
**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.039.536

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДИАПАЗОНА СПЕКТРАЛЬНОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ В РЕАКТОРАХ С
ВОДОЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ ЦИРКОНИЕВЫХ
ВЫТЕСНИТЕЛЕЙ ДЛЯ УРАНОВОГО И ТОРИЕВОГО
ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ**© 2021 А.И. Элазака^{*, **}, В.И. Савандер^{**}, Г.В. Тихомиров^{**}^{*}Кафедра физики, факультет наук, Университет Аль-Азхар, 11884, Наср-Сити, Каир, Египет^{**}Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Компенсация избыточной реактивности в реакторах с водой под давлением типа ВВЭР осуществляется с помощью сильных поглотителей нейтронов. Это приводит к непроизводительному использованию нейтронов, снижению коэффициента воспроизводства и выгорания топлива. В настоящей работе рассматривается один из способов спектрального регулирования запаса реактивности на выгорание путем изменения водо-топливного отношения в процессе выгорания. Для изменения водо-топливного отношения используются цилиндрические пустотелые стержни из циркония, внедряемые в межтрубное пространство ТВС. Расчетные исследования проведены для уран-ториевой топливной загрузки на основе урана-233. Оценен диапазон изменения водо-топливного отношения в зависимости от диаметра внедряемых пустотелых циркониевых стержней. Проведено сравнение с аналогичными расчетами для уранового топлива при условии одинакового весового содержания делящихся изотопов (3.7%). Исследованы концентрации топливных сырьевых и делящихся изотопов в обоих топливных циклах. В топливном цикле Th-U233 при снижении водо-топливного отношения коэффициент накопления делящихся изотопов может достигать 0,75. Проведено сравнение изменения концентрации продуктов деления в обоих топливных циклах. Для всех рассматриваемых значений водо-топливного отношения оценены температурные коэффициенты реактивности по температуре топлива и замедлителя и вес управляющих стержней. Параметры безопасности в топливном цикле Th-U233 имеют более высокие значения, чем в топливном цикле UO₂. Показано, что при одинаковых весовых содержаниях делящегося изотопа в топливе, при внедрении пустотелых Zr-стержней диапазон изменения реактивности больше для топливного цикла с UO₂ по сравнению с его эффектом в топливном цикле Th-U233.

Ключевые слова: Вытеснители воды, коэффициенты реактивности, ВВЭР-1000, ториевый топливный цикл, запас реактивности, спектральное регулирование реактивности.

Поступила в редакцию 24.03.2021

После доработки 15.04.2021

Принята к печати 19.04.2021

Введение

С целью снижения стоимости производимой на АЭС электроэнергии в настоящее время на реакторах типа ВВЭР применяются удлиненные кампании и снижение бесполезного использования нейтронов в выгорающих поглотителях системы компенсации избыточной реактивности. Как известно наибольший запас реактивности реактора реализуется в начале кампании при загрузке свежего топлива. Для его компенсации используются борный поглотитель, растворенный в теплоносителе (жидкостная система) и выгорающие поглотители, внедрённые непосредственно в

твэлы (ТВЭГИ) [1-4]. При больших концентрациях борного поглотителя в теплоносителе плотностной коэффициент реактивности может поменять знак и стать отрицательным. Кроме того, при жидкостном регулировании образуется большое количество низко-активных жидких радиоактивных отходов [3, 5]. Интегрированные выгорающие поглотители на основе гадолиния снижают теплопроводность твэлов и приводят к повышению коэффициента неравномерности энерговыделения внутри ТВС [1, 6]. Следовательно, отказ от традиционных методов компенсации избыточной реактивности и использование избыточных нейтронов для повышения воспроизводства ядерного топлива считаются экономически целесообразными и с точки зрения финансовых затрат на эксплуатацию реактора.

В данной работе исследуется возможность использования спектрального регулирования запаса реактивности на основе изменения водо-топливного отношения путем внедрения пустотелых циркониевых стержней в межтвэльное пространство ТВС реактора типа ВВЭР-1200. Рассматривались различные способы осуществления спектрального регулирования в реакторах с водой под давлением, в том числе и на основе изменения состава теплоносителя-замедлителя для смеси тяжелой и легкой воды [7]. В качестве другого способа реализации спектрального регулирования рассматривалось применение циркониевых вытеснителей замедлителя в активной зоне ВВЭР-1000, для чего циркониевые вытеснители размещались в некоторых направляющих каналах, что позволило увеличить длительность кампании [8]. Исследуется спектральное регулирование с помощью Zr-стержней для модернизированной активной зоны ВВЭР-С с урановым и МОКС-топливом [9]. Использование Zr-стержней в качестве вытеснителей воды изменяет водо-топливное соотношение механическим способом. Реактор ВВЭР-С состоит из множества тепловыделяющих сборок (126 ТВС с Zr-стержнем в качестве вытеснителей воды и 61 ТВС с регулируемыми стержнями). Большое количество тепловыделяющих сборок и снижение удельной энергонапряженности активной зоны позволяют отказаться от компенсации запаса реактивности на выгорание борной кислоты и дают возможность продлить топливный цикл до шести лет со средним выгоранием 50 МВт сут / кг [9].

В работе [10, 11] Zr-стержни размещались в межтвэльном пространстве ТВС ВВЭР-1000, работающего на топливо UO_2 (3,7%). Расход урана-235 уменьшался с присутствием Zr-стержней внутри ТВС, а концентрация изотопов Pu увеличивалась.

