

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ  
OPERATION OF FACILITIES  
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.544.8  
doi: 10.26583/gns-2022-02-05

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫГОРАЮЩИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ В  
РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ДОЛИ ЗАПАСА  
РЕАКТИВНОСТИ, КОМПЕНСИРУЕМОГО ЖИДКОСТНОЙ  
СИСТЕМОЙ ПРИ УДЛИНЕННЫХ КАМПАНИЯХ**

© 2022 Музафаров Анвар Рустамович<sup>1</sup>, Савандер Владимир Игоревич<sup>2</sup>

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

<sup>1</sup>anvar1996@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5292-2697>

<sup>2</sup>visavander@mephi.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9309-5616>

*Аннотация.* В работе изложены результаты расчетно-теоретического анализа применения различных выгорающих поглотителей, размещаемых в топливе, для максимального снижения запаса реактивности, компенсируемого жидкостной системой на основе борного поглотителя для реакторов типа ВВЭР, работающих на удлинённых кампаниях. Рассмотрены различные схемы размещения ТВЭГов в ТВС и с различными концентрациями выгорающих поглотителей, в качестве которых рассматриваются природный гадолиний и эрбий. Анализ ведется с помощью упрощённых моделей выгорания топлива при частичных перегрузках, основанных на представлении активной зоны в виде периодической системы полиячеек.

*Ключевые слова:* Выгорающий поглотитель, полиячейка, ВВЭР, Serpent, коэффициент размножения, избыточная реактивность, гадолиний, ТВЭЛ, эрбий, борное регулирование.

*Для цитирования:* Музафаров А.Р., Савандер В.И. Использование выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР для снижения доли запаса реактивности, компенсируемого жидкостной системой при удлинённых кампаниях // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 2(43). – С. 42–54. – <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-02-05>

Поступила в редакцию 12.05.2022

После доработки 17.05.2022

Принята к печати 23.05.2022

## **Введение**

В реакторах типа ВВЭР в настоящее время применяются частичные перегрузки топлива с удлинёнными кампаниями с длительностью в 1.5 года, а в дальнейшем возможен переход и на 2-х годовичные кампании. Обеспечение таких кампаний требует увеличения обогащения топлива, что влечет за собой повышения начального запаса реактивности топливной загрузки, которое должно быть скомпенсировано действующей системой компенсации избыточной реактивности. Эта система включает в себя как жидкостную систему, основанную на растворении в теплоносителе борного поглотителя, так и систему выгорающих поглотителей, интегрированных в топливную матрицу [1-4]. Использование жидкостной системы при большом запасе реактивности оказывает негативное влияние на величину и знак плотностного коэффициента реактивности и к большому объёму низко-активных жидких радиоактивных отходов на АЭС. Дальнейшее обращение с жидкими радиоактивными отходами может повлечь дополнительные финансовые вложения. Именно применение выгорающих

поглотителей, интегрированных в топливо, может существенно снизить эти негативные последствия увеличения длительности кампании [5-8].

В реакторах типа ВВЭР наибольшее применение нашел сильный выгорающий поглотитель – гадолиний [9-10]. В составе природного гадолиния содержится два сильных поглотителя тепловых нейтронов Gd-155 и Gd-157. В твэгах современных ТВС реактора ВВЭР гадолиний размещается в виде оксида ( $Gd_2O_3$ ), концентрация варьируется в пределах 5-8% весовых [11]. Высокое сечение поглощения приводит к тому, что гадолиний успевает выгореть в течении первой кампании. По этой причине он не влияет на среднее выгорание выгружаемого топлива. Стоит отметить, что с увеличением весового содержания гадолиния в топливе уменьшается теплопроводность твэга в результате чего появляется растрескивание и выход продуктов деления из топлива [12].

В России на реакторах РБМК применяется более слабый поглотитель нейтронов – эрбий. Поскольку это слабый поглотитель, то его размещают либо во всех твэлах, либо в большей части твэлов без изменения обогащения урана и в этом случае он не будет оказывать влияния на неравномерность энерговыделения в ТВС. В отличие от гадолиния, эрбий не успевает полностью выгореть за одну кампанию, поэтому остаточное содержание поглотителя в отработавшем топливе приводит к снижению выгорания выгружаемого топлива. Выгорание выгружаемого топлива будет зависеть от весового содержания эрбия. К тому же наличие эрбия в топливной матрице не ухудшает теплопроводность [13-14].

### **Постановка задачи**

Для расчетных исследований выгорания топлива при частичных перегрузках топлива с выгорающими поглотителями применяется упрощенная модель. Во-первых, рассматриваются перегрузки без перестановок ТВС. В этом случае в активной зоне образуются повторяющиеся структуры, состоящие из ТВС с различными длительностями облучения. Предполагается, что эти структуры образуют периодическую полирешетку в активной зоне. Для простоты коэффициент размножения такой полиячейки представляется в виде среднего арифметического из значений коэффициента размножения каждой отдельной ТВС.

Кроме того, такая же модель используется для расчета коэффициента размножения отдельной ТВС, состоящей из твэгов и твэлов. Предполагается, что ТВС состоит из отдельных полиячеек, в центре каждой из которых находится твэг, а вокруг такое число твэлов, которое в среднем приходится на один твэг. Следовательно, коэффициент размножения ТВС совпадает с коэффициентом размножения выбранных полиячеек. В расчетах рассматривались полиячейки, содержащие один или два ряда твэлов, образующих гексагональную структуру.

Длина кампании реактора определяется исходя из условия, что коэффициент размножения полиячейки из ТВС равен критическому, которое задается из принятого значения утечки нейтронов. Цель исследований – снижение доли избыточной реактивности, компенсируемой системой жидкостного регулирования, путем варьирования количества твэгов и содержания гадолиния и эрбия в них. В этом случае существенно снижается объем ЖРО низкой активности на АЭС с реакторами типа ВВЭР.

### **Расчетный анализ**

Расчеты проводились в программном коде Serpent (2.1.32) с использованием библиотеки ядерных данных ENDFb7 [15].

Для расчетного анализа влияния гадолиниевого поглотителя, интегрированного в твэлах (твэгах), на долю запаса реактивности, компенсируемой жидкостной системой регулирования была принята следующая модель.

1. Рассматривается ТВС с топливом подпитки (модель реактора ВВЭР) с обогащением топлива  $\approx 4,86\%$ .

2. В ТВС выделяется элемент периодичности в центре, которого расположен твэг, а вокруг 1 или 2 слоя твэлов. Первый случай относится к варианту с большим числом твэгов (1:6), а второй к малому числу твэгов (1:18) (рис. 1).

