

ПОТЕНЦИАЛ СПЕКТРАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВВЭР С УЧЕТОМ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА

А. И. Элазака*, **, Г. В. Тихомиров*

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

** *Университет Аль-Азхар, факультет наук, кафедра физики
11884, Наср-Сити, Каир, Египет*

Р

Управление спектром нейтронов в ядерном реакторе позволяет контролировать избыточную реактивность за счет поглощения избыточных нейтронов в поглотителе или за счет изменения уран-водного отношения. Работа посвящена исследованию потенциала управления спектром нейтронов ВВЭР с помощью вытеснителей. В качестве вытеснителей использовались циркониевые стержни различного диаметра (Zr-стержни). Zr-стержни располагались между топливными стержнями. Введение Zr-стержней между твэлами и увеличение их диаметра приводит к уменьшению объема воды внутри реактора и уменьшению коэффициента размножения. В современных ВВЭР компенсация избыточной реактивности реализуется с помощью растворения борной кислоты в воде. Представлены результаты сравнения потенциальной эффективности использования вытеснителей по сравнению с использованием борного регулирования. Расчеты выгорания показали, что участие Zr-стержней в геометрии ВВЭР-1000 снижает темп горения U-235 и увеличивает наработку изотопа Pu-239. Концентрация изотопов плутония увеличивается с увеличением диаметра Zr-стержней. Важными параметрами безопасности, связанными с изменением отношения замедлителя к топливу, являются плотностной и доплеровский коэффициенты реактивности. Поэтому были проведены расчеты этих коэффициентов, и полученные результаты продемонстрировали потенциальную безопасность использования вытеснителей в ВВЭР вместо борного регулирования. Таким образом продемонстрировано, что использование Zr-стержней в качестве регулятора спектра нейтронов позволяет поддерживать нейтронную экономию и контролировать избыточную реактивность внутри ВВЭР.

Ключевые слова: ВВЭР, реактивность, коэффициенты реактивности, борное регулирование, спектральное регулирование, вытеснители воды, избыточная реактивность.

ВВЕДЕНИЕ

Существуют различные методы управления ядерными реакциями в реакторе во время его работы. В тепловых реакторах во время цикла избыточная реактивность необходима для компенсации отрицательной реактивности, которая возникает в результате температурных воздействий, расхода топлива и появления продуктов деления при

© А. И. Элазака, Г. В. Тихомиров, 2020

работе ядерного реактора [1]. Для контроля избыточной реактивности могут быть использованы различные подходы – поглощающие стержни, выгорающие поглотители, борное регулирование и изменение отношения замедлителя к топливу. Изменение плотности теплоносителя и изменение отношения замедлителя к топливу в процессе работы ядерного реактора являются методами изменения скоростей ядерных реакций путем регулирования спектра нейтронов [2]. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки. Выгорающие поглотители снижают начальную избыточную реактивность без использования управляющих стержней, без изменения температуры замедлителя и с сохранением концентрации борной кислоты [3]. Но количество выгорающих поглотителей внутри ТВС ограничено, поэтому они оказывают действие на начальном этапе топливной кампании (до 10 МВт·сут/кгТА) [4]. В ряде работ исследовано распределение выгорающих поглотителей внутри тепловыделяющей сборки, включая различные виды поглотителей и размеры их частиц [5, 6]. Борная кислота является одним из популярных подходов к осуществлению контроля избыточной реактивности преимущественно за счет изменения концентрации в процессе выгорания. Изменение концентрации борной кислоты приводит к снижению реактивности реактора за счет уменьшения поглощения тепловых нейтронов в топливе [7, 8]. Растворенный бор выполняет равномерное по объему активной зоны спектральное регулирование, но довольно медленный контроль реакционной способности. Использование борной кислоты в реакторах ВВЭР требует дорогостоящей и большой системы борного регулирования и приводит к образованию большого количества радиоактивных жидких отходов. Кроме того, загрязненный бором теплоноситель является очень коррозионной жидкостью для конструкционных материалов [5]. Высокая концентрация растворимого бора также может приводить к положительному температурному коэффициенту реактивности замедлителя [9].

С учетом негативных эффектов использования выгорающих поглотителей и борной кислоты в работе рассматривается попытка изучить влияние вытеснителя воды для контроля избыточной реактивности с точки зрения нейтронной физики. Изучается также мера надежности водоизмещающего устройства в ВВЭР-1000 путем сравнения разности реактивности между состояниями введения и удаления стержней водоизмещающего устройства с разницей реактивности между нулевой и максимальной концентрацией борной кислоты ($7,33 \text{ г}(\text{H}_3\text{BO}_3)/\text{дм}^3(\text{H}_2\text{O}) = 1,77 \text{ г}(\text{B})/\text{кг}(\text{H}_2\text{O})$) [10]. Исследуется влияние введения вытеснителя воды в геометрию ВВЭР-1000 на характеристики выгорания и накопления продуктов деления. Материалом вытеснителя воды является цирконий. Цирконий используется в ядерных реакторах особенно в качестве оболочки благодаря таким свойствам, как отличная коррозионная стойкость, подходящее механическое поведение и низкое сечение поглощения нейтронов в диапазоне низких и тепловых энергий [11, 12]. В этом исследовании Zr-стержни используются как плотные стержни, которые могут быть заменены любым другим подходящим материалом.