При спектральном регулировании избыточные нейтроны поглощаются в сырьевых изотопах, что приводит к повышению наработки делящихся изотопов. В начале цикла с наименьшим водо-топливным отношением в активной зоне избыточные нейтроны поглощаются воспроизводящими изотопами, которые играют роль поглотителей нейтронов, что приводит к более длительному топливному циклу и минимальному количеству используемых поглотителей нейтронов (выгорающих поглотителей и разбавленного бора в замедлителе). Использование тория изучалось в различных типах реакторов [12-14]. Торий считается перспективной альтернативой урану из-за уменьшения запасов урана [15]. Запасы тория в земной коре превышают запасы урана в три раза [16]. Делящийся изотоп урана (U-233) получается в результате поглощения нейтронов торием. Таким образом, использование тория в тепловых реакторах открывает возможность увеличения коэффициента воспроизводства и удлинения топливного цикла [16, 17].

В настоящей работе сравнивается использование Zr-стержней в качестве вытеснителей воды в топливных циклах на основе низкообогащенного урана и уран-ториевого цикла в ТВС ВВЭР-1000. Обогащение делящимся материалом в обоих топливных структурах составляет 3,7%. Zr-стержни располагаются в пространстве между твэлами, а диаметр Zr-стержней варьировался.

Тестовая задача и расчётный код

Размеры ТВС и твэлов такие же, как ТВС реактора ВВЭР-1000 [18]. Расчёты проводились с использованием трёхмерного метода непрерывного переноса нейтронов Монте-Карло по энергии и кода выгорания SERPENT2 версии 2.1.30. SERPENT был разработан в Центре технических исследований Финляндии VTT [19]. SERPENT2 теперь используется для нескольких целей, таких как моделирование традиционных приложений физики реактора, проверка детерминированных транспортных кодов, мультифизическое моделирование, моделирование переноса нейтронов и фотонов для расчёта мощности дозы излучения и т. д.. Количество циклов и нейтронных траекторий $= 2 \times 10^7$. По опыту работы, увеличение этого количества не влияет на погрешность $K_{эфф}$. Статистическая ошибка в $K_{эфф} = 0.0002$

Результаты и обсуждения

Использованию Zr-стержней в качестве вытеснителя воды для управления спектром нейтронов и избыточной реактивностью внутри ядерного реактора уделяется значительное внимание в новых проектах ВВЭР. Основной принцип работы Zr-стержней заключается в том, что в начале цикла реактора эти стержни полностью погружены в активную зону, что значительно снижает ее запас реактивности. Далее, по мере выгорания топлива и снижения реактивности осуществляется постепенное извлечение этих стержней, что приводит к увеличению количества замедлителя в активной зоне и поддерживает реактор в критическом состоянии. Ранее рассматривалось применение вытеснителей воды (Zr-стержней) для регулирования нейтронного спектра и контроля избыточной реактивности в реакторе с водой под давлением (ВВЭР-1000) с традиционным топливным составом (UO_2) с нейтронно-физической точки зрения [10, 11]. Также оценивалось влияние вытеснителей на безопасную работу реактора.

В настоящей работе состав топлива изменён на Th-U233 с таким же обогащением по делящемуся изотопу 3,7%. Цель исследований – оценить зависимость диапазона регулирования водо-топливного отношения от радиуса циркониевого вытеснителя и сравнить эти величины для двух рассматриваемых топливных циклов. На рисунке 1 показана ТВС ВВЭР-1000 с Zr-стержнями разного диаметра, где Zr-стержни вставлены между твэлами.

Расчётные исследования влияния Zr-стержней на размножающие свойства ТВС реактора типа ВВЭР проводились без наличия борного поглотителя в теплоносителе и выгорающих поглотителей в твэлах. В принципе, в реакторах этого типа основная доля начального запаса реактивности топлива на выгорание компенсируется применением частичных перегрузок топлива. Чем выше кратность частичных перегрузок, тем меньше остаточного запаса компенсируется поглотителями, включая и борное регулирование. Диаметр Zr-стержней варьируется от 0 мм до 5,4 мм (максимальный диаметр стержней из Zr, которые могут быть вставлены между твэлами). Максимальный диаметр Zr-стержней зависит от расстояния между твэлами. Предполагается, что Zr-стержни будут непрерывно извлекаться из активной зоны независимо от органов регулирования. При изменении диаметра Zr стержня происходит изменение водо-топливного отношения. В таблице 1 приведены начальные значения коэффициента размножения ТВС ВВЭР-1000 при разных диаметрах Zr-стержней и соответствующее значение водо-топливного отношения.