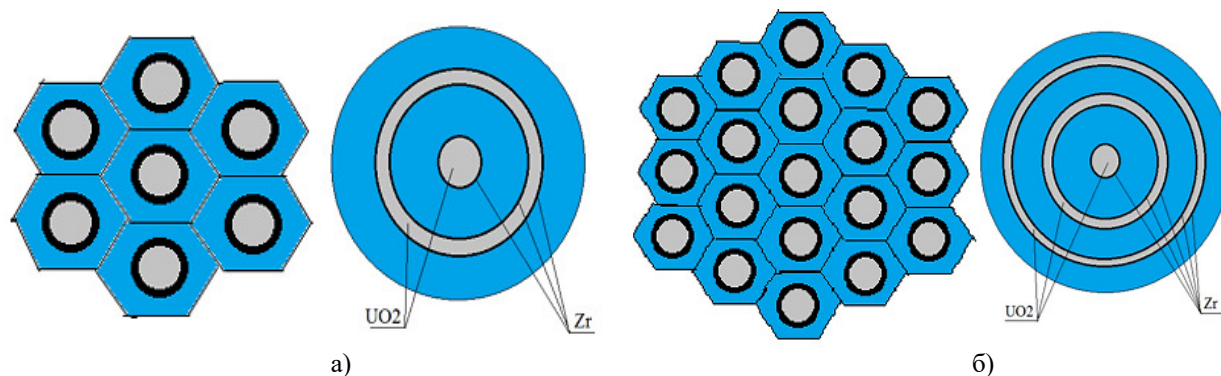


Рисунок 1 – Варианты расположения твэгов: а) вариант с большим числом твэгов (1:6); б) варианты с малым числом твэгов (1:18) [Options of the location of fuel rods with burnable absorbers (gadolinium fuel rods): а) a variant with a large number of gadolinium fuel rods (1:6); б) variants with a small number of gadolinium fuel rods (1:18)]

3. Выделенный элемент периодичности заменяется кольцевой системой состоящей из слоев топлива (урана), оболочки твэлов и слоев теплоносителя. Такая модель была реализована в программе SERPENT.

4. Меняя загрузку Gd в твэг в диапазоне 1,5-7,5% (весовых) рассчитывается зависимость  $K_{\infty}^{TBC}(t)$ .

5. Предполагая трехкратную частичную перегрузку, находим длительность кампании реактора для каждой зависимости по формуле (1):

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

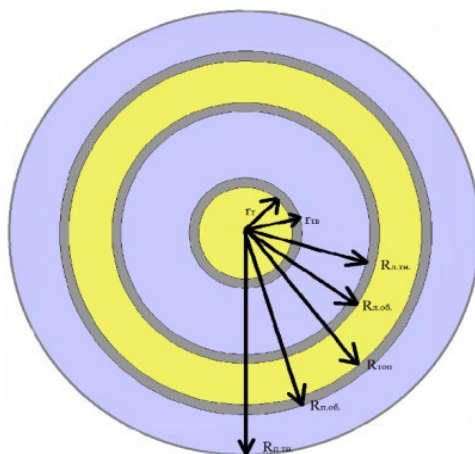
$$0 < t < T$$

В конце кампании  $K_{\infty}^{POLY}(T) = K_{\infty}^{CRIT} = 1,05$  из этого соотношения находится длина одной кампании. Здесь введены следующие обозначения:

$K_{\infty}^{POLY}(t)$  – коэффициент размножения полиячейки;  
 $K_{\infty}^{TBC}(t)$  – коэффициент размножения ТВС;  
 $K_{\infty}^{CRIT}$  – критическое значение коэффициента размножения;  
 $K_{\infty}^{ЯЧ}(t)$  – зависимость для ячейки периодичности в ТВС, то есть для слоеной цилиндрической ячейки.

6. Поскольку в ТВС также выбрана ячейка периодичности, то  $K_{\infty}^{TBC}(t) = K_{\infty}^{ЯЧ}(t)$ .

Геометрические размеры различных слоев выбранной элементарной ячейки определяются из условия сохранения площадей топлива, оболочек и замедлителя. В этом случае сохраняется и водо-топливное соотношение в гексагональной и цилиндризованной ячейках. На рисунке 2 представлено расположение характерных радиусов кольцевой системы для варианта с большим количеством твэгов (1:6).



## Анализ полученных результатов

График зависимости коэффициента  $K_\infty$  от времени в сутках. Показаны три варианта: 1 ТВЭЛ (синяя линия с квадратами), 1 слой (1:6) (оранжевая линия с ромбами) и 2 слоя (1:18) (красная линия с треугольниками). Все варианты показывают монотонное уменьшение  $K_\infty$  с течением времени, причём вариант с 2 слоями имеет наименьшие значения.

Время, суток	1 ТВЭЛ	1 слой (1:6)	2 слоя (1:18)
0	1,34	1,33	1,32
100	1,29	1,28	1,27
200	1,26	1,25	1,24
300	1,23	1,22	1,21
400	1,20	1,19	1,18
500	1,17	1,16	1,15
600	1,14	1,13	1,12
700	1,11	1,10	1,09
800	1,08	1,07	1,06
900	1,05	1,04	1,03
1000	1,02	1,01	1,00
1100	0,99	0,98	0,97
1200	0,96	0,95	0,94
1300	0,93	0,92	0,91
1400	0,90	0,89	0,88

Как видно из рисунка 3, значение  $K_{\infty}^{\text{ТВС}}(t)$  без поглотителя для вариантов с одним слоем вокруг твэла (1:6) и с двумя слоями вокруг твэла (1:18) совпали со значением для одиночной ячейки (один твэл). Это подтверждает правильность радиусов слоев для двух вариантов.

Для сравнения вначале рассмотрим вариант без выгорающих поглотителей, в котором считается, что вся избыточная реактивность должна компенсироваться только жидкостной системой. Продолжительность одной кампании при трёхкратной перегрузке для топлива без выгорающих поглотителей составила 480 суток.

Рассмотрим случай, когда один ТВЭГ окружен 18-ю ТВЭлами (малое число ТВЭгов), а весовое содержание гадолиния в ТВЭге принимается равным 3%, 5% и 7,5%. В этом случае каждый ТВЭГ можно представить, как орган регулирования (сильный поглотитель) и поэтому зависимость изменения  $K_{\infty}^{TBC}(t)$  будет близка к линейной, как и для варианта без поглотителей (рис. 4). Чем больше гадолиния в ТВЭге, тем ниже начальное значение  $K_{\infty}^{TBC}(0)$  и при этом выгорание выгружаемого топлива практически не меняется. Особо отметим случай при весовой загрузке гадолиния в 7,5%, для

которого  $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$  за первую кампанию практически не меняется  $K_{\infty}^{\text{TBC}}(0) \approx K_{\infty}^{\text{TBC}}(T)$  то есть топливо и гадолиний выгорают примерно с одной скоростью.

