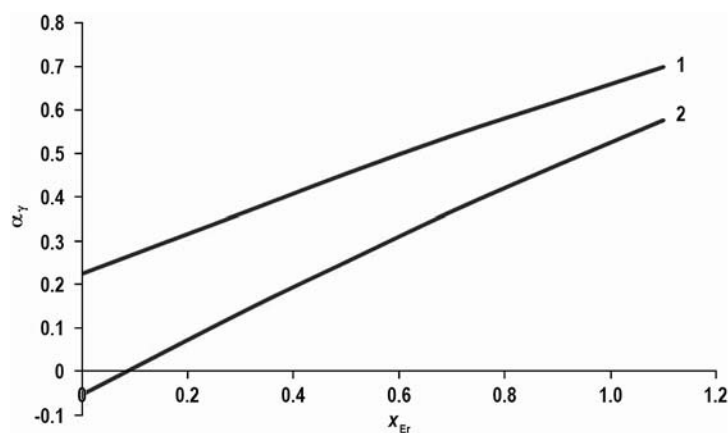


Рис. 4. Зависимость относительного значения плотностного коэффициента реактивности от загрузки эрбия в твэлы: 1 – полугодовая кампания, 2 – двухгодичная кампания

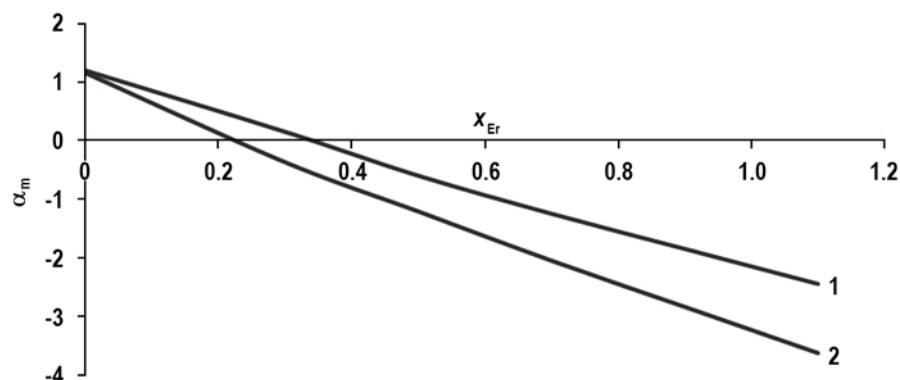


Рис. 5. Зависимость относительной величины спектральной составляющей температурного коэффициента реактивности от весовой доли эрбия в топливе: 1 – полугодовая кампания; 2 – двухгодичная кампания

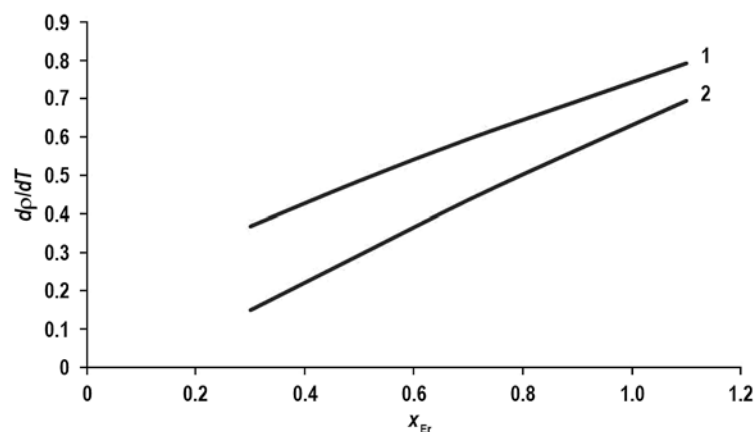


Рис. 6. Зависимость относительной величины полного температурного коэффициента реактивности для теплоносителя от весового содержания эрбия в топливе: 1 – полугодовая кампания; 2 – двухгодичная кампания

Результаты расчетных исследований соответствуют выводу о том, что повышение длительности кампании и увеличение начальной концентрации бора в теплоносителе отрицательно влияют на плотностной коэффициент реактивности, снижая его до отрицательных значений для двухгодичной кампании. При использовании эрбия начальная концентрация бора в теплоносителе снижается и плотностной коэффициент реактивности линейно возрастает, достигая существенно положительных значений (до 50 – 70% от его величины в чисто уран-водной системе), которая отвечает составу активной зоны в конце кампании [10].