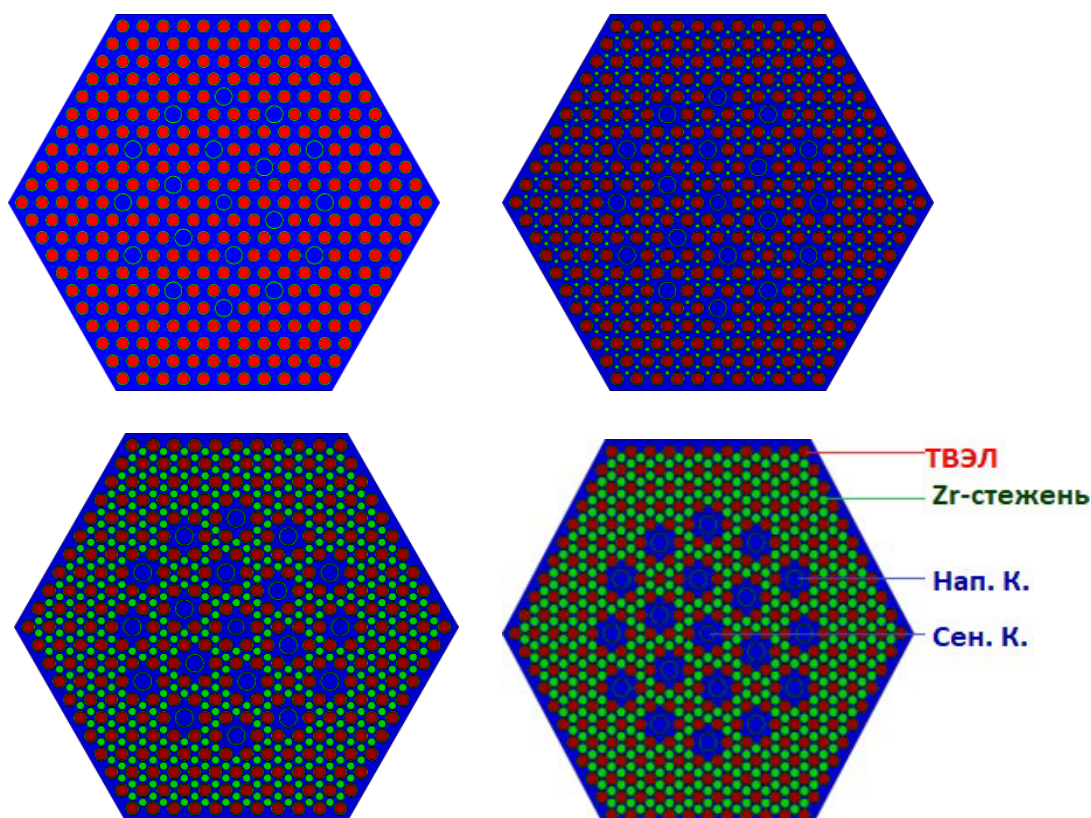


Рисунок 1 – Горизонтальное поперечное сечение SERPENT TBC ВВЭР-1000 с Zr-стержнями разного диаметра, расположенными между твэлами [Horizontal cross-section of SERPENT WWER-1000 fuel assemblies with Zr-rods of different diameters located between the fuel elements]

Таблица 1 – Коэффициент размножения (K_{∞}) в ТБС ВВЭР-1000 при различных значениях водо-топливного отношения для стандартного топливного цикла (UO_2 -3,7%) и торий-уранового топливного цикла (Th-U233 -3,7%) [The multiplication factor (K_{∞}) in WWER-1000 fuel assemblies at different values of the water-fuel ratio for the standard fuel cycle (UO_2 -3,7%) and thorium-uranium fuel cycle (Th-U233 -3,7%)]

Диаметр Zr-стержня (мм)	Водо-топливное отношение	K_{∞} (Состояние горячей нулевой мощности) (UO_2)	K_{∞} (Состояние горячей нулевой мощности) (Th-U233)
0	1,85	1,3608	1,4435
2	1,75	1,3443	1,4330
3	1,62	1,3210	1,4194
4	1,43	1,2857	1,3967
5	1,20	1,2329	1,3615
5,4	1,09	1,2059	1,3416

На рисунках 2 и 3 показано изменение коэффициента размножения (K_{∞}) с выгоранием при различных значениях водо-топливного отношения для обоих топливных структур, UO_2 и Th-U233, соответственно. Введение Zr-стержней в тепловыделяющую сборку снижает количество замедлителя, что приводит к увеличению резонансного поглощения нейтронов на U-238 и снижению вероятности избежать резонансного поглощения. В результате значения K_{∞} уменьшаются с увеличением диаметра Zr-стержня. Согласно представленным результатам по значениям K_{∞} со стержнями и без них, Zr-стержни можно использовать в начале кампании реактора для подавления избыточной реактивности, а затем их постепенно извлекать. Как показано на рисунках 2 и 3, значения K_{∞} в топливном цикле Th-U233 выше, чем в топливном цикле UO_2 .