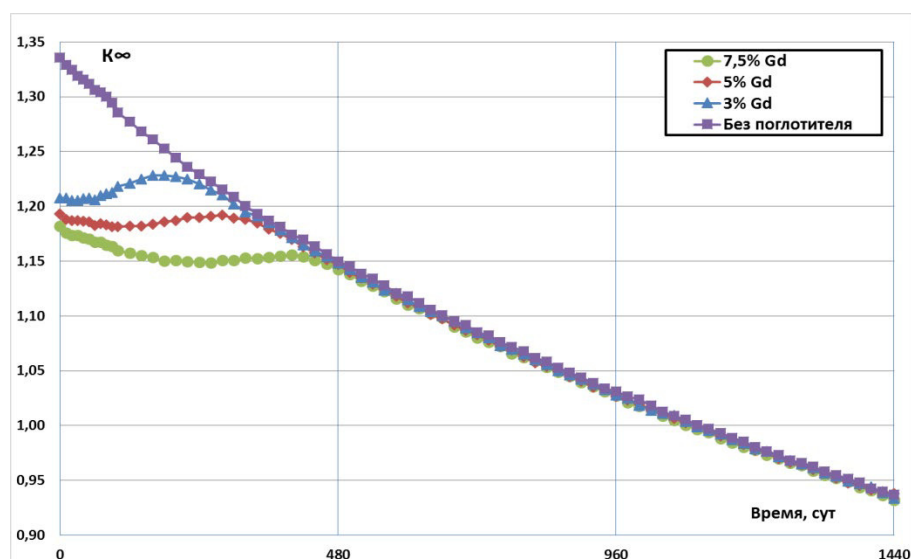


Рисунок 4 – Зависимости  $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$  для случая с меньшим числом ТВЭгов (1:18) [Dependencies  $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$  for the case with a smaller number of gadolinium fuel rods (1:18)]

Отметим, что количество гадолиния в ТВЭге оказывает слабое влияние на выгорание топлива. При увеличении начальной концентрации гадолиния уменьшается кампания реактора, так для варианта с 7,5% содержанием гадолиния кампания составила 440 суток. Для вариантов 5% и 3%, 450 и 460 суток, соответственно, чем меньше концентрация гадолиния, тем быстрее происходит его разблокирование. В варианте с 3% содержанием гадолиний практический выгорел по истечении 300 суток, далее график  $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$  совпал с графиком для варианта без поглотителя. Аналогичный показатель для 5% и 7,5% содержания составил 360 суток и 480 суток соответственно.

Для случая, когда ТВЭг окружен одним слоем ТВЭлов (большое число ТВЭгов 1:6) требуется меньше загрузки гадолиния в ТВЭг, поэтому, начальное значение  $K_{\infty}^{\text{TBC}}(0)$  существенно снижается, но затем идет интенсивное разблокирование гадолиния и зависимость  $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$  начинает возрастать (выбег реактивности) (рис. 5). На рисунке 6 приведены аналогичные зависимости для случая, когда в каждый ТВЭл загружается одинаковое весовое количество эрбия без гадолиния.

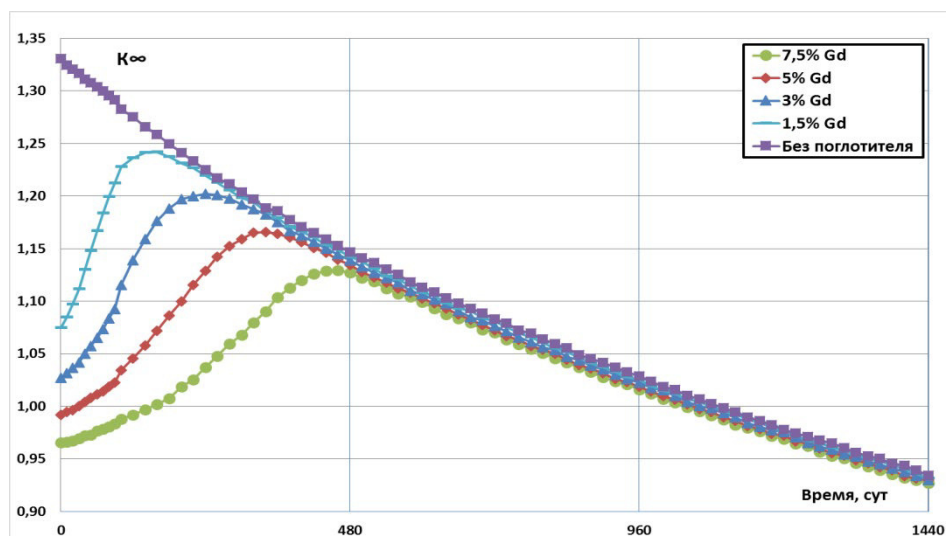


Рисунок 5 – Зависимости  $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$  для случая с большим числом ТВЭгов (1:6) [Dependencies  $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$  for the case with a large number of gadolinium fuel rods (1:6)]

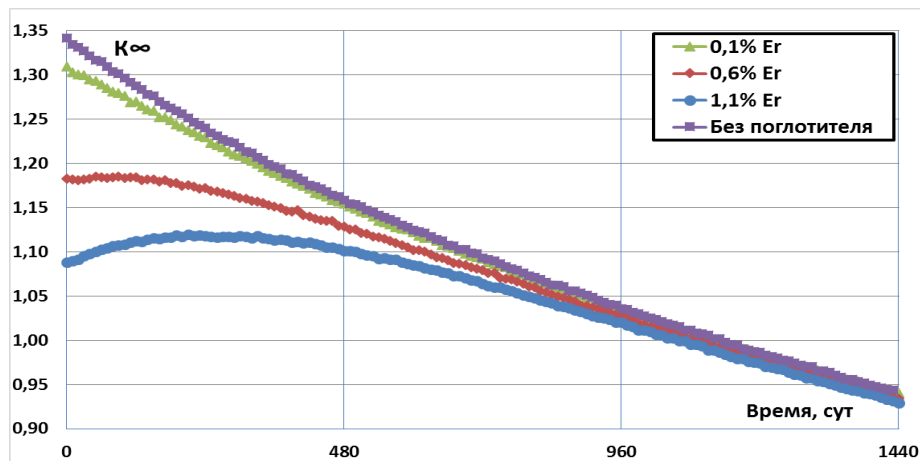


Рисунок 6 – Зависимости  $K_{\infty}^{TBC}(t)$  для случая с эрбием [Dependencies of  $K_{\infty}^{TBC}(t)$  for the case of erbium]

Для оценки остаточного запаса реактивности, который необходимо компенсировать жидкостной системой, были проведены расчеты изменения величины  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  за одну кампанию (см. рис. 9-11). С целью убедиться в достоверности значений  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  полученных при помощи формулы (1). Был проведен расчет  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  для трёх ТВС с чистым топливом без выгорающего поглотителя с различной кампанией (рис. 7). ТВС желтого цвета это свежее топливо не выгоревшее ни одной кампанией, ТВС оранжевого цвета это топливо выгоревшее одну кампанию и наконец ТВС красного цвета это топливо выгоревшее 2 кампании. В расчете все три ТВС горели одну кампанию (480 суток). В результате чего, получаются ТВС с одной (желтая), двумя (оранжевая) и тремя (красная) кампаниями. Проведено сравнение полученного значения  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  со значением, рассчитанным по формуле (1) для слоистой системы (рис. 8).