Ранее было проведено исследование по использованию Zr-стержней в качестве вытеснителей воды [13], в котором циркониевые стержни помещались в некоторые направляющие каналы системы безопасности и управления, а разница во времени работы реактора составляла 4,1 эфф. сут (разница между 298,1 эфф. сут с регулированием спектра и 294 эфф. сут без регулирования спектра). В работе Zr-стержни размещаются между твэлами для оценки максимально возможного эффекта спектрального регулирования в ВВЭР без изменения дизайна ТВС.

ТЕСТОВАЯ ЗАДАЧА И РАСЧЕТНЫЙ КОД

В качестве тестовой задачи была выбрана расчетная модель ячейки ВВЭР-1000, представленная в работе [14]. В качестве топлива рассматривался диоксид урана с обогащением 3,7% по изотопу U-235.

В качестве расчетного кода использовался SERPENT2. Это трехмерный код на основе метода Монте-Карло с возможностью использования сечений с непрерывной зависимостью от энергии нейтронов. Данный код разработан в техническом исследовательском центре VTT в Финляндии [15] и широко используется в НИЯУ МИФИ для проведения нейтронно-физических расчетов топливных циклов реакторов с различным спектром нейтронов. Расчеты проводились с использованием SERPENT2 версии 2.1.30.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Количество замедлителя внутри активной зоны реактора, которое может быть выражено отношением объема замедлителя к объему топлива, является очень важным параметром в физике тепловых реакторов. Коэффициент теплового использования (поглощения тепловых нейтронов в топливе) и вероятность избежать резонансного захвата нейтронов могут значительно меняться при изменении данного отношения. Реактор с водой под давлением работает в безопасной области, где коэффициент размножения будет снижаться по мере уменьшения отношения замедлителя к объему топлива (количество замедлителя в активной зоне) из-за увеличения резонансного поглощения [16, 17]. Таким образом, параметр отношения объема замедлителя к объему топлива может быть использован для выполнения спектрального регулирования и контроля избыточной реактивности. Основной целью данной работы является исследования спектрального регулирования при нулевой концентрации борной кислоты. На рисунке 1 показано горизонтальное поперечное сечение модели бесконечной решетки топливных элементов ВВЭР-1000 с Zr-стержнями разного диаметра. В разработанной модели Zr-стержни размещались в пространстве между топливными стержнями.

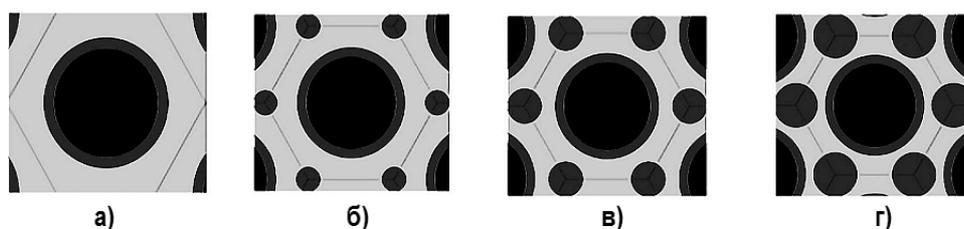


Рис.1. Горизонтальное поперечное сечение SERPENT-модели решётки топливного элемента ВВЭР-1000 с Zr-стержнями разного диаметра, помещенными между топливными стержнями: а) – \varnothing 0 мм; б) – \varnothing 2 мм; в) – \varnothing 3 мм; г) – \varnothing 4 мм

Эта модель начиналась с расчетов бесконечной решетки топливных элементов с шагом топлива 12,75 мм для уточнения влияния вклада Zr-стержня в геометрию ВВЭР-1000. Диаметр Zr-стержня варьировался от 0 мм до 5,4 мм (максимальный диаметр Zr-стержня, который может быть вставлен между топливными стержнями). На рисунке 2 показана зависимость бесконечного коэффициента размножения K_{∞} от значений диаметров Zr-стержней. Кривая показывает, что увеличение диаметра Zr-стержня приводит к уменьшению K_{∞} . Введение Zr-стержней в предлагаемую систему уменьшает количество замедлителя, отвечающего за замедление быстрых нейтронов, возникающих в процессе деления. Поэтому поток тепловых нейтронов, отвечающих за скорость цепной реакции деления, уменьшается. Следовательно, зна-

чения K_{∞} уменьшаются при увеличении диаметра Zr-стержня.