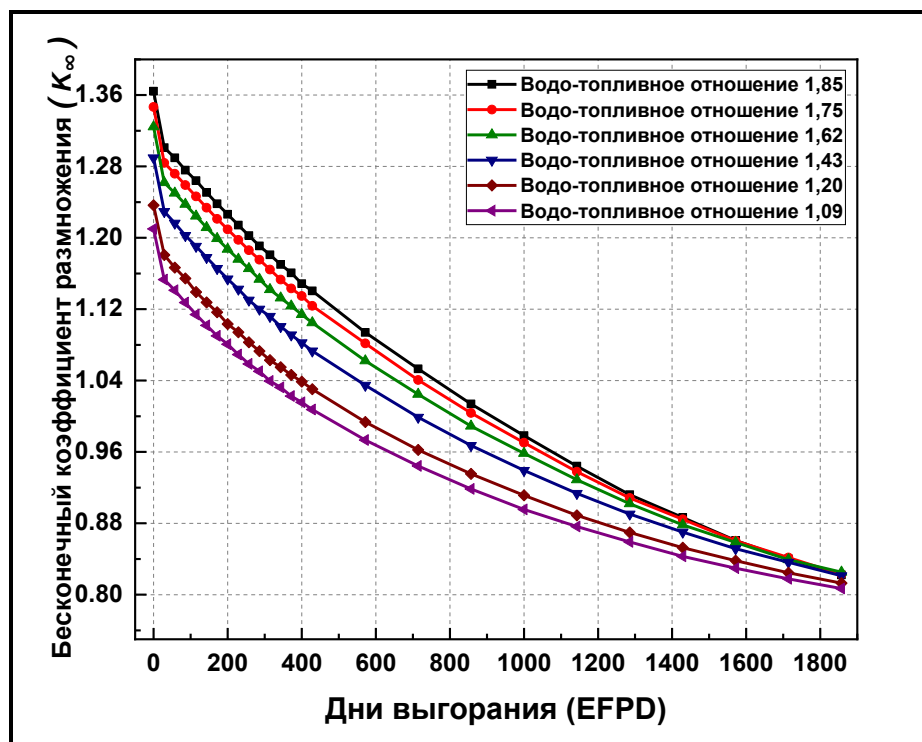


Рисунок 2 – Изменение значений K_{∞} в зависимости от эффективных суток (EFPD) для стандартного топливного цикла (UO_2 -3,7%) [Change in K_{∞} values depending on the effective day (EFPD) for a standard fuel cycle (UO_2 -3,7%)]

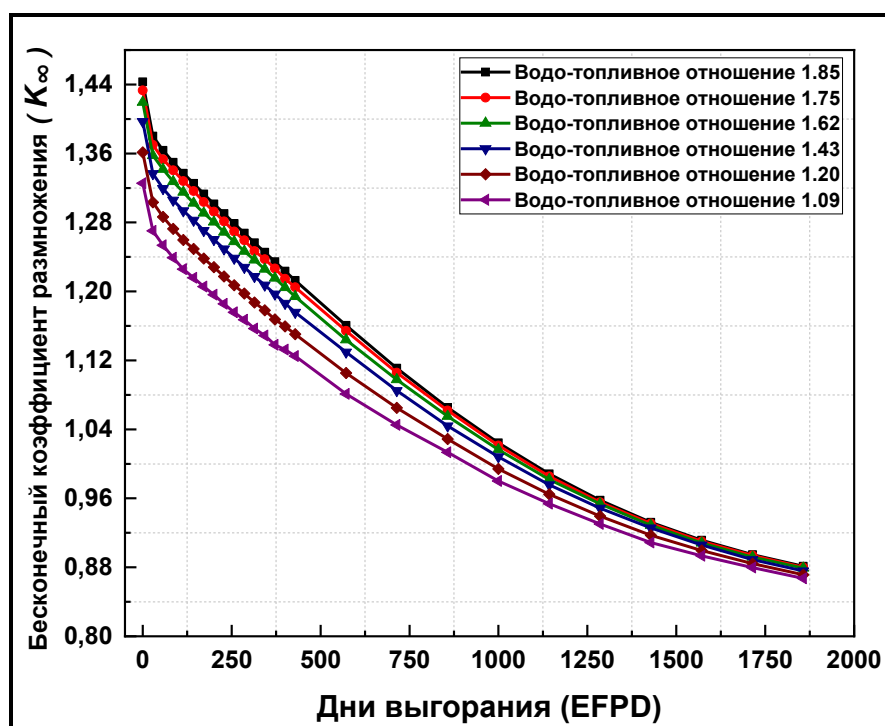


Рисунок 3 – Изменение значений K_{∞} в зависимости от эффективных суток (EFPD) для торий-уранового топливного цикла (Th-U233 -3,7%) [Change in K_{∞} values depending on the effective day (EFPD) for the thorium-uranium fuel cycle (Th-U233 -3,7%)]

В таблице 2 показана разница в коэффициенте размножения для обеих топливных композиций. Zr-стержни как вытеснители воды более эффективны в регулировании реактивности реактора с традиционной структурой топлива (UO_2 -3,7%) ВВЭР-1000 при том же обогащении как показано в таблице 2.

Таблица 2 – Разница бесконечного коэффициента размножения в ТВС ВВЭР-1000 при разных значениях водо-топливного отношения в обоих топливных циклах (UO_2 -3,7% и Th-U233 -3,7%) [Difference in the infinite multiplication factor in WWER-1000 fuel assemblies at different values of the water-fuel ratio in both fuel cycles (UO_2 -3,7% и Th-U233 -3,7%)]

Разница бесконечного коэффициента размножения	водо-топливное отношение				
	1.85 - 1.75	1.75 - 1.62	1.62 - 1.43	1.43 - 1.20	1.20 - 1.09
$\Delta K_{\infty} (\text{UO}_2)$	0,01655	0,03982	0,07517	0,12795	0,15496
$\Delta K_{\infty} (\text{Th-U233})$	0,01053	0,02418	0,04682	0,08203	0,11762

На рисунках 3 и 4 показано изменение концентрации делящегося материала (U-235 и U-233, соответственно) в обоих топливных циклах с выгоранием при различных значениях водо-топливного отношения. Введение Zr-стержней в тепловыделяющую сборку вытесняет некоторое количество замедлителя в ТВС ВВЭР-1000 снижает водо-топливное отношение в ТВС ВВЭР-1000. Чем больше диаметр вытеснителя, тем меньше величина водо-топливного отношения в ТВС. Это увеличивает поглощение замедляющихся нейтронов в сырьевых изотопах (U-238 и Th-232) и повышает накопление делящихся изотопов (Pu-239 и U-233) соответственно. На рисунках 5 и 6 показано изменение концентраций U-238 и Th-232, соответственно, с выгоранием при различных значениях водо-топливного отношения. Как показано на рисунках 5 и 6, концентрация U-238 и Th-232 в топливном блоке ВВЭР-1000 уменьшается при уменьшении водо-топливного отношения.