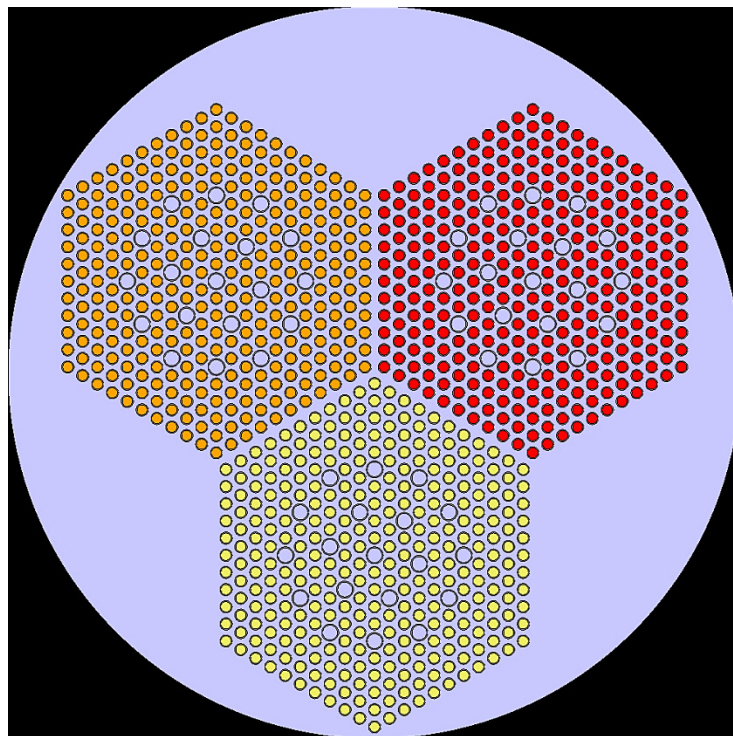


Рисунок 7 – Расчетная модель 3 ТВС с различными кампаниями [Calculation model of 3 fuel assemblies with various companies]



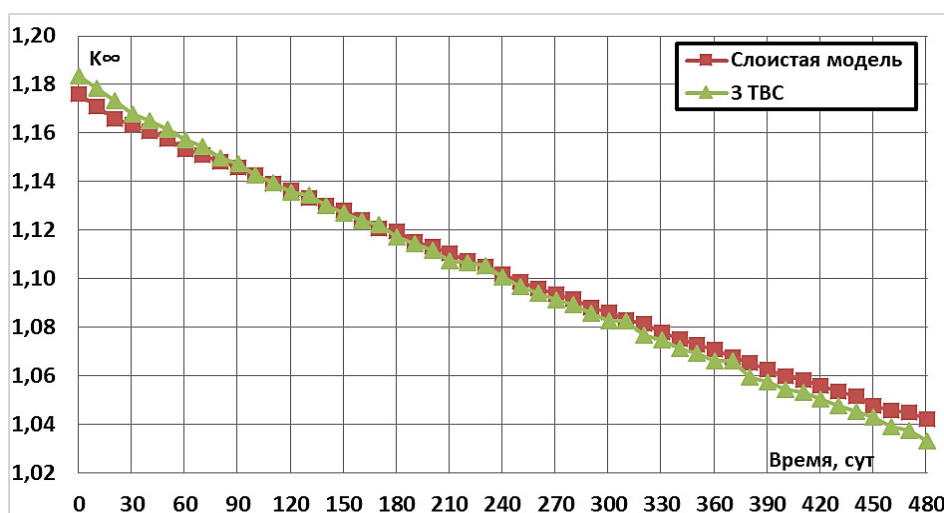


Рисунок 8 – Зависимости  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  для слоистой модели и расчетной модели с тремя ТВС [Dependencies of  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  for a layered model and a computational model with three fuel assemblies]

По рисунку 8 видно, что расчетное значение  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  и значение рассчитанное по формуле (1) совпадают. Это наглядно демонстрирует, что в «для простоты» расчетов  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  можно пользоваться формулой (1).

Для варианта с малым числом ТВЭгов эти зависимости подобны зависимостям для варианта без поглотителя (рис. 9). Снижение максимального значения избыточной реактивности происходит при увеличении весового содержания гадолиния в ТВЭге в результате снижения величины  $K_{\infty}^{POLY}(0)$ . Это значит, что максимальный остаточный запас реактивности оказывается в начале кампании.

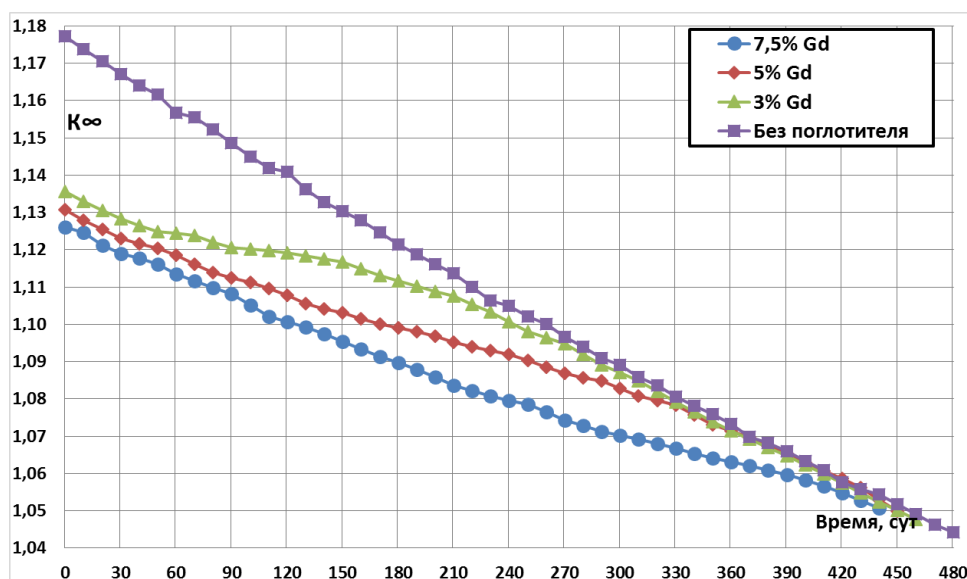


Рисунок 9 – Зависимости  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  для варианта с меньшим количеством ТВЭгов (1:18) за одну кампанию [Dependencies of  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  for the variant with fewer gadolinium fuel rods (1:18) in one campaign]

Для варианта с большим числом ТВЭгов зависимость  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  имеет принципиально другой характер, типа параболической зависимости. Это приводит к тому, что максимальный остаточный запас реактивности сдвигается по времени от начала кампании. Сама эта величина тем меньше, чем больше гадолиния в ТВЭгах, как это имеет место и для варианта с малым числом ТВЭгов. Однако увеличение весового содержания гадолиния в ТВЭгах в этом случае в большей степени снижает выгорание топлива (рис. 10).