Спектральная составляющая коэффициента реактивности уже при небольшом содержании эрбия в твэлах обеспечивает достижение отрицательных значений и линейно возрастает по модулю с ростом загрузки эрбия в твэлы, увеличиваясь по модулю в 2.5 – 3 раза, причем этот эффект зависит от длительности кампании.

Естественно, что полный температурный коэффициент реактивности по теплоносителю-замедлителю также линейно возрастает по модулю с повышением загрузки эрбия в твэлы, оставаясь отрицательным по знаку.

Большим недостатком жидкостной системы компенсации избыточной реактивности является накопление на АЭС значительных объемов низкоактивных ЖРО, возникающих в результате разбавления теплоносителя для поддержания критичности реактора. Всестороннее снижение объемов этих ЖРО является актуальной задачей совершенствования реакторов типа ВВЭР [6]. В принципе, чем выше концентрация эрбиевого поглотителя в твэлах, тем ниже начальная концентрация борного поглотителя, следовательно, будет

снижаться и объем ЖРО.

Физическая особенность жидкостной системы регулирования запаса реактивности заключается в том, что поглотитель растворен в теплоносителе, а теплоноситель циркулирует по первому контуру. В результате огромную часть времени борный поглотитель проводит вне активной зоны. Поэтому скорость выгорания этого поглотителя существенно ниже скорости выгорания топлива в активной зоне, и регулирование сводится к снижению количества борного поглотителя в теплоносителе путем его разбавления дистиллированным теплоносителем.

Для оценки снижения объемов ЖРО был выполнен расчет требуемой для критичности концентрации бора в теплоносителе в течение всей кампании. На основании этих данных можно оценить объем ЖРО, поскольку их количество равно количеству введенного в контур дистиллята. Предположим, что в момент времени  $t$  концентрация бора в теплоносителе была  $C_B(t)$ , а к моменту времени  $t + \Delta t$  его концентрация должна быть  $C_B(t + \Delta t)$ . При этом из контура будет удалено количество борного поглотителя, равное  $\Delta M_B = (C_B(t) - C_B(t + \Delta t))V_K$ , где  $V_K$  – объем теплоносителя в первом контуре. Для этого необходимо забрать из контура с бором объем  $\Delta V(t)$ , величина которого определяется из равенства  $C_B(t) \cdot \Delta V(t) = \Delta M_B$ . Такое же количество дистиллята необходимо добавить в контур для замещения выделенного количества теплоносителя. Приравнявая эти величины, получим уравнение для определения объема ЖРО

$$\frac{dV_{\text{ЖРО}}}{V_K} = \frac{dC_B(t)}{C_B(t)}, \quad (2)$$

решение которого имеет вид

$$V_{\text{ЖРО}} = V_K \ln \left( \frac{C_B(0)}{C_B(T)} \right), \quad (3)$$

где  $V_{\text{ЖРО}}$  – полное количество ЖРО, накопившихся за кампанию, а  $C_B(T)$  – конечная концентрация бора в момент прекращения борного регулирования.

