

ПРИМЕНЕНИЕ ЭРБИЯ В КАЧЕСТВЕ ВЫГОРАЮЩЕГО ПОГЛОТИТЕЛЯ В РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР ПРИ РАБОТЕ В ЗАМКНУТОМ ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ

© 2024 г. А. Р. Музафаров^а *, В. И. Савандер^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: anvar1996@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.10.2023 г.

После доработки 20.10.2023 г.

Принята к публикации 08.11.2023 г.

В данной статье приведены результаты расчетно-теоретической анализа снижения расхода природного урана в реакторах типа ВВЭР с эрбиевым выгорающим поглотителем при повторном использовании отработавшего топлива. Расчеты проводились на упрощенной модели выгорания топлива в реакторе при использовании частичных перегрузок без перестановок ТВС. Проведен сравнительный анализ расхода природного урана при использовании гадолиния и эрбия в качестве выгорающих поглотителей для вариантов с урановым и REMIX топливом. Показано, что для вариантов с применением REMIX топлива проигрыш в расходе природного урана при использовании эрбия по отношению к варианту с гадолинием снижается на 50%.

Ключевые слова: REMIX топливо, ВВЭР, ОТВС, регенерат, выгорающий поглотитель, расход топлива, твэг, твэл, расчетный анализ, запас реактивности, кампания топлива, ЗЯТЦ, поляйчейка, относительное энерговыделение

DOI: 10.56304/S2079562924050324

ВВЕДЕНИЕ

В реакторах корпусного типа (ВВЭР, PWR) для повышения выгорания топлива применяются частичные перегрузки. Для этого при перегрузке топлива из активной зоны извлекается только часть наиболее выгоревших ТВС. Взамен этих ТВС загружается топливо с начальным обогащением, что создает запас реактивности на всю кампанию реактора [1–3]. В настоящее время в России экономически выгодно работать на удлинённых кампаниях длительность которых составляет полтора года. В перспективе предполагается переход и на двухгодичные кампании. Чем больше длительность кампании, тем больший запас реактивности требуется компенсировать [4, 5].

Традиционно основным способом компенсации избыточной реактивности в реакторах типа ВВЭР-1000 является “жидкостное” регулирование, которое основывается на изменении концентрации борной кислоты в теплоносителе. Благодаря практически равномерному распределению борной кислоты (H_3BO_3) в объеме активной зоны использование жидкостного регулирования не влияет на распределение энерговыделения в активной зоне. Однако жидкостная система компенсации имеет следующие значимые недостатки: накопление больших объемов низко активных ЖРО в про-

цессе отбора теплоносителя из первого контура и негативное влияние на плотностной коэффициент реактивности по теплоносителю [6–8].

Поэтому наряду с жидкостной системой применяется интегрированный в топливо выгорающий поглотитель на основе гадолиния (Gd_2O_3). Основным преимуществом гадолиния является то, что вследствие большого сечения поглощения тепловых нейтронов, которое в основном достигается за счет изотопов ^{157}Gd и ^{158}Gd , поглотитель успевает выгореть в течение первой кампании. Благодаря этому факту его использование не влияет на выгорание выгружаемого топлива. При этом гадолиний размещается в небольшом числе твэлов (твэгов), который становится сильным поглотителем нейтронов, что приводит к депрессии потока тепловых нейтронов не только в самом твэге, но и в окружающих этот твэг твэлах [9–11]. Это факт приводит к повышению коэффициента неравномерности энерговыделения в ТВС. К тому же повышение весового содержания гадолиния ухудшает теплопроводность диоксида урана (UO_2). Последнее может привести к деформациям в топливе [12].

В качестве альтернативы предлагается использовать выгорающий поглотитель на основе эрбия

(Er_2O_3). Изотоп эрбия ^{167}Er имеет резонанс в тепловой области энергий. Эрбий применяется в качестве выгорающего поглотителя в реакторах РБМК. По сравнению с гадолинием это слабый поглотитель и по этой причине он может размещаться во всех твэлах (гомогенный поглотитель). Таким образом происходит равномерное распределение энерговыделения по ТВС. Еще одной положительной стороной уран-эрбиевого топлива является то, что спектральная составляющая коэффициента реактивности по температуре теплоносителя остается отрицательной на протяжении всей кампании. Последнее обстоятельство обеспечивает условие безопасной эксплуатации реакторной установки [13, 14].

Однако эрбий имеет существенный недостаток, который заключается в том, что он не выгорает полностью за кампанию. Это приводит к тому, что сокращается продолжительность одной кампании и снижается выгорание выгружаемого топлива [15].