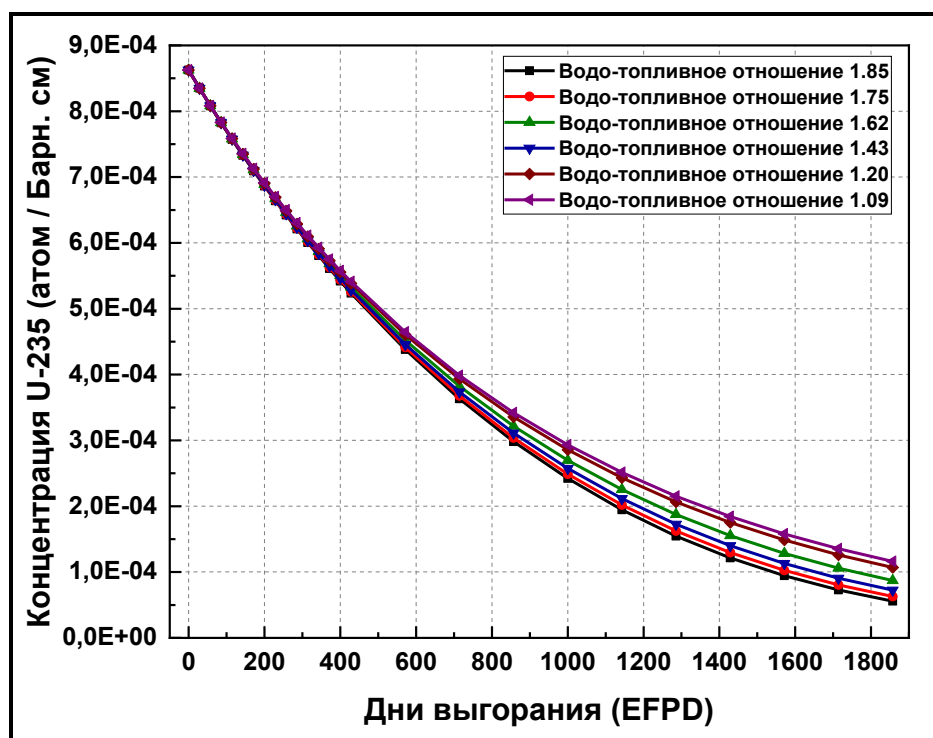


Рисунок 3 – Изменение концентрации U-235 с выгоранием при различных значениях водо-топливного отношения в ТВС ВВЭР-1000 для стандартного топливного цикла (UO_2 -3,7%) [Change in U-235 concentration with burnup at different values of the water-fuel ratio in WWER-1000 fuel assemblies for a standard fuel cycle (UO_2 -3,7%)]

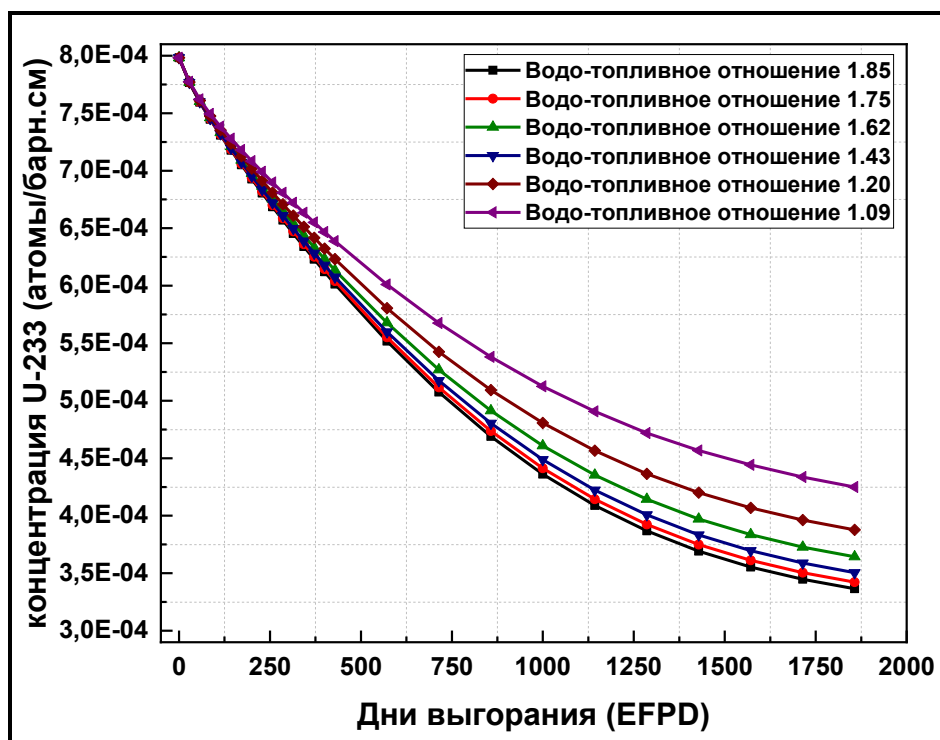


Рисунок 4 – Изменение концентрации U-233 с выгоранием при различных значениях водо-топливного отношения в ТВС ВВЭР-1000 для топливного цикла (Th-U233 -3.7%) [Change in U-233 concentration with burnup at different values of the water-fuel ratio in WWER-1000 fuel assemblies for the fuel cycle (Th-U233 -3.7%)]