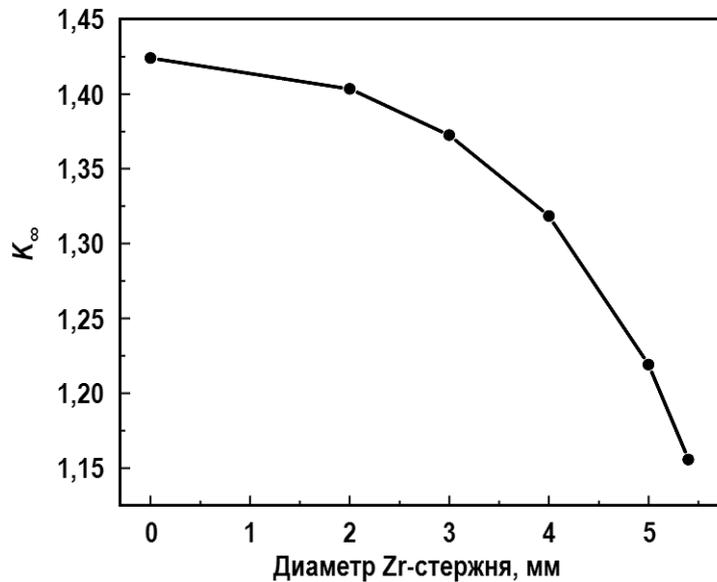


Рис. 2. Зависимость K_{∞} от диаметра Zr-стержня в предложенной бесконечной решетке топливного элемента реактора ВВЭР-1000

Борная кислота внутри активной зоны помогает осуществлять частичный контроль избыточной реактивности наряду с управляющими стержнями во время работы ВВЭР. Сравнивая эффект введения максимального диаметра Zr-стержней в предложенную геометрию с эффектом максимальной концентрации борной кислоты ($7,33 \text{ г (H}_3\text{BO}_3)/\text{дм}^3(\text{H}_2\text{O}) = 1,77 \text{ г (B)}/\text{кг}(\text{H}_2\text{O})$) [10], можно заметить, что изменение реактивности в случае максимальной концентрации борной кислоты составляет $-0,138$, а изменение реактивности в случае введения максимального диаметра Zr-стержней равно $-0,311$ (табл. 1). Было отмечено, что влияние максимальной концентрации борной кислоты на реактивность реактора может быть достигнуто введением Zr-стержней диаметром примерно 4 мм.

Таблица 1

Сравнение влияния Zr-стержней и борной кислоты

Эффект Zr-стержня			Влияние концентрации бора		
\varnothing Zr-стержня, мм	K_{∞}	$\Delta K/K$	Концентрация, г/кг	K_{∞}	$\Delta K/K$
0	1,3377		0,00	1,3379	
2	1,3088	-0,022	0,241	1,3132	-0,019
3	1,2694	-0,054	0,517	1,2861	-0,040
4	1,2030	-0,112	1,006	1,2408	-0,078
5	1,0888	-0,229	1,264	1,2183	-0,098
5,4	1,0202	-0,311	1,772	1,1758	-0,138

Основная идея использования Zr-стержней в качестве вытеснителя воды внутри активной зоны ВВЭР-1000 заключается в смещении водяного замедлителя для снижения процесса замедления и реактивности реактора. Итак, когда же реактор с полностью вставленными Zr-стержнями имеет минимальный коэффициент размножения, а последовательное извлечение Zr-стержней или переход к меньшему диаметру Zr-стержней увеличит коэффициент размножения и позволит скомпенсировать выгорание

топлива? Рисунок 3 демонстрирует изменение K_{∞} от глубины выгорания при различных диаметрах Zr-стержней. Результаты показали возможность регулирования избыточной реактивности внутри предлагаемой системы геометрии ВВЭР-1000 либо уменьшая диаметр Zr-стержней, либо последовательно извлекая Zr-стержни.

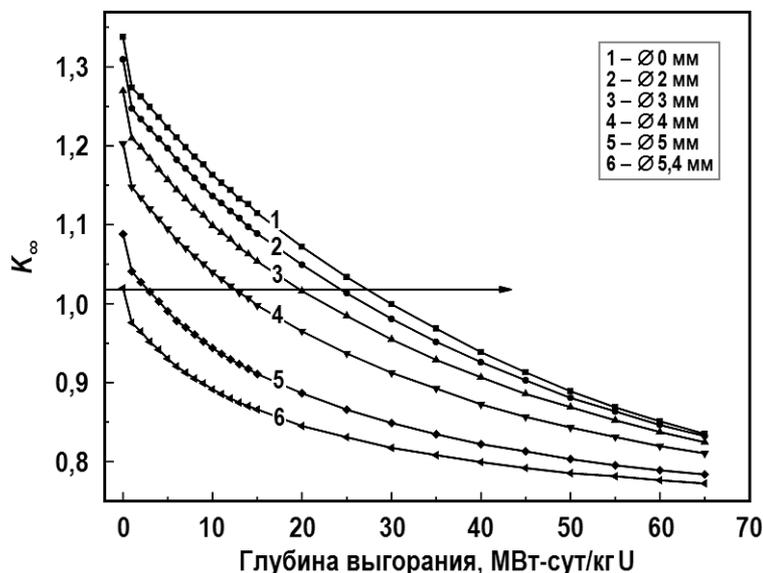


Рис. 3. Зависимость K_{∞} от глубины выгорания в предложенной бесконечной решетке топливного элемента реактора ВВЭР-1000 с различными диаметрами Zr-стержней