При использовании уран-эрбиевого топлива в замкнутом топливном цикле, например, при введении REMIX топлива, невыгоревший ^{235}U будет возвращен в топливный цикл на повторное использование, что приведет к снижению расхода природного урана для новой загрузки [16–19].

Цель данной работы – оценить эффект снижения расхода природного урана при использовании эрбия в замкнутом топливном цикле ВВЭР с повторным использованием отработавшего топлива.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для проверки этого эффекта рассмотрим вариант ТВС реактора ВВЭР-1000 с заданным обогащением топлива 4.95% во всех твэлах и с применением трехкратной перегрузки, но без перестановок ТВС. Представим активную зону как бесконечную периодическую решетку полаячек, которые образуются в результате того, что свежая ТВС ставится на место выгоревшей. Сама полаячка будет состоять из ТВС с различными временами облучения в реакторе. Условие критичности периодической структуры задается с учетом утечки нейтронов из активной зоны реактора ВВЭР-1000, то есть, необходимо соблюдение условия (1):

$$K_{\text{эф}} = \frac{K_{\infty}^{\text{POLY}}}{1.05} = 1. \quad (1)$$

При этом коэффициент размножения активной зоны ($K_{\infty}^{\text{A3}} = K_{\infty}^{\text{POLY}}$) принимаем равным среднеарифметического значения, входящих в нее ТВС:

$$K_{\infty}^{\text{A3}} = K_{\infty}^{\text{POLY}}(t) = \frac{K_{\infty}^{\text{TBC}}(t) + K_{\infty}^{\text{TBC}}(T+t) + K_{\infty}^{\text{TBC}}(2T+t)}{3}, \quad (2)$$

$$0 < t < T.$$

В конце кампании $K_{\infty}^{\text{POLY}}(T) = K_{\infty}^{\text{CRIT}} = 1.05$ из этого соотношения находится длина кампании. Здесь введены следующие обозначения: K_{∞}^{POLY} – коэффициент размножения полаячки; K_{∞}^{TBC} – коэффициент размножения ТВС; K_{∞}^{CRIT} – критическое значение коэффициента размножения.

В качестве выгорающих поглотителей рассматриваются природный гадолиний и эрбий. В варианте с гадолинием необходимо учитывать наличие в ТВС твэгов и твэлов. Для этого в ТВС выделяем элемент периодичности, в центре которого располагается твэг (рис. 1), окруженный 6 твэлами [20]. В свою очередь элементарную ячейку, моделирующую ТВС, представим в виде эквивалентной ячейки в цилиндрической геометрии. Весовое содержание гадолиния в твэгах и эрбия в твэлах подбирается таким образом, чтобы не скомпенсированный запас реактивности этими поглотителями, который будет скомпенсирован жидкостной системой, был бы одинаковым для обоих вариантов.

Для определенности, зададим весовое содержание гадолиния в твэге в количестве 4.2% [20]. Вначале проводится расчет варианта с гадолинием и определяется запас реактивности, который будет скомпенсирован жидкостной системой. Далее подбирается такое весовое содержание эрбия во всех твэлах, при котором начальный запас реактивности равен максимальному значению запаса реактивности в варианте с гадолинием. Поскольку при одинаковом обогащении удельный расход природного урана пропорционален длительности кампании, то отношение этих величин равно отношению длительности кампаний.

Далее выделяем из отработавшей ТВС изотопы урана и плутония и, добавляя уран 20% обогащения в регенерат, создадим новые топливные загрузки на основе REMIX топлива для каждого варианта так, чтобы сохранилась продолжительность кампании, как и для урановых вариантов. В REMIX топливо добавляется именно урана 20% обогащения так, как важно соблюдать требования МАГАТЭ на ограничение обогащения топлива по ^{235}U (не более 20%).

МЕТОДИКА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Расчеты проводились в программном коде Serpent (2.1.32) с использованием библиотеки ядерных данных ENDFb7. Предлагаемая цилиндриче-

ская модель позволяет проводить расчет в программах Getera и Serpent.

Запас реактивности ρ для гадолиниевого и эрбиевого варианта рассчитывается по формуле:

$$\rho = \frac{K_{эф} - 1}{K_{эф}} = 1 - \frac{1}{K_{эф}} = 1 - \frac{1.05}{K_{\infty}^{POLY}} = \frac{K_{\infty}^{POLY} - 1.05}{K_{\infty}^{POLY}} \quad (3)$$

Для создания REMIX топлива необходимо взять некоторую долю регенерированного топлива ϵ и добавить такое количество урана 20% обогащения, чтобы выгорание для этого топлива было таким же, как в чисто урановом топливе для обоих вариантов. При формировании составов REMIX топлива важно соблюдения следующих условий:

1. Количество тяжелых ядер в единице объема твэла должно оставаться неизменным (более точные массы топлива должны сохраняться).

