

На правах рукописи

Элазака Ахмед Исмаил Исмаил Али


**МЕТОДИКИ СПЕКТРАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В РЕАКТОРАХ С
ВОДОЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

05.14.03 – «Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Автор:

A rectangular box containing a handwritten signature in blue ink. The signature is written in Cyrillic and reads "Элазака" (Elazaka) with a stylized flourish underneath.

Москва 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель: Тихомиров Георгий Валентинович,
д.ф.-м.н., Профессор, кафедра «Теоретическая и экспериментальная физика ядерных реакторов», заместитель
директора института ядерной физики и технологий,
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Научный консультант: Савандер Владимир Игоревич,
к. ф.-м. н., доцент кафедры «Теоретическая и экспериментальная физика ядерных реакторов» НИЯУ МИФИ,
г. Москва

Официальные оппоненты: Федосов Александр Михайлович,
д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт»
Селезнев Евгений Федорович,
д.т.н., главный эксперт, АО «ВНИИАЭС»
Конюхова Анастасия Ивановна
к.т.н., инженер-конструктор 1 категории, отдел ВАБ и
ПС, АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

Защита диссертации состоится «27» апреля 2022 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета при НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, тел 8(499) 323-91-67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте
<https://ds.mephi.ru>.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Е.Г. Куликов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время АЭС с реакторами с водой под давлением производят более половины всей атомной электроэнергии. Поскольку они относятся к реакторам корпусного типа, то подпитка свежим топливом осуществляется путём организации частичных перегрузок топлива на остановленном реакторе. После перегрузки свежее топливо создаёт запас реактивности для работы реактора в течении одной кампании. При этом для поддержания критичности реактора необходимо осуществлять компенсацию избыточной реактивности, которая тем больше, чем длиннее кампания.

В реакторах типа ВВЭР для компенсации избыточной реактивности применяются как жидкостная система регулирования, основанная на растворении борной кислоты в теплоносителе, так и выгорающие поглотители, интегрированные в ТВЭЛЫ (гадолиний). Основным недостатком такой системы компенсации – непроизводительное использование нейтронов в активной зоне. Помимо этого, каждая из них имеет свои специфические недостатки.

В последнее время возродился интерес к спектральному регулированию запаса реактивности. Суть этого способа состоит в изменении замедляющей способности активной зоны в процессе выгорания топлива. Изменить замедляющую способность в реакторе можно либо изменяя водо-топливное отношение, либо смешивая замедлители с разной замедляющей способностью, например, используя в качестве теплоносителя-замедлителя смесь тяжёлой и лёгкой воды.

Компенсация избыточной реактивности при спектральном регулировании достигается за счёт сдвига спектра тепловых нейтронов в эпитепловую область, в котором возрастает резонансное поглощение нейтронов в сырьевом изотопе, приводя к повышенному воспроизводству делящихся изотопов, увеличивая тем самым выгорание топлива. Далее, по мере выгорания топлива и снижения реактивности производится операция по увеличению замедляющей способности и снижению резонансного поглощения таким образом, чтобы поддержать критичность реактора.

Рассмотрено спектральное регулирование путём изменения водо-топливного отношения. Для этого применяются вытеснители воды из активной зоны с помощью стержней из слабо поглощающего нейтроны материалов, например, пустотелые циркониевые вытеснители. Диаметр вытеснителей определяет диапазон изменения водо-топливного отношения. В начальный момент кампании все вытеснители опущены в активную зону. В процессе выгорания топлива используются различные варианты перемещения вытеснителей.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является оценка эффективности использования вытеснителей воды и гетерогенного размещения для отказа от борного регулирования путём перехода на новую систему компенсации избыточной реактивности.

Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Оценка потенциала спектрального регулирования с использованием Zr-стержней для изменения водо-топливного отношения в реакторе ВВЭР-1000 (ячейка и ТВС) на основе топлива UO_2 .
2. Сравнение диапазона спектрального регулирования с использованием Zr-стержней в топливных циклах UO_2 и Th-U233 в реакторе ВВЭР-1000 (ТВС).
3. Анализ различных способов повышения потенциала спектрального регулирования и использование частичных перегрузок топлива для реализации этого потенциала в реакторах типа ВВЭР.
4. Нейтронно-физическое обоснование оптимальных размеров и размещения в квадратных ТВС реакторов типа PWR водяных каналов для вытеснителей и решётки твэлов для организации спектрального регулирования.
5. Управление избыточной реактивностью в реакторе PWR за счёт изменения состава и гетерогенного размещения топлива.

Новизна работы.

1. Впервые проведено расчётное обоснование того, что использование комбинированных вытеснителей может позволить увеличить глубину выгорания топлива в легководных реакторах на 20-30%.
2. Предложена новая схема последовательного введения вытеснителей, отличающихся различной замедляющей способностью, в водяные каналы для равномерного изменения водо-топливного отношения в ТВС.
3. Предложена схема оптимального распределения невыгорающих поглотителей в ТВС с целью минимизации начального запаса реактивности.
4. Сформулированы новые критерии эффективности вариантов ТВС со спектральным регулированием.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты исследования потенциала спектрального регулирования с использованием механических вытеснителей в водо-водяных реакторах при различных составах вытеснителей.