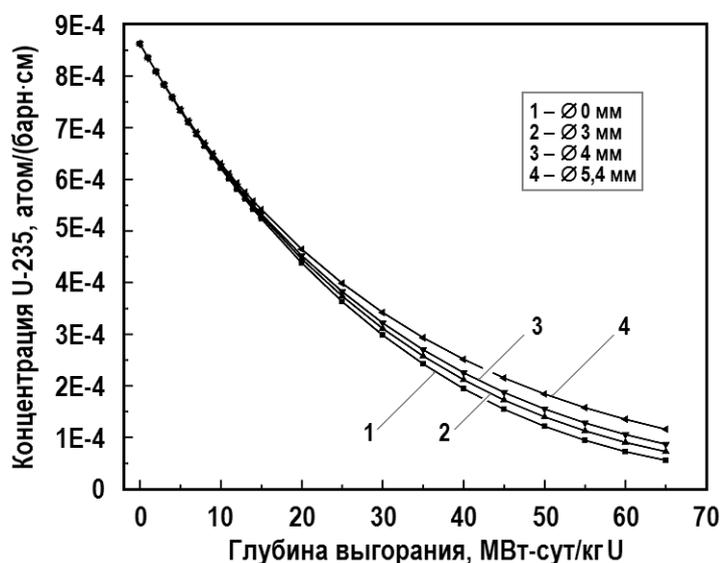


Рис. 4. Зависимость концентрации U-235 от глубины выгорания в предложенной бесконечной решетке топливного элемента реактора ВВЭР-1000 с различными диаметрами Zr-стержней

Рисунок 4 иллюстрирует изменение концентрации U-235 от глубины выгорания при различных диаметрах Zr-стержней. Расход U-235 внутри решетки топливного элемента с выгоранием уменьшается по мере увеличения диаметра Zr-стержней. Введение Zr-стержней в топливный элемент ВВЭР-1000 позволяет заменить некоторое количество замедлителя. Замененное количество увеличивается при увеличении диаметра Zr-стержней. Этот процесс уменьшает замедление быстрых нейтро-

нов и поток тепловых нейтронов в предлагаемой геометрии ВВЭР-1000. Сечение поглощения тепловых нейтронов U-235 очень велико ($582,6 \pm 1,1$ барн) по сравнению с сечением поглощения тепловых нейтронов U-238 ($2,683 \pm 0,012$ Барн). Поэтому количество сгоревшего U-235 уменьшается при увеличении диаметра Zr-стержней.

Уменьшение темпа замедления в исследуемой системе приводит к увеличению количества быстрых нейтронов внутри нее. Сечение поглощения нейтронов U-235 уменьшается с $582,6 \pm 1,1$ барн в диапазоне тепловой энергии до $2,056$ барн в диапазоне быстрой энергии. Это дает возможность U-238 поглощать больше нейтронов и превращаться в Pu-239 путем захвата нейтронов, которые высвобождаются во время реакции деления:

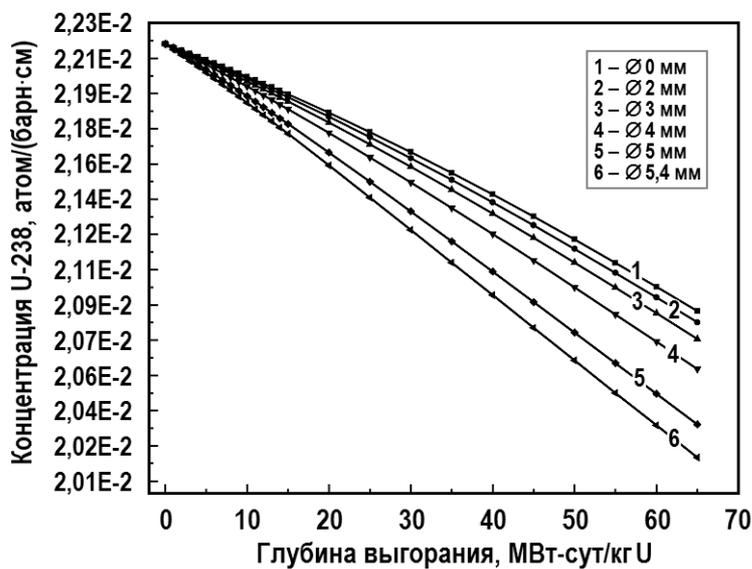
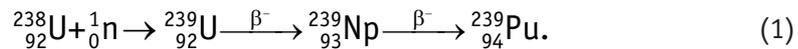


Рис. 5. Зависимость концентрации U-238 от глубины выгорания в предложенной бесконечной решетке топливного элемента реактора ВВЭР-1000 с различными диаметрами Zr-стержней

Рисунок 5 показывает изменение концентрации U-238 в зависимости от глубины выгорания при различных диаметрах Zr-стержней. Показано, что максимальное изменение концентрации U-238 в исследуемой системе решетки топливных элементов ВВЭР-1000 увеличивается при увеличении диаметра Zr-стержней. Наличие Zr-стержней при выгорании приводит к более жесткому нейтронному спектру и минимизации процесса замедления быстрых нейтронов, что приводит к более низкому истощению U-235 и более высокому производству делящихся изотопов плутония. Одновременное увеличение производства плутония и уменьшение деления может повысить реакционную способность топлива при и после выгрузки топлива. Концентрация изотопов плутония растет при увеличении диаметра Zr-стержней (рис. 6, 7).