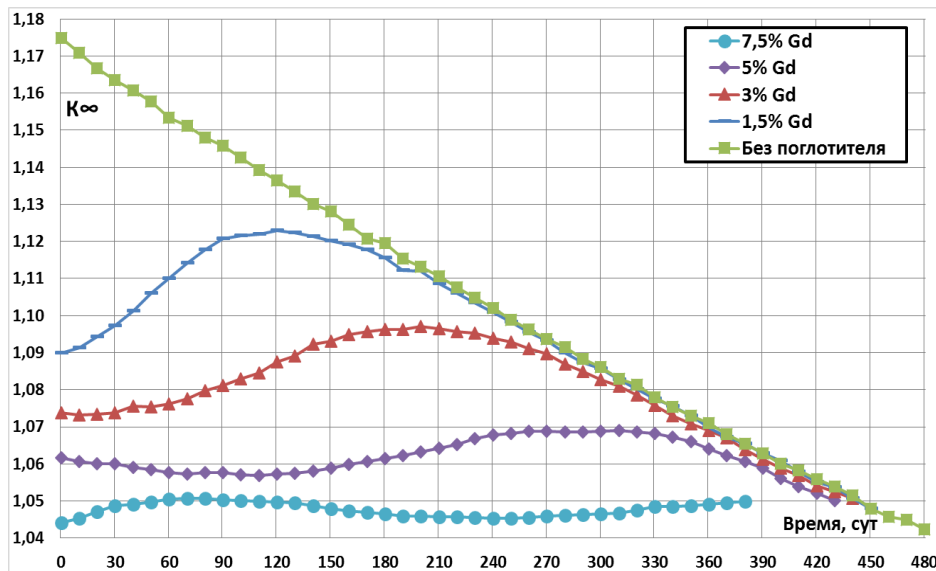


Рисунок 10 – Зависимости  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  для варианта с большим количеством ТВЭГов (1:6) за одну кампанию  
[Dependencies  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  for a variant with a large number of gadolinium fuel rods (1:6) in one campaign]

При замене гадолиния эрбием его можно размещать во всех ТВЭлах, то есть в этом случае образуется однородная загрузка ТВС. Поэтому расчет выгорания можно осуществлять на одной элементарной ячейке, либо в слоистой макроячейке заменить ТВЭГ на ТВЭЛ с эрбием. На рисунке 11 приведены графики зависимости  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  при различных весовых содержаниях эрбия в ТВЭлах. Содержание эрбия в топливе варьировалось в диапазоне 0,1-1,1% весовых. Все эти зависимости носят почти линейный характер, с максимальным значением в начале кампании. Это связано с тем, что эрбий слабый поглотитель, именно поэтому увеличение содержания эрбия в ТВЭлах существенно снижает выгорание топлива. Так, например, при весовом содержании эрбия в 1,1% выгорание выгружаемого топлива снизилось на 20%. Но при этом некомпенсированный запас реактивности снизился до величины 0,04, в то время как для варианта без выгорающего поглотителя он составляет примерно 0,13.

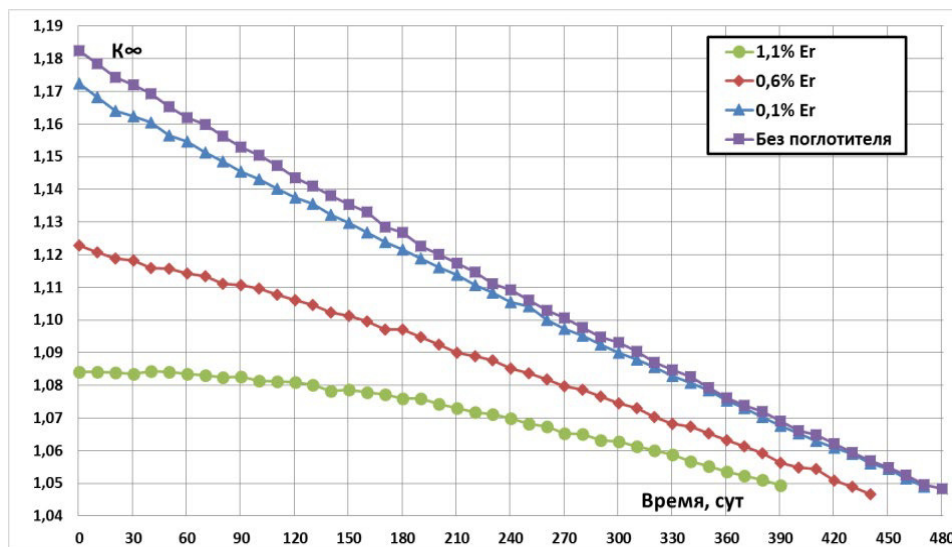


Рисунок 11 – Зависимости  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  для эрбия за одну кампанию при 3-х кратной перегрузке  
[Dependencies  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  for erbium in one campaign with 3-fold refueling]

Поскольку у каждого поглотителя имеются как преимущества, так и недостатки, и не один из них не имеет подавляющего преимущества, то вполне допустимо



использование смешанных вариантов, когда-либо к гадолинию добавляется небольшое количество эрбия в твэлах, либо к твэлам с эрбием добавляется гадолиний в виде твэгов с небольшим содержанием гадолиния.

При проведении расчетных исследований были выбраны относительно небольшие концентрации гадолиния 1,5% и 3%, а содержание эрбия при этом варьировалось от 0,1–0,5%. Для данных концентраций оптимальным является вариант с большим количеством твэгов (1:6). Результаты расчетов приведены на рисунках 12 и 13.