2. Необходимо сохранить длительности кампаний для рассматриваемых вариантов, как и на первом этапе.

Для нумерации изотопов, используем стандартную запись. То есть, первое число эта последняя цифра заряда ядра, а второе число эта последняя цифра в массовом числе. Введем следующие обозначения:

$$\rho(0) = \rho_{25}(0) + \rho_{28}(0), \quad (4)$$

$$\rho(T) = \rho_{25}(T) + \rho_{28}(T) + \rho_{26}(T) + \rho_{49}(T) + \rho_{40}(T) + \rho_{41}(T) + \rho_{42}(T), \quad (5)$$

$$\rho_f(T) = \rho_{25}(T) + \rho_{49}(T) + \rho_{41}(T). \quad (6)$$

Запишем балансовые соотношения для количества тяжелых ядер:

$$\rho(0) = \epsilon\rho(T) + \rho_{25}(20\%) + \rho_{28}(20\%). \quad (7)$$

При заданном значении величины ϵ находим $\rho_{25}(20\%)$ $\rho_{28}(20\%)$ поскольку эти величины связаны соотношением:

$$X = \frac{A_{25}\rho_{25}(20\%)}{A_{25}\rho_{25}(20\%) + A_{28}\rho_{28}(20\%)}. \quad (8)$$

Из соотношения (8) выразим $\rho_{28}(20\%)$ и получим выражение:

$$\rho_{28}(20\%) = \frac{A_{25}}{A_{28}} \left(\frac{1-X}{X} \right) \rho_{25}(20\%) = K_X \rho_{25}(20\%). \quad (9)$$

Доля урановых и плутониевых изотопов, используемая для создания REMIX-топлива, заранее неизвестна. Для первоначальной оценки этой величины воспользуемся условием сохранения общего числа делящихся изотопов:

$$\rho_{25}(0) = \epsilon\rho_f(T) + \rho_{25}(20\%). \quad (10)$$

Из уравнения баланса делящихся изотопов получим

$$\rho_{25}(20\%) = \rho_{25}(0) - \epsilon\rho_f(T). \quad (11)$$

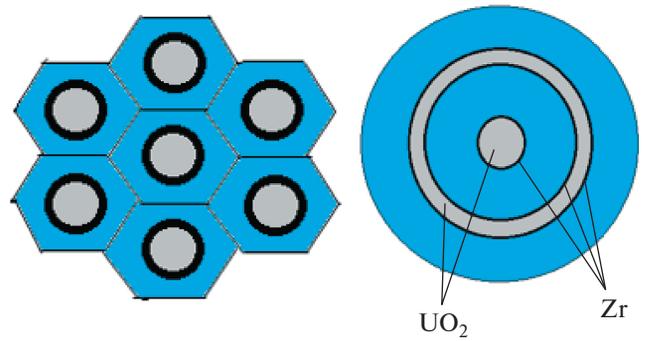


Рис. 1. Вариант расположения твэла.

Найдем общую концентрацию топлива подпитки уран 20% обогащения

$$\rho_{25}(20\%) + \rho_{28}(20\%) = (1 + K_X)(\rho_{25}(0) - \epsilon\rho_f(T)). \quad (12)$$

Подставим общую концентрацию топлива подпитки в первое уравнение баланса (7) и из полученного выражения (13) найдем долю регенерата в смеси (14):

$$\rho(0) = \epsilon\rho(T) + (1 + K_X)(\rho_{25}(0) - \epsilon\rho_f(T)), \quad (13)$$

$$\epsilon = \frac{(\rho(0) - (1 + K_X)\rho_{25}(0))}{(\rho(T) - (1 + K_X)\rho_f(T))}. \quad (14)$$

Зная ϵ , определяем $\rho_{25}(20\%)$ и $\rho_{28}(20\%)$. После формируем состав для REMIX топлива (15), (16) и (17):

$$\rho_{28} = \epsilon\rho_{28}(T) + \rho_{28}(20\%), \quad (15)$$

$$\rho_{25} = \epsilon\rho_{25}(T) + \rho_{25}(20\%), \quad (16)$$

$$\rho_i = \epsilon\rho_i(T). \quad (17)$$

В случае невыполнения условия сохранения выгорания, достигнутого на урановом топливе, доля регенерата в составе REMIX топлива ϵ подбирается путем варьирования в пределах $\pm 5\%$ для достижения заданных значений выгорания топлива.