Основными параметрами безопасности, связанными с изменением объема замедлителя в ВВЭР, считаются плотностной и доплеровский коэффициенты реактивности. Поэтому важно исследовать эти коэффициенты реактивности для предложенной конструкции при различных диаметрах Zr-стержней. Плотностной коэффициент реактивности – это отношение изменения коэффициента реактивности к соответствующему изменению плотности воды [18]. В основном, этот коэффициент связан с зависимостью реактивности реактора от температуры и плотности воды.

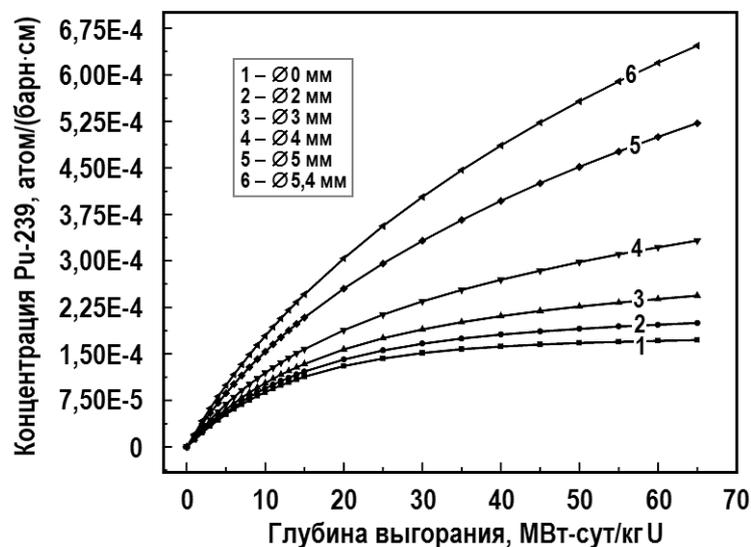


Рис. 6. Зависимость концентрации Pu-239 от глубины выгорания в предложенной бесконечной решетке топливного элемента реактора ВВЭР-1000 с различными диаметрами Zr-стержней

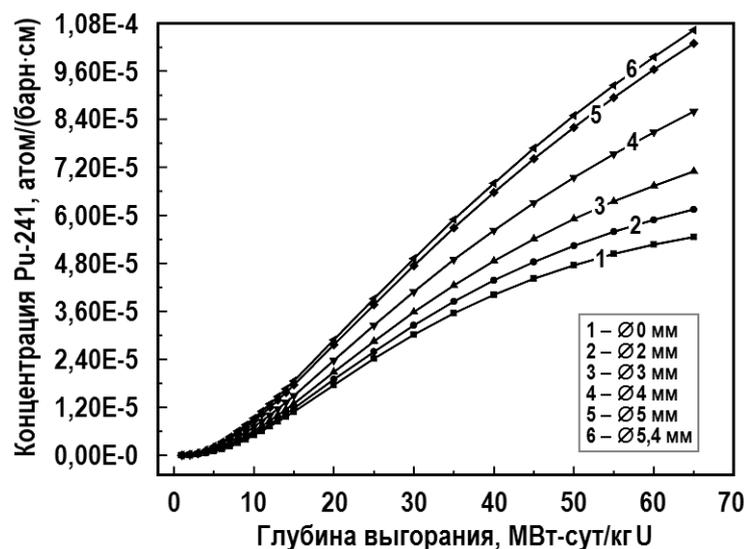


Рис. 7. Зависимость концентрации Pu-241 от глубины выгорания в предложенной бесконечной решетке топливного элемента реактора ВВЭР-1000 с различными диаметрами Zr-стержней

Плотностной коэффициент реактивности в водо-водяных реакторах должен быть положительным, а температурный коэффициент реактивности замедлителя – отрицательным.

Положительный плотностной коэффициент реактивности приводит к снижению реактивности реактора при уменьшении плотности воды [19, 20]. На рисунке 8 показан эффект уменьшения плотности воды внутри предложенной геометрии. Полученные результаты показывают, что плотностной коэффициент реактивности воды увеличивается с увеличением диаметра вставленных между твэлами Zr-стержней, что обеспечивает безопасность конструкции.

Для фиксированного диаметра Zr-стержней плотностной коэффициент реактивности с уменьшением плотности воды возрастает. В таблице 2 показано изменение доплеровского коэффициента $\alpha_T = ((\Delta K/K_2 \cdot K_1)/\Delta T) \cdot 10^5$ pcm/K с увеличением диа-

метра Zr-стержней внутри предлагаемой системы. Как видно из табл. 2, увеличение диаметров Zr-стержней приводит к увеличению доплеровского коэффициента реактивности и по-прежнему находится в пределах безопасности ($-2 < \alpha_T < -5$).