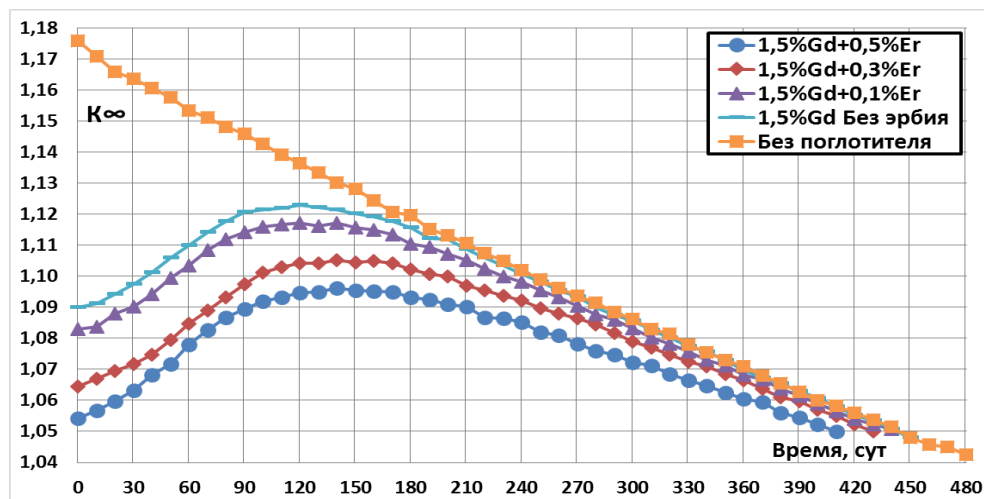


Рисунок 12 – Зависимости  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  для смешанных выгорающих поглотителей за одну кампанию при 3-х кратной перегрузке [Dependencies  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  for mixed burnable absorbers in one campaign at 3-fold refueling]

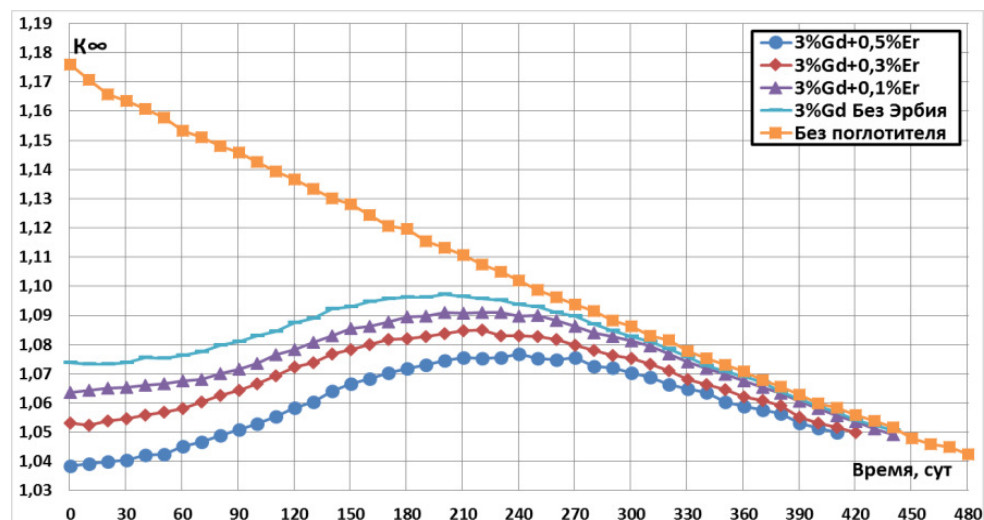


Рисунок 13 – Зависимости  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  для смешанных выгорающих поглотителей за одну кампанию при 3-х кратной перегрузке [Dependencies  $K_{\infty}^{POLY}(t)$  for mixed burnable absorbers in one campaign at 3-fold refueling]

### Обсуждение результатов

Рассчитаем максимальные значения некомпенсированной реактивности по формуле (2):

$$\rho = \frac{\max K_{\infty}^{POLY}(t) - K_{\infty}^{CRIT}}{\max K_{\infty}^{POLY}(t)}, \quad (2)$$

где  $\max K_{\infty}^{POLY}(t)$  – максимальное значение коэффициента размножения полиячейки.

Результаты максимального значения некомпенсированного запаса реактивности для всех рассматриваемых вариантов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Максимальные значения некомпенсированной реактивности для всех вариантов [Maximum values of uncompensated reactivity for all variants]

№	Вариант	$\max K_{\infty}^{POLY}(t)$	$K_{\infty}^{CRIT}$	$\rho$
1	Без поглотителей	1,176	1,05	0,107
Варианты с меньшим количеством ТВЭгов (1:18)				
2	3% Gd	1,136	1,05	0,0757
3	5% Gd	1,131	1,05	0,0716
4	7,5% Gd	1,126	1,05	0,0675
Варианты с большим количеством ТВЭгов (1:6)				
5	1,5% Gd	1,123	1,05	0,0650
6	3% Gd	1,097	1,05	0,0428
7	5% Gd	1,069	1,05	0,0178
	7,5% Gd	1,051	1,05	0,00095
Варианты с эрбием				
8	0,1% Er	1,172	1,05	0,1162
9	0,6% Er	1,123	1,05	0,0695
10	1,1% Er	1,084	1,05	0,0324
Варианты с большим количеством ТВЭгов (1:6) со смешанными поглотителями				
11	1,5% Gd+0,1% Er	1,117	1,05	0,0599
12	1,5% Gd+0,3% Er	1,105	1,05	0,0498
13	1,5% Gd+0,5% Er	1,096	1,05	0,0420
14	3% Gd+0,1% Er	1,091	1,05	0,0376
15	3% Gd+0,3% Er	1,085	1,05	0,0323
16	3% Gd+0,5% Er	1,077	1,05	0,0251

Полный запас реактивности  $\rho$  для рассматриваемого топливного цикла с трехкратной перегрузкой и начальным обогащением топлива подпитки  $x=4,86\%$ , составляет 0,11. Для вариантов с двумя слоями ТВЭлов вокруг ТВЭга некомпенсированный запас реактивности слабо зависит от весового содержания гадолиния в ТВЭгах и составляет 63% от полного запаса реактивности на выгорание. При увеличении числа ТВЭгов в ТВС некомпенсированный запас реактивности снижается по мере увеличения содержания гадолиния в ТВЭгах и достигает 17% от полного запаса реактивности для весового содержания гадолиния в 5%.

При использовании эрбия в качестве выгорающего поглотителя некомпенсированный запас реактивности уменьшается с ростом весового содержания эрбия в ТВЭлах и минимальное значения достигает величины 30% от полного запаса реактивности при весовом содержании эрбия 1,1%, но при этом потеря в выгорании составляет около 20%.

Одновременное применение гадолиния и эрбия уменьшает потерю в выгорании и снижает некомпенсированный запас реактивности. Для варианта 1,5% гадолиния в ТВЭгах оптимальным является вариант с 0,3% эрбия. Так, как начальное значение коэффициента размножения составило 1,063 (то есть близкое к 1,05), некомпенсированная реактивность составляет 46% от полного запаса реактивности, а снижение выгорания 10% (рис. 6). Подобная избыточная реактивность получена и для смеси 1,5% Gd и 0,1% Er, но в этом случае начальное значение  $K_{\infty} \approx 1,08$  (превышает 1,05).