Результаты расчетов существенно зависят от принятой величины остаточной концентрации борного поглотителя в теплоносителе. В данной работе используется количество ЖРО, образуемых в реакторе без выгорающего поглотителя, т.е. для случая чисто борного регулирования по отношению к объему контура, а именно,  $n = V_{\text{ЖРО}}/V_K$ . Задавая значением этой величины, определяем конечную концентрацию борного поглотителя  $C_B(T)$  и в дальнейшем используем эту величину для всех вариантов загрузки эрбия в твэлы. В результате получим выражение

$$V_{\text{ЖРО}}(x_{\text{Er}}) = V_{\text{ЖРО}}(0) + V_K \ln \left( \frac{C_B(x_{\text{Er}}, t=0)}{C_B(0, t=0)} \right), \quad (4)$$

из которого получаем величину относительного снижения объемов ЖРО

$$\delta_{\text{ЖРО}}(x_{\text{Er}}) = \frac{V_{\text{ЖРО}}(0) - V_{\text{ЖРО}}(x_{\text{Er}})}{V_{\text{ЖРО}}(0)} = \frac{1}{n} \ln \left( \frac{C_B(0, t=0)}{C_B(x_{\text{Er}}, t=0)} \right)$$

в зависимости от концентрации эрбия в твэлах (рис. 7).

Поскольку значения обогащения топлива для обоих случаев частичных перегрузок оказались близкими по величине, то и зависимости относительного снижения практически совпали, что и отражено на рис. 7. Если принять, что конечная концентрация бора для регулирования в 10 раз ниже начальной, что соответствует случаю  $V_{\text{ЖРО}}/V_K = 2$ , то снижение объемов ЖРО изменяется от 10 до 50% при загрузке эрбия в твэлы в указанном выше диапазоне.



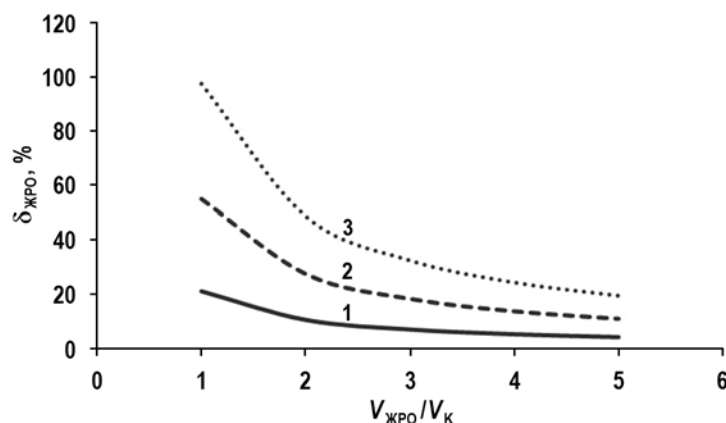


Рис. 7. Относительное снижение объемов ЖРО в зависимости от концентрации эрбия в твэлах: 1 – Er 0.3%; 2 – Er 0.7%; 3 – Er 1.1%

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетных исследований возможности применения эрбия в качестве выгорающего поглотителя в реакторах типа ВВЭР при удлинённых кампаниях выполнены на упрощенной модели частичных перегрузок топлива без перестановок ТВС в активной зоне. Рассматривались варианты удлинённых кампаний от полутора до двух лет, но с цельнократными перегрузками, что потребовало повышения начального обогащения топлива подпитки. Расчеты показали, что варьирование количества загружаемого эрбия в твэлы позволяет управлять величиной температурного коэффициента реактивности по температуре теплоносителя-замедлителя и обеспечивает наличие внутренне присущих свойств безопасности (отрицательные значения температурных коэффициентов реактивности).

На простой модели водообмена для регулирования критической концентрации борного поглотителя показано, что применение эрбия в качестве выгорающего поглотителя позволяет снизить объем ЖРО до 50%. Увеличение загрузки эрбия в твэлах снижает выгорание выгружаемого топлива примерно на 0.7% при увеличении загрузки эрбия в твэлах на 0.1 весовых %, в то время как снижение объема ЖРО при этом составляет около 5%. Снижение выгорания топлива при использовании эрбия будет приводить к снижению коэффициента неравномерности энерговыделения по ТВС. Однако за счет увеличения загрузки ТВС с топливом подпитки в центральную область активной зоны можно сократить потери в выгорании [11].