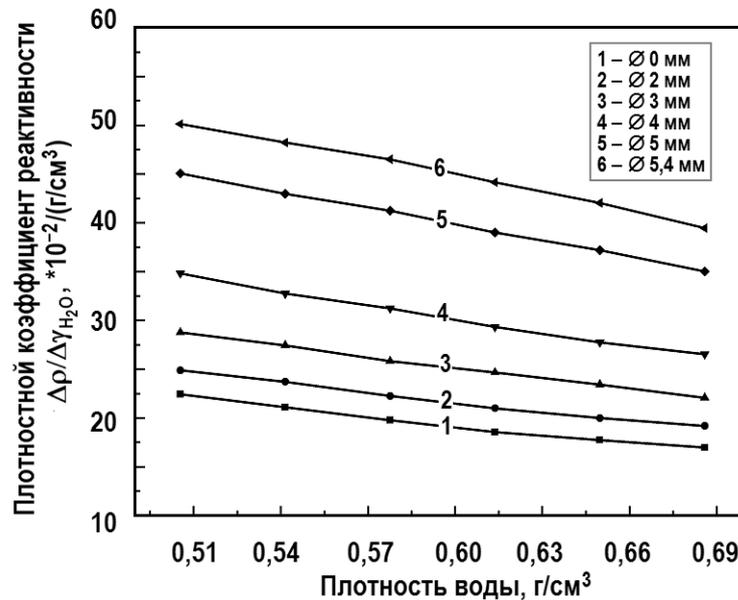


Рис. 8. Зависимость плотностного коэффициента реактивности от плотности воды в предложенной системе с различными диаметрами Zr-стержней

Таблица 2

Доплеровский коэффициент реактивности для предложенной системы

Тип модели	Zr 0.0 мм	Zr 2.0 мм	Zr 3.0 мм	Zr 4.0 мм	Zr 5.0 мм	Zr 5.4 мм
K_{∞} при 900 К	1.3381	1.3096	1.2692	1.2026	1.0888	1.0210
K_{∞} при 1200 К	1.3278	1.2988	1.2586	1.1917	1.0778	1.0085
α_T , pcm/K	-1.0921	-2.1125	-2.2117	-2.5374	-3.1357	-4.0401

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование показало возможность использования Zr-стержней для контроля избыточной реактивности при эксплуатации реактора ВВЭР.

Изменение реактивности в случае использования в качестве вытеснителя воды Zr-стержней максимального диаметра оказывается равным $-0,311$, а в случае максимальной концентрации борной кислоты составляет $-0,138$. Внедрение Zr-стержней в геометрию ВВЭР-1000 уменьшает скорость истощения U-235 и увеличивает вероятность захвата нейтронов с U-238. Захват нейтронов с помощью U-238 увеличивает концентрацию изотопов плутония. Расчеты плотностного коэффициента реактивности и доплеровского коэффициента реактивности доказали возможность безопасной работы реактора ВВЭР-1000 с Zr-стержнями в качестве регулятора избыточной реактивности.

Показана возможность регулирования избыточной реактивности внутри предлагаемой системы геометрии ВВЭР-1000 либо уменьшением диаметра Zr-стержней, либо последовательным извлечением этих стержней.

Рекомендуется исследовать влияние увеличения шага топливной решетки на рост диаметра Zr-стержней и уменьшение накопление изотопов плутония.

Литература

1. *Iqbal Hosan M., Soner M.A.M., Khorshed Ahmad Kabir, Salam M.A., Fazlul Huq Md.* Study on neutronic safety parameters of BAEC TRIGA research reactor. // *Ann. Nucl. Energy. Elsevier Ltd.* – 2015. – Vol. 80. – PP. 447-450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.02.031>.
2. *Atkinson S., Litskevich D., Merk B.* Small modular high temperature reactor optimisation part 2: Reactivity control for prismatic core high temperature small modular reactor, including fixed burnable poisons, spectrum hardening and control rods. // *Prog. Nucl. Energy. Elsevier Ltd.* – 2019. – Vol. 111. – PP. 233-242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.11.001>.
3. *Campolina D., Faria E.F., Santos A.A.C., Vasconcelos V., Franco M.P.V., Dias M.S., Mattos J.R.L.* Parametric study of enriched gadolinium in burnable neutron poison fuel rods for Angra-2. // *Ann. Nucl. Energy. Elsevier Ltd.* – 2018. – Vol. 118. – PP. 375-380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.04.025>.
4. *Chan P.K., Paquette S., Bonin H.W., French C., Pant A.* Neutron absorbers in candu natural uranium fuel bundles to improve operating margins. // *International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE21-15919. American Society of Mechanical Engineers (ASME).* – 2013. – Vol. 1. DOI: <https://doi.org/10.1115/ICONE21-15919>.
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. – PP. 22-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.02.025>.
6. *Tran H.N., Hoang H.T.P., Liem P.H.* Feasibility of using Gd2O3 particles in VVER-1000 fuel assembly for controlling excess reactivity. // *Energy Procedia. Elsevier Ltd.* – 2017. – Vol. 131. – PP. 29-36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.442>.
7. *Safarzadeh O., Saadatian-Derakhshandeh F., Shirani A.S.* Calculation of reactivity coefficients with burn-up changes for VVER-1000 reactor. // *Prog. Nucl. Energy. Elsevier Ltd.* – 2015. – Vol. 81. – PP. 217-227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.02.006>.
8. *Fadaei A.H.* Investigation of burnable poisons effects in reactor core design. // *Ann. Nucl. Energy. Elsevier Ltd.* – 2011. – Vol. 38. – PP. 2238-2246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.06.005>.
9. *Frybortova L.* VVER-1000 fuel cycles analysis with different burnable absorbers. // *Nucl. Eng. Des. Elsevier Ltd.* – 2019. – Vol. 351. – PP. 167-174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.05.026>.
10. *Taheranpour N., Talaei A.* Development of practical method using a Monte Carlo code for evaluation of optimum fuel pitch in a typical VVER-1000 core. // *Ann. Nucl. Energy. Elsevier Ltd.* – 2013. – Vol. 54. – PP. 129-133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.10.029>.
11. *Banerjee S., Banerjee M.K.* Nuclear Applications: Zirconium Alloys. // *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier Ltd.* – 2016. – PP. 6287-6299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.10.029>.
12. *Rench iukova V., Macak J., Sajdl P., Novotny R., Krausova A.* Corrosion of zirconium alloys demonstrated by using impedance spectroscopy. // *J. Nucl. Mater. Elsevier Ltd.* – 2018. – Vol. 510. – PP. 312-321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.08.005>.
13. *Chibinyaev A.V., Alekseev P.N., Teplov P.S.* Estimation of the effect of neutron spectrum regulation on VVER-1000 fuel burnup. // *At. Energy.* – 2006. – Vol. 101. – PP. 680-683. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-006-0151-z>.
14. *Thilagam L., Sunil Sunny C., Jagannathan V., Subbaiah K.V.* A VVER-1000 LEU and MOX assembly computational benchmark analysis using the lattice burnup code EXCEL. // *Ann. Nucl. Energy. Elsevier Ltd.* – 2009. – Vol. 36. – PP. 505-519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2008.12.015>.
15. *Leppanen J., Pusa M., Viitanen T., Valtavirta V., Kaltiaisenaho T.* The SERPENT Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. // *Ann. Nucl. Energy. Elsevier Ltd.* – 2015. – Vol. 82. – PP. 142-150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.024>.
16. *Hussain A., Xinrong C.* Core optimization simulation for a pressurized water reactor. // *Information Technology Journal.* – 2009. – Vol. 8. – PP. 220-225. DOI: <https://doi.org/>