Получив удельные расходы урана в зависимости от длины кампании для вариантов с гадолинием и эрбием для урановой загрузки (18) найдем относительный расходы (19). Для REMIX топлива удельный расход природного урана определяется по величине загрузки добавляемого урана 20%-го обогащения (20):

$$G_{Er} = \frac{M_{Er}}{T_{Er}} \text{ и } G_{Gd} = \frac{M_{Gd}}{T_{Gd}}, \quad (18)$$

$$n = \frac{G_{Er}}{G_{Gd}}, \quad (19)$$

$$n(20\%) = n(x) \frac{(\rho_{25}(20\%))_{Er}}{(\rho_{25}(20\%))_{Gd}}. \quad (20)$$

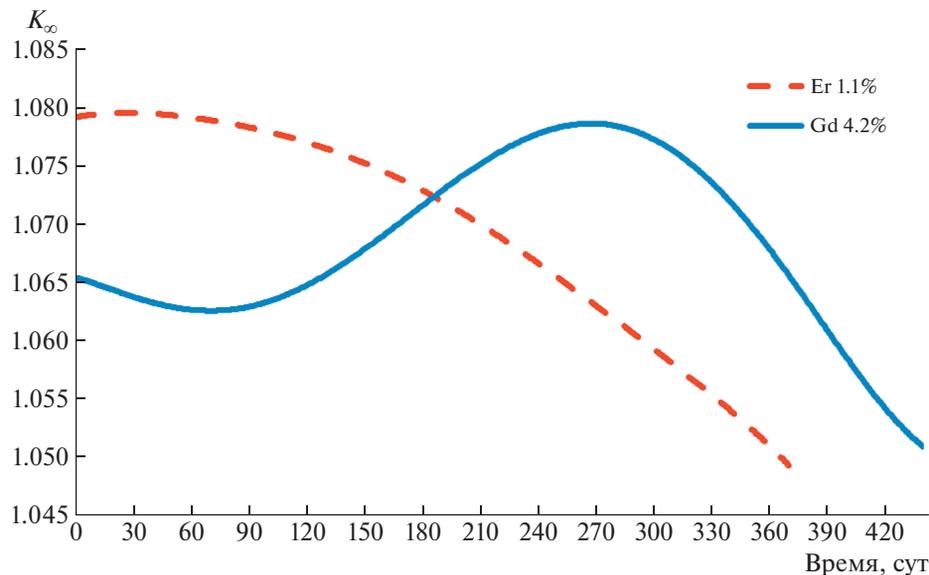


Рис. 2. Зависимости $K_{\infty}^{\text{POLY}}(t)$ для уранового топлива с гадолиниевым и эрбиевым выгорающим поглотителем.

Здесь G_{Er} , G_{Gd} — удельный расход природного урана для варианта с эрбиевым и гадолиниевым выгорающими поглотителями; M_{Er} , M_{Gd} — масса природного урана, используемая для создания топливных загрузок для варианта с эрбиевым и гадолиниевым выгорающими поглотителями; T_{Er} , T_{Gd} — продолжительность кампаний для варианта с эрбиевым и гадолиниевым выгорающими поглотителями; n — относительный расход природного урана; $n(x)$ — отношение кампании для варианта с гадолинием, к кампании для варианта с эрбием.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Принимая во внимание то, что в случае с эрбиевым поглотителем максимальная реактивность достигается в начале кампании, подбирается такое весовое содержание эрбия, при котором начальное значение реактивности будет равняться максимальному значению реактивности для варианта гадолиния с весовым содержанием 4.2%. Вышеуказанным критериям удовлетворяет эрбий с весовым содержанием 1.1%. Ниже представлены графики зависимости $K_{\infty}^{\text{POLY}}(t)$ (рис. 2).

Продолжительность одной кампании для варианта с эрбиевым поглотителем составила 370 сут, а

для гадолиниевого поглотителя 440 сут. Величина проигрыша в выгорании в случае с эрбиевым поглотителем относительно гадолиниевого поглотителя составляет 19%. Как известно, вклад в удельную энерговыработку реактора осуществляется как за счет деления ^{235}U , так и за счет деления нечетных плутониевых изотопов. Поэтому проигрыш в выгорании для варианта с эрбием связано как с недовыжиганием ^{235}U , так и с меньшей наработкой плутониевых изотопов. В табл. 1 приведены доли выгоревших изотопов в урановом топливе относительно начальных концентраций. Относительно меньшее выгорание ^{235}U в варианте с эрбием при формировании REMIX загрузки снижает расход урана 20% обогащения. Однако снижение наработки плутония при меньшей длительности кампании для эрбиевого варианта не позволяет полностью скомпенсировать потерю в выгорании при повторном использовании выгоревшего топлива.