## Литература

1. U.S. Department of Energy. DOE Fundamentals Handbook: Nuclear Physics and Reactor Theory, Vol. 2. – Washington USA, 1993. – 128 p.
2. Frybort J. Erbium Burnable Absorber for High-burn up fuels, WoS 000321966500252. / Proc. of the XIII-th International Scientific Conference EPE 2012. – Czech Republic, 2012. – PP. 1299-1304.
3. Fedosov A.M. RBMK Uranium-Erbium Fuel. // Atomic Energy. – 2018. – Vol. 124. – No. 4. – PP. 221-226.
4. Franceschini F., Petrovich B. Fuel with Advanced Burnable Absorbers Design for the IRIS Reactor Core: Combined Erbium and IFBA. // Annals of Nuclear Energy. – 2009. – Vol. 36. – Iss. 8. – PP. 1201-1207; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.04.005>.
5. Franceschini F. Use of Isotopically Modified Erbium to Improve Fuel Cycle Economics in IRIS. / Proc. of the V-th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, INAC. – 2017. – PP. 1-12.
6. Семченков Ю. Использование топлива в реакторах ВВЭР: состояние и перспективы. //



Росэнергоатом. – 2014. – № 11. – С. 8-13.

7. Савандер В.И., Альассаф С.Х. Анализ эффективности применения удлиненных кампаний на зарубежных АЭС с реакторами типа ВВЭР. // Ядерная физика и инжиниринг. – 2019. – Т. 9. – № 4. – С. 1-4.

8. Пряничников А.В. Описание программы GETERA. // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2009. – № 3. – С. 63-76.

9. Bergelson B.R., Belonog V.V., Gerasimov A.S., Tikhomirov G.V. VVER Nuclear Fuel Burnup with Different Absorbers. // Atomic Energy. – 2011. – Vol. 109. – No. 4. – PP. 240-245; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-011-9351-2>.

10. Абу Сондос М.А., Демин В.М., Савандер В.И. Снижение объема борного регулирования запаса реактивности при использовании выгорающего поглотителя на основе  $Gd_2O_3$  в топливе реактора ВВЭР-1200. // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 3(32). – С. 56-65; DOI: <https://doi.org/10.26583/gns-2019-03-06>.

11. Хашламун Т.М., Выговский С.Б., Лескин С.Т., Думан А.С. Определение параметров 18-месячного топливного цикла с целью минимизации топливных затрат на базе эксплуатируемых конструкций ТВС в реакторах ВВЭР-1200. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 3. – С. 113-124; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.3.10>.

Поступила в редакцию 12.04.2020 г.

#### Авторы

Альассаф Салех Хайель, аспирант

E-mail: SKAlassaf@mephi.ru

Савандер Владимир Игоревич, доцент, канд. физ.-мат. наук

E-mail: visavander@mephi.ru

Хассан Ахмед Абуельхамд, аспирант

E-mail: AKhassan@mephi.ru

UDC 621.039

## USE OF ERBIUM AS A BURNABLE ABSORBER FOR THE VVER REACTOR CORE LIFE EXTENSION

Alassaf S.H., Savander V.I., Hassan A.A.

National Research Nuclear University «MEPhI»

31 Kashirskoe Hwy, 115409 Moscow, Russia

#### ABSTRACT

The paper presents the results of a computational and theoretical analysis dealing with the use of erbium as a burnable absorber in VVER-type reactors. Partial refueling options for the reactor life extension (to a year and a half to two years) are considered, the refueling ratio being equal to three for the former and to two for the latter. Erbium is expected to be present in all fuel elements in the FA with the same weight content. The influence of the erbium weight content on such reactor and fuel neutronic characteristics as burn-up, reactivity coefficients, residual volume of «liquid control», and volumes of the liquid radioactive waste formed has been estimated.