10.3923/itj.2009.220.225 .

17. *Lewis E.E.* Fundamentals of Nuclear Reactor Physics. – Elsevier Inc., 2008. – 293 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370631-7.00001-2> .

18. *Stacey W.M.* Nuclear Reactor Physics: Second Edition. – Wiley-VCH, 2007. – 706 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527611041> .

19. *Faghihi F., Roosta F., Ghaemi S., Bagheri S.* Core designing of the newly proposed (U+Gd)₂O₃ FAs in the VVERs core and comparison with current UO₂ FAs. // Alexandria Eng. J. Elsevier Ltd. – 2019. – Vol. 58. – PP. 647-658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.03.010> .

20. *Vahman N., Akbari-Jeyhouni R., Rezaei Ochbelagh D., Amrollahi R.* An assessment of a VVER-1000 core during Turbo-Generator load reduction test using RELAP5/MOD3.2 and WIMSD-5B/PARCSv2.7 // Prog. Nucl. Energy. Elsevier Ltd. – 2016. – Vol. 93. – PP. 155-164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.08.005> .

Поступила в редакцию 27.03.2020 г.

Рекомендована к публикации оргкомитетом

XV Международной молодежной научно-практической конференции
«Будущее атомной энергетики – AtomFuture 2019»

Авторы

Элазака Ахмед Исмаил Исмаил Али, аспирант
E-mail: aielazaka@mephi.ru , ahmed_ismail@azhar.edu.eg

Тихомиров Георгий Валентинович, профессор
E-mail: GVTikhomirov@mephi.ru

UDC 621.039.536

POTENTIAL OF THE VVER REACTOR SPECTRAL REGULATION WITH REGARD FOR FUEL BURN-UP

Elazaka A.I.*, **, Tikhomirov G.V.*

* National Research Nuclear University MEPHI
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

** Al-AzharUniversity, Faculty of Science, Physics Department
Nasr City 11884, Cairo, Egypt

ABSTRACT

Neutron spectrum control in a nuclear reactor makes it possible to monitor excessive reactivity through the absorption of excess neutrons in the absorber or by changing the uranium-water ratio. The paper deals with investigating the potential of the VVER reactor neutron spectrum control with the use of displacers. Zirconium rods of different diameters (Zr rods) were used as the displacers. The Zr rods were positioned between fuel rods. Introducing the Zr rods between the fuel rods and increasing their diameter leads to a decrease in the amount of water inside of the reactor and to a reduction in the multiplication factor. Excessive reactivity is made up for in current VVER reactors through the dissolution of boric acid in water. The results of comparing the potential efficiency of displacer utilization against the use of boric regulation are presented. The burn-up calculations have shown that adding Zr rods to the VVER-1000 geometry reduces the U-235 burning rate and enhances the Pu-239 production. The concentration of plutonium isotopes increases with the Zr rod diameter increase. Important safety parameters involved in the change of the

moderator-fuel ratio are density and Doppler reactivity coefficients. These coefficients were therefore calculated with the obtained results demonstrating the potential safety of using displacers in VVER reactors instead of boric regulation. This has proved that the use of Zr rods as the neutron spectrum regulator makes it possible to maintain the neutron economy and to monitor excessive reactivity inside of VVERs.

Key words: VVER, reactivity, reactivity coefficients, boric regulation, spectral regulation, water displacers, excessive reactivity.