Наличие в REMIX топливе повышенного содержания плутониевых изотопов для варианта с гадолинием влияет на форму зависимости избыточной реактивности за кампанию, так что максимум избыточной реактивности достигается, как и для эрбиевого варианта в начале кампании (рис. 3, 4).

В частности, наличие в составе REMIX загрузки ^{240}Pu приводит к уменьшению величины избыточной реактивности, поскольку сечение поглощения ^{240}Pu имеет широкий резонанс в тепловой области. Тем самым данный изотоп выполняет роль дополнительного поглотителя в составе REMIX загрузки.

Таблица 1. Доля выгоревших изотопов ^{235}U и ^{238}U в течении всей кампании

Название топлива	^{235}U , %	^{238}U , %
Топливо с Er	65	3.0
Топливо с Gd	70	3.5

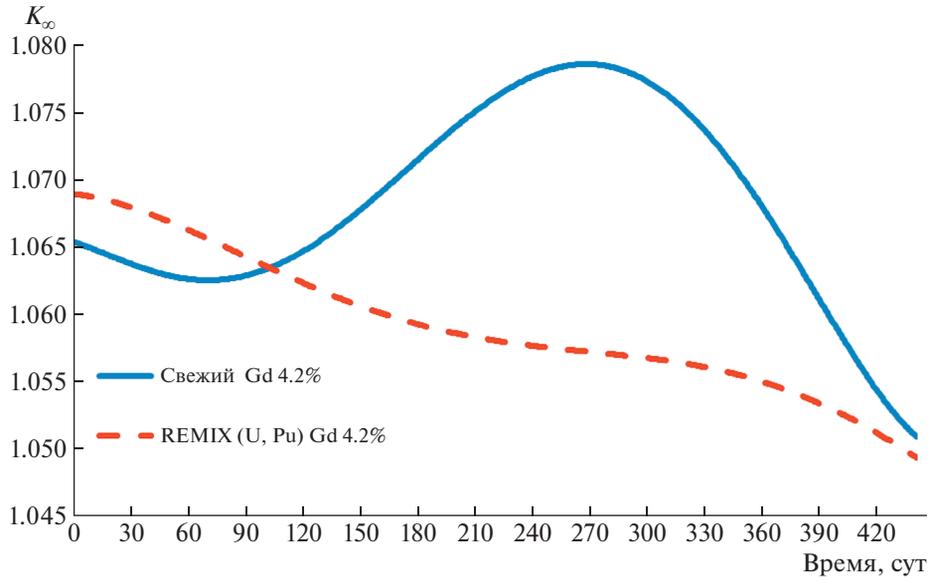


Рис. 3. Зависимости $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для уранового и REMIX топлива с гадолиниевым выгорающим поглотителем.

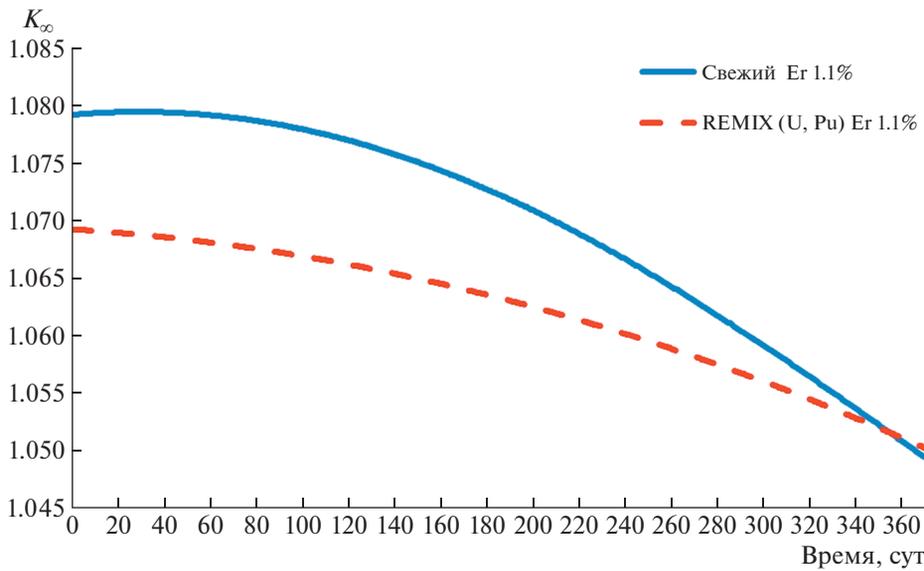


Рис. 4. Зависимости $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для уранового и REMIX топлива с эрбиевым выгорающим поглотителем.