Для варианта с содержанием гадолиния в ТВЭгах 3%, оптимальным является вариант 3% Gd и 0,1% Er. Так, как в этом варианте начальное значение  $K_{\infty}$  составило 1,062 (близкое к  $K_{\infty}^{CRIT} = 1,05$ ), потери в выгорание в отличии от варианта без поглотителя составило 8% и доля некомпенсированной реактивности составила 35%. Примерно такая же доля некомпенсированной реактивности получена и для варианта

3% Gd и 0,3% Er, к тому же начальное значение  $K_{\infty} = K_{\infty}^{CRIT}$ . Но потери в выгорании составляют 13%.

### Заключение

В данной работе исследовалось влияние выгорающих поглотителей, таких как природный гадолиний и эрбий, на долю запаса реактивности, которая может быть скомпенсирована при их использовании. Варьируя весовое содержание выгорающего поглотителя в топливе и его размещение в ТВС, можно существенно снизить некомпенсированный запас реактивности для снижения объема жидкостного регулирования в реакторах типа ВВЭР.

Расчетным путем на упрощенной модели частичных перегрузок топлива (трехкратная перегрузка) было показано, что при использовании гадолиния удастся скомпенсировать 80% запаса реактивности, если применять стратегию увеличения числа твэгов при сокращении весового содержания гадолиния в твэгах. При этом оказывается, что максимум реактивности будет достигаться не в начале кампании, как это имеет место в настоящее время, а ближе к середине кампании. Следовательно, в начале кампании содержание борного поглотителя минимально. Тогда необходимо менять режим жидкостного регулирования, так как бор выгорает медленнее чем топливо, то в первой половине кампании необходимо добавлять бор в теплоноситель, а во второй половине – выводить бор из теплоносителя. В результате водообмен за всю кампанию должен снизиться, поскольку максимальная концентрация бора для этих вариантов снижается.

Для чисто эрбиевого поглотителя такой же результат достигается при увеличении весового содержания эрбия во всех твэлах, но при этом существенно понижается выгорание выгружаемого топлива. Однако, снижение выгорания топлива сопровождается уменьшением коэффициента неравномерности энерговыделения в активной зоне. Применяя перестановки при перегрузках ТВС определенного типа можно частично скомпенсировать проигрыш в выгорании, например, увеличивая долю свежих ТВС загружаемых в центральную часть активной зоны.

Одновременное применение гадолиния и эрбия позволяет снизить проигрыш в выгорании за счет неполного сгорания эрбия и существенно снизить весовое содержание гадолиния в твэге, что не потребует снижения обогащения топлива в твэгах.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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. Vol.75. Issue 2. P. 127-133. Published online: 10 May 2017. doi: 10.13182/NT86-A33855
2. Frybortova L. VVER-1000 fuel cycles analysis with different burnable absorbers. Nuclear engineering and design. 2019. Vol.351. P. 167-174.
3. Khoshaval F., Foroutan Sh. Sh., Zolfaghari A., Minuchehr H. Evaluation of burnable absorber rods effect on neutronic performance in fuel assembly of WVER-1000 reactor. Annals of nuclear Energy. 2016. Volume 87. P. 648-658.
4. Khrais R.A., Tikhomirov G.V., Saldikov I.S. and Smirnov A.D. Neutronic analysis of VVER-1000 fuel assembly with different types of burnable absorbers using Monte-Carlo code Serpent. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1189 (2019). P. 1-14. – doi: 10.1088/1742-6596/1189/1/012002
5. Музафаров, А.Р. Сопоставительный анализ выгорающих поглотителей нейтронов на основе эрбия и гадолиния в реакторах типа ВВЭР с удлиненными кампаниями / А.Р. Музафаров, В.И. Савандер // Сборник докладов XVIII Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики», Россия, Волгодонск, 19 – 20 май. – Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2022. – С. 19.
6. Абу Сондос, М.А. Снижение объема борного регулирования запаса реактивности при использовании выгорающего поглотителя на основе (Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) в топливе реактора ВВЭР-1200 /

- М.А. Абу Сондос, В.М. Демин, В.И. Савандер // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 3(32). – С. 56.
7. Демин, В.М. Влияние выгорающих поглотителей (GD и EU) на нейтронно физические характеристики ТВС реакторов ВВЭР-1000/ В.М. Демин, В.И. Савандер, М.А. Абу Сондос // Ростовский научный журнал. – 2019. – № 3. – С. 262.
  8. M.A. Abu Sondos, V. M. Demin and V.I. Savander The effect of burnable absorbers (Gd and Eu) on the neutron-physical characteristics of fuel assemblies of VVER-1000. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1189 (2019). – P. 1-14. – doi: 10.1088/1742-6596/1189/1/012003
  9. Стогов, Ю.В. Перспективные технологии использования оксидного уран-гадолиниевого топлива в легководных реакторах / Ю.В. Стогов, Н.И. Белоусов, В.И. Савандер [и др.] // Материалы XIV семинара по проблемам физики реакторов. – Москва : МИФИ, 2006. – С.45-47.
  10. Ермолин, В.С. О размещении гадолиния в центральном отверстии ТВЭЛов водо-водяных реакторов / В.С. Ермолин, В.С. Окунев // Научная сессия МИФИ. – Москва : МИФИ, 2008. – С. 101.
  11. Андрушечко, С.А. ВВЭР-1200: эволюция классики. Физические основы эксплуатации, системы и элементы, ядерное топливо, безопасность : монография / С.А. Андрушечко, Б.Ю. Васильев, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, А.Ю. Кучумов, В.Ф. Украинцев, Б.Ю. Фаворов. – Москва : Логос, 2019. – 672 с.
  12. Balestieri D.A. Study of  $\text{UO}_2/\text{Gd}_2\text{O}_3$  Composite fuel. IAEA-TECDOC-1036. Vienna (Austria). 1998. P. 63-72.
  13. Fedosov A.M. RBMK Uranium-Erbium Fuel / A.M. Fedosov // Atomic Energy. – 2018. – Vol. 124. – № 4. – P. 221-226.
  14. Альассаф, С.Х. Использование эрбия в качестве выгорающего поглотителя в реакторах типа ВВЭР при работе на удлинённых кампаниях / С. Х. Альассаф, В. И. Савандер, А. А. Хассан // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2020. – № 3. – С. 62-71.
  15. J. Leppänen. Serpent – a Continuous – energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. VTT Technical Research Centre of Finland. (June 18, 2015).