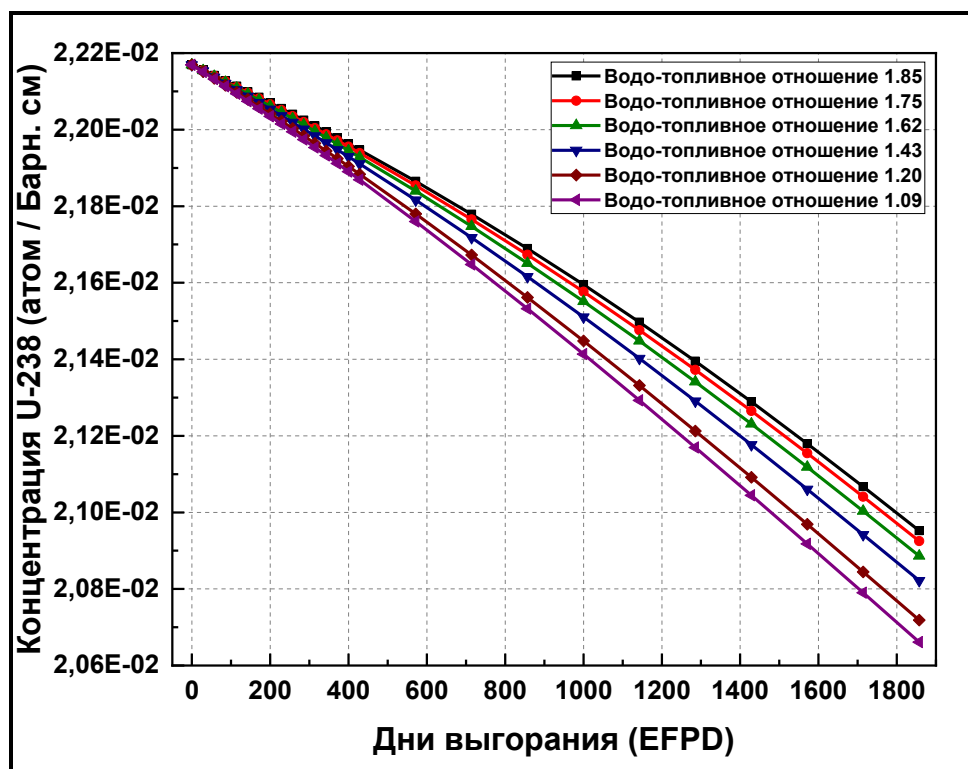


Рисунок 5 – Изменение концентрации U-238 с выгоранием различных значениях водо-топливного отношения в ТВС ВВЭР-1000 для стандартного топливного цикла (UO_2 -3,7%) [Change in U-238 concentration with burnup of different values of water-fuel ratio in WWER-1000 fuel assemblies for a standard fuel cycle (UO_2 -3,7%)]