Как видно из рис. 3, 4 зависимость $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для REMIX и уранового топлива имеет небольшое расхождение. Данное расхождение в графиках связано не только наличием ^{240}Pu , но и ^{236}U в составе REMIX топлива, который накапливается в результате радиационного захвата на ^{235}U .

При сравнении относительных расходов природного урана (табл. 2), в первом случае с урановым топливом у варианта с эрбиевым поглотителем расход больше. Но, как и предполагалось в случае с REMIX топливом относительный расход

урана для эрбиевого варианта уменьшился, уменьшение составило примерно 10% по сравнению с урановой загрузкой.

Если сравнивать зависимости $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для REMIX топлива с эрбиевым и гадолиниевым выгорающими поглотителями, то можно заметить, что максимальное значение реактивности одинаковое для двух этих вариантов. То есть равный запас реактивности для жидкостной системы, достигнутый на урановом топливе, также сохраняется для REMIX топлива (рис. 5).

Таблица 2. Относительные расходы природного урана

Название топлива	Свежая загрузка		REMIX загрузка	
	кампания (Т), сут	отношение расходов урана	кампания (Т), сут	отношение расходов урана
Топливо с Er	370	1.19	370	1.08
Топливо с Gd	440		440	

Экономия от использования урана 20% обогащения при формировании REMIX загрузки для варианта с эрбием относительно варианта с гадолинием составила 1.5%.

Существует еще одна возможность снизить потерю в выгорании для эрбиевого топлива. Поскольку эрбий размещается однородно по активной зоне, то коэффициент неравномерности энерговыделения по ТВС для этого варианта будет меньше, чем для варианта с гадолинием. Возможности программного кода Serpent позволяют оценить относительное энерговыделение в рассматриваемой ячейке для обоих вариантов (рис. 6, 7). В начале кампании для варианта с использованием гадолиния возникает максимальная неравномерность энерговыделения (рис. 6). Причиной возникновения является депрессия потока тепловых нейтронов в твэге, возникающее из-за большого сечения поглощения тепловых нейтронов гадолиниевыми изотопами. Более того, депрессия потока тепловых нейтронов имеет место не только внутри твэга, но и в соседних твэлах. Последнее чревато деформацией оболочки и топливной матрицы, что является нарушением одного из барьеров

системы безопасности АЭС. У варианта с эрбиевым поглотителем такой проблемы не возникает.

Таким образом полный коэффициент неравномерности энерговыделения по активной зоне будет выше для гадолиниевого варианта. Однако, для топлива с одинаковым запасом реактивности (одинаковое обогащение) как правило выполняется соотношение между средним выгоранием топлива и коэффициентом неравномерности энерговыделения по активной зоне, а именно, чем больше выгорание, тем выше коэффициент неравномерности и наоборот. Следовательно, за счет перестановок ТВС в процессе перегрузки можно влиять на коэффициент неравномерности. Для его снижения при использовании гадолиния необходимо увеличить долю свежих ТВС на краю активной зоны, что снизит выгорание. А для эрбиевого варианта наоборот необходимо увеличить число свежих ТВС в центре активной зоны и тем самым повысить коэффициент неравномерности до значения, как и с гадолинием, но при этом повысится среднее выгорание топлива. При 300 сут гадолиний практически полностью выгорел и как следствие энерговыделение постепенно выравнивается

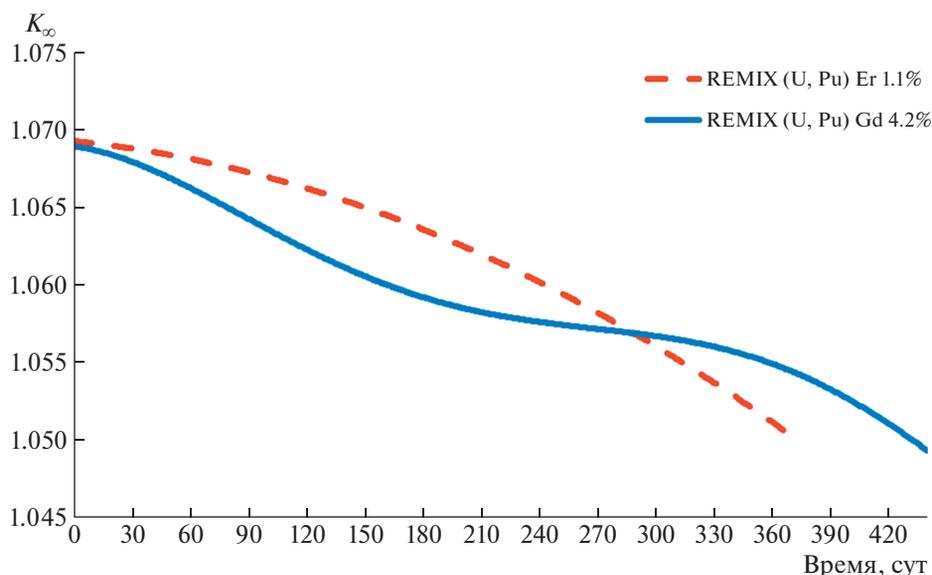


Рис. 5. Зависимости $K_{\infty}^{\text{POLY}}(t)$ для REMIX топлива из уран-плутониевых изотопов с эрбиевым и гадолиниевым выгорающим поглотителем.