2. Результаты расчётного обоснования возможности увеличения глубины выгорания топлива в водо-водяных реакторах при применении спектрального регулирования с использованием механических вытеснителей.

3. Результаты расчётного обоснования необходимости изменения геометрии ТВС для реализации спектрального регулирования с использованием комбинированных вытеснителей в водо-водяных реакторах.

4. Варианты новых ТВС водо-водяных реакторов, в которых демонстрируется практическая возможность реализации спектрального регулирования с использованием комбинированных вытеснителей.

5. Возможность использования изменения структуры топлива и распределения делящегося материала в ТВС для спектрального регулирования в водо-водяных реакторах.

Достоверность научных положений, выводов и практических результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждена.

1. Проведением расчётов по прецизионным программным средствам, аттестованным для расчётов ядерных реакторов на территории РФ.

2. Сравнением и верификацией результатов расчётов с другими международными программными комплексами.

3. Публикацией в реферируемых изданиях и выступлением с докладами на российских и международных научных конференциях.

4. Кросс-верификацией результатов с использованием программы для исследования нейтронно-физических свойств SERPENT 2.0..

Практическая значимость работы.

1. Предложены новые варианты ТВС водо-водяных реакторов с квадратной решёткой, которые обеспечивают регулирование избыточной реактивностью путём механического перемещения комбинированных вытеснителей.

2. Предложены варианты ТВС с гетерогенной структурой, включающей различные комбинации твэлов с ураном и торием для полного отказа от борного регулирования запаса реактивности.

3. Результаты исследования могут быть использованы для разработки моделей активных зон водо-водяных реакторов, в которых возможно исключить жидкостную систему компенсации избыточной реактивности.

4. Полученные результаты являются основанием для более детального анализа спектрального регулирования на основе комбинированных вытеснителей по-

сколькo они демонстрируют возможность регулирования в широком диапазоне изменения водо-топливного отношения, используемого в существующих водо-водяных реакторах.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях, семинарах и школах:

1. XIV Международная молодёжная научно-практическая конференция «Будущее атомной энергетики AtomFuture 2018», Россия, Обнинск, Ноябрь 2018 Года.
2. VIII Международная молодёжная научная школа конференция, «Современные проблемы физики и технологий», Россия, Москва, НИЯУ МИФИ, Апрель 2019 Года.
3. XV Международная молодёжная научно-практическая конференция «Будущее атомной энергетики - AtomFuture 2019», Россия, Обнинск, Ноябрь 2019 Года. (Доклад второй степени).
4. Международная конференция молодых специалистов, учёных и аспирантов по физике ядерных реакторов «Волга-2020», Россия, Москва, сентябрь 2020 Года.
5. XVI Международная молодёжная научно-практическая конференция «Будущее атомной энергетики - AtomFuture 2020», Россия, Обнинск, Ноябрь 2020 Года. (Доклад третьей степени).

Публикации автора по теме диссертации. По теме диссертационной работы автором опубликованы 11 работ, 2 статьи из которых в журнале, входящего в список ВАК, 3 – в журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём работы составляет 180 страниц основного текста, включая 43 таблицы и 71 рисунок, в том числе графики, и список цитируемой литературы из 136 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обращено внимание на преимущества ядерной технологии и её дальнейшего развитие. Дано описание характеристик реактора с водой под давлением и его широкое использование на атомных электростанциях всего мира. Рассмотрены традиционные способы компенсации избыточной реактивности в реакторах с водой под давлением. Показаны преимущества и недостатки традиционных способов компенсации избыточной реактивности. Выделены проблемы, связанная с использованием жидкостной системы регулирования избыточной реактивности (борная кислота).

Рассмотрена концепция спектрального регулирования как один из основных подходов для регулирования запаса реактивности в ядерных реакторах. Во введении также обоснована актуальность работы, цель и задачи работы, описаны основные задачи исследования, представлены выносимые на защиту научные результаты, показана новизна исследования и сведения об их апробации, а также обоснована их практическая значимость.

В **главе 1** проводится литературный обзор о существующих подходах к компенсации избыточной реактивности и спектрального регулирования в водо-водяных реакторах, также о использовании тория в реакторах с водой под давлением в модели двойной активной зоны (Blanket-Seed). В главе тоже описаны программные средства, используемые для расчёта нейтронно-физических характеристик.

Во **второй главе** рассмотрена «идеальная» модель спектрального регулирования с помощью вытеснителей, путём введения Zr-стержней в ТВС реактора ВВЭР-1000 в пространство между твэлами. В этой модели осуществляется равномерное по ТВС и непрерывное по времени изменение водо-топливного отношения. Такая модель позволяет оценить диапазон спектрального регулирования и максимальный выигрыш в выгорании топлива в зависимости от топливного цикла и материала вытеснителей. Наиболее важной характеристикой спектрального регулирования при использовании вытеснителей является диапазон изменения водо-топливного отношения. При реализации спектрального регулирования в реакторе спектр нейтронов смещается в эпитепловую область энергий, так что избыточные нейтроны предпочтительно поглощаются воспроизводящим материалом, а не выгорающим поглотителем.