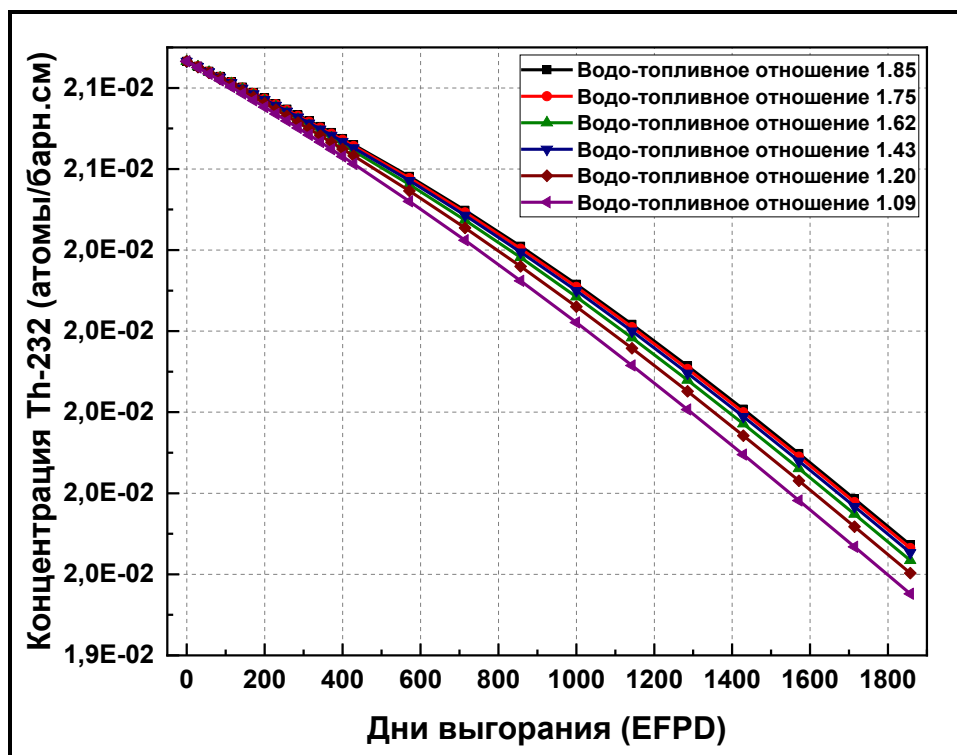


Рисунок 6 – Изменение концентрации Th-232 с выгоранием при различных значениях водо-топливного отношения в ТВС ВВЭР-1000 для стандартного топливного цикла (Th-U233 -3.7%) [Change in Th-232 concentration with burnup at different values of the water-fuel ratio in WWER-1000 fuel assemblies for a standard fuel cycle (Th-U233 -3.7%)]

Вес управляющих стержней (Control Rods Worth (CRW)), Доплеровский коэффициент реактивности (Doppler Effect Reactivity Coefficient (DRC)), и температурный коэффициент реактивности по замедлителю (Moderator Temperature Reactivity coefficient (MTC)) являются важными параметрами внутренне-присущей безопасности реактора. Следовательно, необходимо оценить изменение величины этих коэффициентов реактивности при изменении водо-топливного отношения. В таблице 3 приведены значения рассматриваемых коэффициентов реактивности при различных значениях водо-топливного отношения. Полученные результаты (табл. 3) обеспечивают внутренне присущую безопасность во всем диапазоне изменения водо-топливного отношения.

Таблица 3 – Коэффициент реактивности управляющих стержней (CRW), Доплеровский коэффициент реактивности (DRC), температурный коэффициент реактивности по замедлителю (MTC) в различных моделях ТВС ВВЭР-1000 для обоих топливных циклов (UO₂ -3,7% и Th-U233 -3,7%) [Control rod reactivity coefficient (CRW), Doppler reactivity coefficient (DRC), moderator temperature coefficient of reactivity (MTC) in various WWER-1000 fuel assemblies for both fuel cycles (UO₂ -3,7% и Th-U233 -3,7%)]

Параметр обратной связи		CRW (*10 ⁻⁵)		DRC (*10 ⁻⁵ /K)		MTC (*10 ⁻⁵ /K)	
		Топливный цикл UO ₂	Топливный цикл Th-U233	Топливный цикл UO ₂	Топливный цикл Th-U233	Топливный цикл UO ₂	Топливный цикл Th-U233
Водо-топливное отношение	1,85	-36077	-31280	-1,60	-1,81	-22.60	-10,12
	1,75	-37836	-32570	-1,82	-1,96	-24.17	-11,40
	1,62	-40414	-34516	-2,00	-2,12	-26.75	-13,19
	1,43	-44674	-37581	-2,10	-2,27	-30.57	-15,95
	1,2	-51708	-43156	-2,11	-2,53	-36.61	-20,74
	1,09	-55699	-46314	-2,18	-2,76	-40.03	-23,32

Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что использования Zr-стержней позволяет осуществлять компенсацию избыточной реактивности, но в относительно небольшом объеме (примерно до $\frac{1}{4}$ части полного запаса реактивности топливной загрузки на выгорание). При одинаковых весовых содержаниях делящегося изотопа в топливе (3.7%) диапазон компенсации избыточной реактивности в урановом топливе несколько больше, чем в ториевом топливном цикле. Максимальное значение определяется максимальным диаметром вытеснителя. Однако при этом расход теплоносителя через ТВС будет минимальным, что может привести к превышению теплотехнических ограничений по линейной нагрузке. Это может потребовать снижения средней энергонапряженности активной зоны, то есть снижение номинальной мощности АЭС. Одновременное использование борного и спектрального регулирования запаса реактивности будет экономически неоправданно. Поэтому для отказа от борного регулирования необходимо выбрать такую кратность частичных перегрузок топлива, чтобы запас реактивности в начале кампании можно было бы скомпенсировать циркониевыми стержнями. Расчёты веса управляющих стержней (CRW), Доплеровского коэффициента реактивности (DRC) и температурного коэффициента реактивности по замедлителю (MTC) показали наличие внутренне присущих свойств безопасности в реакторах типа ВВЭР-1000 с топливом обоих топливных циклов (UO_2 и Th-U233) и Zr-стержнями в качестве регулятора реактивности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ REFERENCES