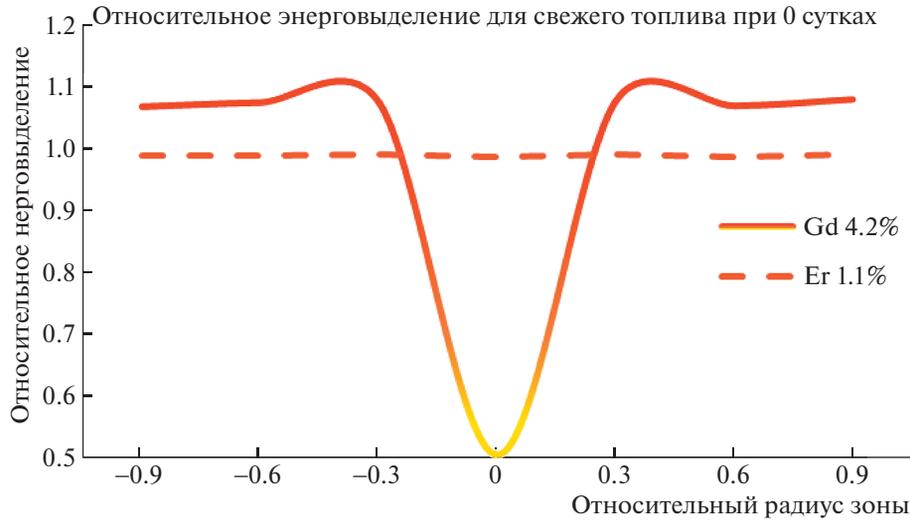


Рис. 6. Относительное энерговыделение при 0 сутках.

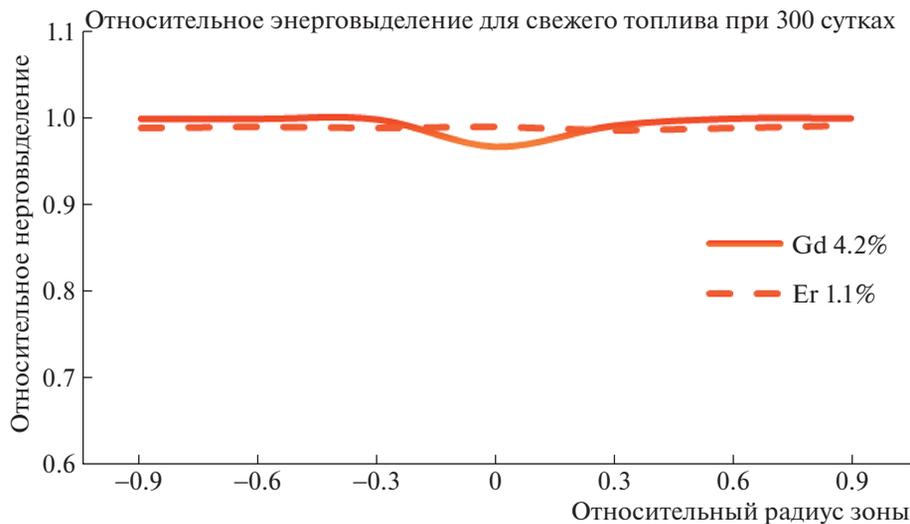


Рис. 7. Относительное энерговыделение при 300 сутках.

и приближается к 1. В варианте с эрбиевым поглотителем ничего не изменилось (рис. 7). Аналогичная тенденция сохраняется и для REMIX топлива.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты наглядно подтверждают, что недостаток от использования эрбия в виде сокращения кампании в открытом топливном цикле может быть частично скомпенсирован в закрытом топливном цикле в виде 10% уменьшения расхода урана для формирования REMIX топлива. Пониженный расход природного урана при использовании гадолиния связан с повышенным накоплением ²³⁹Pu за счет более длительной кам-

пании. Последнее ограничивает снижение расхода природного урана в случае с эрбиевым поглотителем по сравнению с гадолиниевым.