Calculations were performed based on a simplified refueling model without FA reshuffling. An infinite mesh of polycells, consisting of FAs with different in-core times, was considered. The neutron escape from the core was taken into account through the selection of the critical value  $K_f$  at the end of life.

Erbium does not burn up altogether for the core life which affects the fuel burn-up reduction as compared with the liquid system for excessive reactivity

compensation. The reduction is 0.7% per 0.1% of the erbium weight load in the fuel element. This, however, also reduces the maximum content of the boron absorber in the coolant and the accumulation of LRW in the ratio of 5% per 0.1% of the erbium weight load.

Erbium influences the spectral component of the coolant temperature reactivity coefficient which turns out to be negative even with a minor weight fraction in fuel and the decrease in the boron absorber fraction leads to a positive value of the density reactivity coefficient. As the result, the total coolant temperature reactivity coefficient has a negative value throughout the life.

**Key words:** VVER, burnable absorber, erbium, reactivity margin, GETERA, liquid excessive reactivity compensation system, liquid radioactive waste (LRW).

#### REFERENCES

1. U.S. Department of Energy. DOE *Fundamentals Handbook: Nuclear Physics and Reactor Theory*, Vol. 2. Washington USA. 1993. 128p.
2. Frybort J. Erbium burnable absorber for high-burn up fuels, WoS 000321966500252. *Proc. of the XIII-th International Scientific Conference EPE 2012*. Czech Republic, 2012, pp. 1299-1304.
3. Fedosov A.M. RBMK Uranium-Erbium Fuel. *Atomic Energy*, 2018, v. v124, no. 4, pp. 221-226.
4. Franceschini Fausto, Petrovich Bojan. Fuel with Advanced Burnable Absorbers Design for the IRIS Reactor Core: Combined Erbia and IFBA. *Annals of Nuclear Energy*. 2009, v. 36, iss. 8, pp. 1201-1207; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.04.005>.
5. Franceschini Fausto. Use of Isotopically Modified Erbium to Improve Fuel Cycle Economics in IRIS. *Proc. of the V-th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, INAC*, 2017, pp. 1-12.
6. Semchenkov Yu. Using Fuel in VVER Reactors: Condition and Prospects. *Rosenergoatom*, 2014, no. 11, pp. 8-13 (in Russian).
7. Savander V.I., Al'assaf S.H. Analysis of the Effectiveness of Using Extended Core Life Cycle in VVER Reactor in the Foreign Countries. *Yadernaya Fizika i Inzhiniring*. 2019, v. 9, no. 4, pp. 1-4 (in Russian).
8. Pryanichnikov A.V. Description of the GETERA Code. *VANT. Ser. Fizika yadernykh reaktorov*. 2009, no. 3, pp. 63-76 (in Russian).
9. Bergelson B.R., Belonog V.V., Gerasimov A.S., Tikhomirov G.V. VVER Nuclear Fuel Burnup with Different Absorbers. *Atomic Energy*. 2011, v. 109, no. 4, pp. 240-245; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-011-9351-2>.
10. 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  $GD_2O_3$  in the Fuel Reactor WWER-1200. *Global'naya Yadernaya Bezopasnost'*. 2019, no. 3 (32), pp. 56-65; DOI: <https://doi.org/10.26583/gns-2019-03-06> (in Russian).
11. Hashlamun T.M., Vygovskiy S.B., Leskin S.T., Duman A.S. Determination of 18-month Fuel Cycle Parameters with Goal of Fuel Costs Minimization at the Basis of Use Constructions of Fuel Assemblies in VVER-1200 Reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018, no. 3, pp. 113-124; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.3.10> (in Russian).

#### Authors

Alassaf Saleh Hayel, PhD Student

E-mail: SKAlassaf@mephi.ru

Savander Vladimir Igorevich. Associate Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: VISavander@mephi.ru

Hassan Ahmed Abyelhamd Abdelnaby. PhD Student

E-mail: AKhassan@mephi.ru