## REFERENCES

- [1] A. Galperin, M. Segev, A. Radkowsky. – Substitution of the Soluble Boron Reactivity Control System of a Pressurized Water Reactor by Gadolinium Burnable Poisons. Nuclear Technology. – 1986. – Volume 75, Issue 2. – P. 127-133. Published online: 10 May 2017 (in English). – doi: 10.13182/NT86-A33855
- [2] L. Frybortova VVER-1000 fuel cycles analysis with different burnable absorbers. Nuclear engineering and design. – 2019. – Volume 351. – P. 167-174 (in English).
- [3] F. Khoshaval, Sh. Sh. Foroutan, A. Zolfaghari, H. Minuchehr. Evaluation of burnable absorber rods effect on neutronic performance in fuel assembly of WVER-1000 reactor. Annals of nuclear Energy. – 2016. – Volume 87. – P. 648-658 (in English).
- [4] R.A. Khrais, G.V. Tikhomirov, I.S. Saldikov and A.D. Smirnov. Neutronic analysis of VVER-1000 fuel assembly with different types of burnable absorbers using Monte-Carlo code Serpent. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1189 (2019). – P.1-14 (in English). – doi: 10.1088/1742-6596/1189/1/012002
- [5] Muzaфаров A.R., Savander V.I. Sopostavitel'nyy analiz vygorayushchikh poglotiteley neytronov na osnove erbiya i gadoliniya v reaktorakh tipa VVER s udlinennymi kampaniyami [Comparative Analysis of Burnable Neutron Absorbers Based on Erbium and Gadolinium in WVER type Reactors with Extended Runs]. Sbornik dokladov XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Bezopasnost' yadernoj energetiki», Rossiya, Volgodonsk, 19 – 20 maj [Collection of Reports of the XVIII International Scientific and Practical Conference «Safety of Nuclear Energy»]. Russia, Volgodonsk: VETI NRNU MEPhI, 2022. P.19-21 (in Russian).
- [6] Abu Sondos M.A., Demin V.M., Savander V.I. Snizheniye ob'yema bornogo regulirovaniya zapasa reaktivnosti pri ispol'zovanii vygorayushchego poglotitelya na osnove (GD<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) v toplive reaktora VVER-1200 [Decrease the Volume of Boric Regulation of the Reactivity when Using the Burnable Absorber on the Basis of (Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) in the Fuel Reactor WVER-1200]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2019. №3(32). P.56-65 (in Russian).
- [7] Demin V.M., Savander V.I., Abu Sondos M.A. Vliyaniye vygorayushchikh poglotiteley (Gd i Eu) na neytronno fizicheskiye kharakteristiki TVS reaktorov VVER-1000 [The Effect of Burnable Absorbers (Gd and Eu) on the Neutron-Physical Characteristics of Fuel Assemblies of WVER-1000 Reactors]. Rostovskiy nauchnyy zhurnal [Rostov Scientific Journal]. 2019. №3. P.262-272 (in Russia).

- [8] M.A. Abu Sodos, V.M. Demin, V.I. Savander. The effect of burnable absorbers (Gd and Eu) on the neutron-physical characteristics of fuel assemblies of VVER-1000. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1189 (2019). – P.1-14 (in English). – doi: 10.1088/1742-6596/1189/1/012003
- [9] Stogov Yu.V., Belousov N.I. Savander V.I. et al. Perspektivnyye tekhnologii ispol'zovaniya oksidnogo uran-gadoliniyevogo topliva v legkovodnykh reaktorakh [Promising Technologies for Using Oxide Uranium-Gadolinium Fuel in Light Water Reactors]. Materialy XIV seminar po problemam fiziki reaktorov [Proceedings of the XIV Seminar on Problems of Reactor Physics]. Moscow: MEPhI, 2006. P.45-47 (in Russian).
- [10] Yermolin V.S., Okunev V.S. O razmeshchenii gadoliniya v tsentral'nom otverstii TVELov vodo-vodyanykh reaktorov [Placement of Gadolinium in the Central Hole of Fuel Elements of Pressurized Water Reactors]. Nauchnaya sessiya MIFI [Scientific Session of MEPhI]. Moscow: MEPhI 2008. P.101 (in Russian).
- [11] Andrushechko S.A., Vasil'yev B.Yu., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Kuchumov A.Yu., Ukrainsev V.F., Favorov B.Yu. VVER-1200: evolyutsiya klassiki. Fizicheskiye osnovy ekspluatatsii, sistemy i elementy, yadernoye toplivo, bezopasnost': monografiya [WWER-1200: the Evolution of the Classics. Physical Foundations of Operation, Systems and Elements, Nuclear Fuel, Safety: monograph]. Moscow: Logos, 2019. P.672 (in Russian).
- [12] Balestieri D.A. Study of  $\text{UO}_2/\text{Gd}_2\text{O}_3$  Composite fuel. IAEA-TECDOC-1036. Vienna (Austria). 1998. – P.63-72 (in English).
- [13] Fedosov A.M. RBMK Uranium-Erbium Fuel. Atomic Energy. 2018. – Vol.124. – №.4. – P.221-226 (in English).
- [14] Alassaf S.H., Savander V.I., Hassan A.A. Ispol'zovaniye erbiya v kachestve vygorayushchego poglotitelya v reaktorakh tipa VVER pri rabote na udlinennykh kampaniyakh [The Use of Erbium as a Burnable Absorber in WWER-type Reactors during Operation on Extended Campaigns]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernaya Energetika [News of Higher Education Institutions. Nuclear power engineering]. 2020. №3. P.62-71 (in Russian).
- [15] J. Leppänen. Serpent – a Continuous – energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. VTT Technical Research Centre of Finland (June 18, 2015) (in English).

## The Use of Burnable Poisons in WWER-type Reactors to Reduce the Fraction of the Reactivity Margin Compensated by the Liquid System During Extended Runs

Anvar R. Muzafarov<sup>1</sup>, Vladimir I. Savander<sup>2</sup>

*National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409  
<sup>1</sup>anvar1996@yandex.ru, <sup>1</sup>ORCID iD: 0000-0001-5292-2697, WoS Researcher ID: CAH-1551-2022  
<sup>2</sup>visavander@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0001-9309-5616, WoS Researcher ID: ABG-3490-2021*

*Received by the editorial office on 12/05/2022*

*After completion on 17/05/2022*

*Accepted for publication on 23/05/2022*

**Abstract.** The paper presents the results of a computational and theoretical analysis of the use of various burnable poisons placed in a fuel rod for the maximum reduction in the reactivity margin compensated by a liquid system based on a boron absorber for WWER-type reactors operating in extended campaigns. Various layouts of fuel rods placement in fuel assemblies and with different concentrations of burnable poisons are considered, which are considered natural gadolinium and erbium. The analysis is carried out using simplified models of fuel burnup at partial refueling.

**Keywords:** Burnable absorber (BP), polycell, WWER, Serpent, multiplication factor ( $K_\infty$ ), excess reactivity, gadolinium, fuel rod, erbium, boron regulation.

**For citation:** Muzafarov A.R., Savander V.I. The use of burn-out absorbers in WWER-type Reactors to reduce the proportion of reactivity reserve compensated by a Liquid system during extended Campaigns // Global nuclear safety. 2022. Vol. 2(43). P. 42-54. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-02-05>