Гомогенное расположения эрбиевого поглотителя приводит к равномерному распределению энерговыделения по сравнению с гадолиниевым поглотителем. За счет организации соответствующих перестановок ТВС при перегрузке путем повышения доли свежих ТВС в центральной части активной зоны можно существенно снизить потери в выгорании при использовании эрбиевого поглотителя. Кроме того, возможно совместное использование этих выгорающих поглотителей, что требует расчетного анализа. Выше указанные факты, дают эрбиевому поглотителю дополнительное преимущество, как выгорающему поглотителю,

используемому в реакторах типа ВВЭР-1000. Полученный результат не зависит от выбранных для сравнения вариантов если только они обеспечивают одинаковый компенсируемый запас реактивности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Семченков Ю.М. // Бюл. Росэнергоатома. 2011. № 11. С. 8–13.
2. Мастепанов А.М. Топливо-энергетический комплекс России на рубеже веков: состояние, проблемы и перспективы развития. 2009. Москва: Энергоатомиздат.
3. McDonald A. // IAEA Bull. No. 49-2. 2008. P. 45–48.
4. Савандер В.И., Альассаф С.Х. // Ядерная физика и инжиниринг. 2019. Т. 10. № 1. С. 5–8 [Savander V.I., Alassaf S.H. // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83 (12). P. 1615–1618].
5. Хашламан Т.М., Выговский С.Б., Лескин С.Т., Думан А.С. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2018. № 3. С. 113–124.
6. Košťál M., Rypar V., Juříček V. // Ann. Nucl. Energy. 2013. V. 60. P. 1–7.
7. Thomet P. // Nucl. Technol. 1999. V. 127 (3). P. 267–286.
8. Daing A.T., Kim M.H. // Nucl. Technol. 2011. V. 176 (1). P. 40–56.
9. Tran H. Hoang H., Liem P.H. // Energy Proc. 2017. V. 131. P. 29–36.
10. Nabila U., Sahadath H., Hossain T., Reza F. // Nucl. Eng. Tech. 2022. V. 54 (9). P. 3516–3525.
11. Yilmaz S., Ivanov K., Levine S., Mahgerefteh M. // Ann. Nucl. Energy. 2006. V. 33 (5). P. 439–445.
12. Баранов В.Ю. Изотопы: свойства, получение, применение. 2005. Москва: Физматлит.
13. Tsyganov S.V., Kravchenko Yu. Ya., Kraynov Ya., et al. // Prog. Nucl. Energy. 2022. V. 147. P. 1–6.
14. Быстриков А.А. и др. // Атомная энергия. 2006. Т. 100 (3). С. 165–170 [Bystrikov A.A. et al. // At. Energy. 2006. V. 100 (3). P. 163–168].
15. Pavlovichev A. et al. // Kerntechnik. 2013. V. 78 (4). P. 272–279.
16. Алексеев П.Н. и др. // ВАНТ. Сер.: физика ядерных реакторов. 2014. № 4. С. 115–126 [Alekseev P.N. et al. // Phys. At. Nucl. 2015. V. 78 (11). P. 1264–1273].
17. Матвеевко А.В. и др. // Атомная энергия. 2021. Т. 130 (1). С. 52–56 [Matveenko A.V. et al. // At. Energy. 2021. V. 130 (1). P. 57–62].
18. Федоров Ю.С. и др. // Атомная энергия. 2005. Т. 99 (2). С. 136–141 [Fedorov Yu. S. et al. // At. Energy. 2005. V. 99 (2). P. 572–576].
19. Декусар В.М. и др. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2013. № 4. С. 109–117.
20. Музафаров А.Р., Савандер В.И. // Глобальная ядерная безопасность. 2022. № 2 (43). С. 42–54.

The Use of Erbium as a Burnable Absorber in VVER-Type Reactors in a Closed Fuel Cycle

A. R. Muzafarov¹, * and V. I. Savander¹

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: anvar1996@yandex.ru

Received October 6, 2023; revised October 20; accepted November 8, 2023

Abstract—This article presents the results of a computational and theoretical analysis of reducing the consumption of natural uranium in VVER-type reactors with an erbium burnable absorber when reusing spent fuel. Calculations were carried out on a simplified model of fuel burnout in a reactor using partial refueling without fuel assembly permutations. A comparative analysis of the consumption of natural uranium when using gadolinium and erbium as burnable absorbers for options with uranium and REMIX fuel was carried out. It has been shown that for options using REMIX fuel, the loss in natural uranium consumption when using erbium compared to the option with gadolinium is reduced by 50%.

Keywords: REMIX fuel, VVER, SFA, regenerate, burnable absorber, fuel consumption, fuel rod with gadolinium, fuel rod, computational analysis, reactivity margin, fuel campaign, closed nuclear fuel cycle, polycell, relative energy release