- [1] Campolina D. et al. Parametric Study of Enriched Gadolinium in Burnable Neutron Poison Fuel Rods for Angra-2 // Ann. Nucl. Energy. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 118. P. 375-380.
- [2] Fadaei A.H. Investigation of Burnable Poisons Effects in Reactor Core Design // Ann. Nucl. Energy. 2011.
- [3] Frybortova L. Recommended Strategy and Limitations of Burnable Absorbers Used in WWER Fuel Assemblies // Nucl. Sci. Tech. 2019. Vol. 30, № 8.
- [4] Galahom A.A. Study of Possibility of Using Europium and Pyrex Alloy as Burnable Absorber in PWR // Ann. Nucl. Energy. 2017. Vol. 110.
- [5] Galahom A.A. Investigation of Different Burnable Absorbers Effects on the Neutronic Characteristics of PWR Assembly // Ann. Nucl. Energy. Elsevier Ltd, 2016. Vol. 94. P. 22-31.
- [6] Safarzadeh O., Saadatian-Derakhshandeh F., Shirani A.S. Calculation of Reactivity Coefficients with Burnup Changes for WWER-1000 Reactor // Prog. Nucl. Energy. 2015.
- [7] Parisi C., Negrenti E., Pecchia M. B&W Spectral Shift Control Reactor Lattice Experiments: Evaluation of Core I and Core VIII // Nucl. Sci. Eng. 2014. Vol. 178, № 4.
- [8] Chibinyaev A. V., Alekseev P.N., Teplov P.S. Estimation of the Effect of Neutron Spectrum Regulation on WWER-1000 Fuel Burnup // At. Energy. 2006. Vol. 101, № 3. P. 680-683.
- [9] Teplov P. et al. The Main Characteristics of the the WWER-S with Spectrum Shift Regulation. 2015.
- [10] Elazaka A.I., Tikhomirov G. V. Potential of the WWER Reactor Spectral Regulation with Regard for Fuel Burnup // Izv. Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yad. Energ. 2020. Vol. 2020, № 2.
- [11] Elazaka A.I., Tikhomirov G.V., Abdelghafar Galahom A. Study the Neutronic Feasibility of Using Zr as an Energy Regulator Instead of Traditional Methods // Int. J. Energy Res. 2021.
- [12] Akbari-Jeyhouni R. et al. The Utilization of Thorium in Small Modular Reactors – Part I: Neutronic assessment // Ann. Nucl. Energy. 2018. Vol. 120.
- [13] Castro V.F., Velasquez C.E., Pereira C. Criticality and Depletion Analysis of Reprocessed Fuel Spiked with Thorium in a PWR Core // Nucl. Eng. Des. 2020. Vol. 360.
- [14] Cui D.Y. et al. Possible Scenarios for the Transition to Thorium Fuel Cycle in Molten Salt Reactor by Using Enriched Uranium // Prog. Nucl. Energy. 2018. Vol. 104.
- [15] International Atomic Energy Agency IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2018 Edition // Iaea. 2018.
- [16] International Atomic Energy Agency. Thorium Fuel Cycle: Potential Benefits and Challenges. 2005. № May.

- [17] Lung M., Gremm O. Perspectives of the Thorium Fuel Cycle // Nucl. Eng. Des. 1998. Vol. 180, № 2. P. 133-146.
- [18] Thilagam L. et al. A WWER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark Analysis Using the lattice Burnup Code EXCEL // Ann. Nucl. Energy. Elsevier Ltd, 2009. Vol. 36, № 4. P. 505–519.
- [19] Leppänen J. et al. The Serpent Monte Carlo code: Status, Development and Applications in 2013 // Ann. Nucl. Energy. 2015. Vol. 82. P. 142-150.

Comparative Study of Spectral Regulation Range of Excess Reactivity Control in Pressurized Water Reactors Using Zirconium Displacers for Uranium and Thorium Fuel Cycles

A.I. Elazaka^{*,1}, V.I. Savander^{**2}, G.V. Tikhomirov^{**2}**

^{}Department of Physics, Faculty of Science, Al-Azhar University, 11884, Nasr City, Cairo, Egypt*

*^{**}National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 115409, Kashirskoe shosse, 31, Moscow, Russian Federation*

¹ORCID ID: 0000-0003-2132-2634

e-mail: aielazaka@mephi.ru

²ORCID ID: 0000-0001-9309-5616

e-mail: savander@mail.ru

³ORCID ID: 0000-0002-5332-7272

e-mail: gvtikhomirov@mephi.ru

Abstract – The compensation for the excess reactivity in the pressurized water reactors WWER is realized with high neutron absorber materials. The traditional excess reactivity regulation methods lead to unfeasible neutron utilization and reduce the breeding coefficient and fuel burnup. In the current work, the change of moderator-to-fuel ratio is investigated as one of the spectral regulation methods for excess reactivity control and its effect on the fuel burnup. Cylindrical Zirconium rods (Zr rods) are used to fulfill the moderator-to-fuel ratio change. The Zr rods are placed between fuel rods in WWER-1000 fuel assembly. The current work calculations are performed for the thorium fuel cycle (Th-U233). The change of the Zr rods diameter leads to the variation in moderator-to-fuel ratio. A comparison between the Zr rods as a reactivity regulator in WWER-1000 fuel assembly for both fuel cycles UO₂ and Th-U233. The concentration of the fertile and fissile fuel components for both fuel cycles has been analyzed. The fissile isotopes accumulation coefficient can reach 0.75 with the decrease of the moderator-to-fuel ratio in the Th-U233 fuel cycle. The primary safety parameters such as the Control rods worth, Doppler Effect reactivity coefficient, and Moderator Temperature reactivity Coefficient have been studied at different moderator-to-fuel ratio values. The safety parameters in the Th-U233 fuel cycle have higher values more than the UO₂ fuel cycle with the insertion of Zr rods. From the comparison between the Zr rods effect in both fuel cycles, it is clearly shown that Zr rods in the UO₂ fuel cycle have a more influential role in regulating the WWER-1000 core reactivity compared with its effect in the Th-U233 fuel cycle.

Keywords: water displacers, reactivity coefficients, WWER-1000, thorium fuel cycle, excess reactivity, spectral reactivity regulation.