REFERENCES

1. Iqbal Hosan M., Soner M.A.M., Khorshed Ahmad Kabir, Salam M.A., Fazlul Huq Md. Study on neutronic safety parameters of BAEC TRIGA research reactor. *Annals of Nuclear Energy*. 2015, v. 80, pp. 447-450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.02.031>.
2. Atkinson S., Litskevich D., Merk B. Small modular high temperature reactor optimisation part 2: Reactivity control for prismatic core high temperature small modular reactor, including fixed burnable poisons, spectrum hardening and control rods. *Progress in Nuclear Energy*. 2019, v. 111, pp. 233-242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.11.001>.
3. Campolina D., Faria E.F., Santos A.A.C., Vasconcelos V., Franco M.P.V., Dias M.S., Mattos J.R.L. Parametric study of enriched gadolinium in burnable neutron poison fuel rods for Angra-2. *Annals of Nuclear Energy*. 2018, v. 118, pp. 375-380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.04.025>.
4. Chan P.K., Paquette S., Bonin H.W., French C., Pant A. Neutron absorbers in candu natural uranium fuel bundles to improve operating margins. *International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE21-15919*. American Society of Mechanical Engineers (ASME). 2013. v. 1. DOI: <https://doi.org/10.1115/ICONE21-15919>.
5. Galahom A.A. Investigation of different burnable absorbers effects on the neutronic characteristics of PWR assembly. *Annals of Nuclear Energy*. 2016, v. 94, pp. 22-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.02.025>.
6. Tran H.N., Hoang H.T.P., Liem P.H. Feasibility of using Gd2O3 particles in VVER-1000 fuel assembly for controlling excess reactivity. *Energy Procedia*. 2017, v. 131, pp. 29-36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.442>.
7. Safarzadeh O., Saadatian-Derakhshandeh F., Shirani A.S. Calculation of reactivity coefficients with burn-up changes for VVER-1000 reactor. *Progress in Nuclear Energy*. 2015, v. 81, pp. 217-227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.02.006>.
8. Fadaei A.H. Investigation of burnable poisons effects in reactor core design. *Annals of Nuclear Energy*. 2011, v. 38, pp. 2238-2246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.06.005>.
9. Frybortova L. VVER-1000 fuel cycles analysis with different burnable absorbers. *Nuclear Engineering and Design*. 2019, v. 35, pp. 167-174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.05.026>.
10. Taheranpour N., Talaei A. Development of practical method using a Monte Carlo code for evaluation of optimum fuel pitch in a typical VVER-1000 core. *Annals of Nuclear Energy*. 2013, v. 54, pp. 129-133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.10.029>.
11. Banerjee S., Banerjee M.K. Nuclear Applications: Zirconium Alloys. *Materials Science and Materials Engineering (Reference Module)*. 2016, pp. 6287-6299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.10.029>.
12. Rench iukova 6 V., Macak J., Sajdl P., Novotny R., Krausova A., Corrosion of zirconium alloys demonstrated by using impedance spectroscopy. *Journal of Nuclear Materials*. 2018, v. 510, pp. 312-321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.08.005>.
13. Chibinyaev A. V., Alekseev P.N., Teplov P.S. Estimation of the effect of neutron spectrum regulation on VVER-1000 fuel burnup. *Atomic Energy*. 2006, v. 101, pp. 680-683. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-006-0151-z>.
14. Thilagam L., Sunil Sunny C., Jagannathan V., Subbaiah K.V. A VVER-1000 LEU and MOX assembly computational benchmark analysis using the lattice burnup code EXCEL. *Annals of Nuclear Energy*. 2009, v. 36, pp. 505-519. DOI: <https://doi.org/10.1016/>

j.anucene.2008.12.015.

15. Leppänen J., Pusa M., Viitanen T., Valtavirta V., Kältiaisenaho T. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Annals of Nuclear Energy*. 2015, v. 82, pp. 142-150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.024>.

16. Hussain A., Xinrong C. Core optimization simulation for a pressurized water reactor. *Information Technology Journal*. 2009, v. 8, pp. 220-225. DOI: <https://doi.org/10.3923/itj.2009.220.225>.

17. Lewis E.E. *Fundamentals of Nuclear Reactor Physics*. Elsevier Inc., 2008. 293 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370631-7.00001-2>.

18. Stacey W.M. *Nuclear Reactor Physics: Second Edition*. Wiley-VCH, 2007. 706 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527611041>.

19. Faghihi F., Roosta F., Ghaemi S., Bagheri S. Core designing of the newly proposed (U+Gd)₂O₃ FAs in the VVERs core and comparison with current UO₂ FAs. *Alexandria Engineering Journal*. 2019, v. 58, pp. 647-658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.03.010>.

20. Vahman N., Akbari-Jeyhouni R., Rezaei Ochbelagh D., Amrollahi R. An assessment of a VVER-1000 core during Turbo-Generator load reduction test using RELAP5/MOD3.2 and WIMSD-5B/PARCSv2.7. *Progress in Nuclear Energy*. 2016, v. 93, pp. 155-164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.08.005>.

Authors

Elazaka Ahmed Ismail Ismail Ali, Ph.D. Student

E-mail: aielazaka@mephi.ru, ahmed_ismail@azhar.edu.eg

Tikhomirov George Valentinovich, Professor, Deputy Director

E-mail: tgera@mail.ru