В качестве тестовой задачи была выбрана ТВС-2М используемая в реакторах ВВЭР-1000, установленные на Балаковской АЭС, Ростовской АЭС, Тяньваньской АЭС и др.. В качестве топлива рассматривался диоксид урана с обогащением 3,7% по изотопу U-235. В качестве расчётного кода использовался SERPENT2, который широко используется в НИЯУ МИФИ для проведения нейтронно-физических расчётов топливных циклов реакторов с различным спектром нейтронов.

Работу во второй главе можно разделить на четыре этапа:

1. Спектральное регулирование в бесконечной решётке топливного элемента ВВЭР-1000 с помощью Zr-стержней.
2. Спектральное регулирование в ТВС ВВЭР-1000 с использованием Zr-стержней.
3. Сравнительная оценка диапазона спектрального регулирования запаса реактивности в ТВС реактора ВВЭР-1000 с помощью циркониевых вытеснителей для уранового и ториевого топливных циклов.

4. Использование обеднённого урана и природного тория вместо циркония в качестве вытеснителей воды и применение частичных перегрузок топлива при спектральном регулировании.

На **первом этапе** исследуется прямое внедрение вытеснителей воды в межтвэльное пространство решётки топливного элемента ВВЭР-1000 для управления избыточной реактивностью. На рисунке 1 показано горизонтальное поперечное сечение модели бесконечной решётки топливных элементов ВВЭР-1000 с Zr-стержнями разного диаметра. Изменение водо-топливного отношения осуществляется путём изменения диаметра циркониевых вытеснителей. Диаметр стержня варьировался от 0 мм до 5,4 мм (максимальный диаметр Zr-стержня, который может быть вставлен между топливными стержнями).

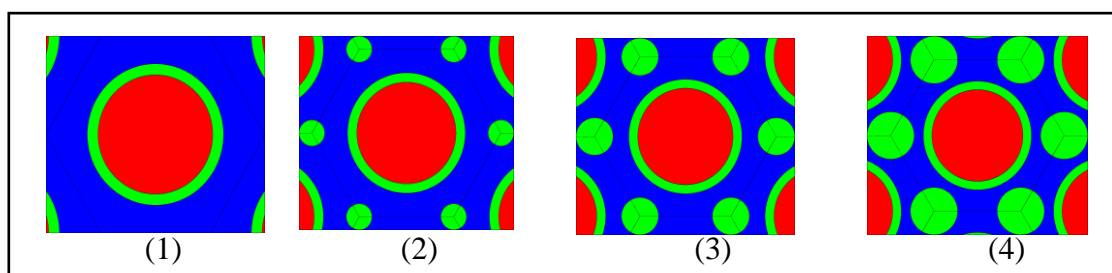


Рисунок 1 – Горизонтальное поперечное сечение SERPENT модели решётки топливного элемента ВВЭР-1000 с Zr-стержнями разного диаметра (ZR-стержни разного диаметра в (1), (2), (3) и (4) равны 0, 2, 3 и 4 мм) помещены между топливными стержнями.

Проведены расчёты диапазона регулирования запаса реактивности в зависимости от диаметра внедряемых вытеснителей. Было показано, что для случая ведения максимального диаметра Zr-стержней диапазон регулирования составляет -0,233, в то время как для максимально допустимой концентрации борной кислоты ($7,33 \text{ г}(\text{H}_3\text{BO}_3)/\text{дм}^3(\text{H}_2\text{O}) = 1,77 \text{ г}(\text{B})/\text{кг}(\text{H}_2\text{O})$), эта величина составляет только -0,102, как показано в таблице 1.

Таблица 1 – Диапазон изменения K_∞ при различных диаметрах вытеснителей.

Эффект Zr-стержня				Влияние концентрации бора		
Диаметр стержня Zr (мм)	Водо-топливное отношение в ячейке	K_∞	$\frac{\Delta K}{K_0 * K_i}$	Концентрация бора (г/ кг)	K_∞	$\frac{\Delta K}{K_0 * K_i}$
0	1,60	1,3353		0,00	1,3353	
2	1,46	1,3036	-0,018	0,241	1,3132	-0,013
3	1,30	1,2649	-0,042	0,517	1,2861	-0,029
4	1,06	1,1988	-0,085	1,006	1,2408	-0,057
5	0,76	1,0837	-0,174	1,264	1,2183	-0,072
5,4	0,62	1,0146	-0,237	1,772	1,1758	-0,102

На **втором этапе** выполнены расчёты спектрального регулирования в ТВС ВВЭР-1000 с использованием Zr-стержней, поскольку ячейка не учитывает наличие водяных каналов в ТВС для органов регулирования. Кроме того, в каждой ячейке размещается по два вытеснителя, а граничные ячейки ТВС и ячейки вокруг направляющих каналов не допускают такого размещения вытеснителей. В результате количество вытеснителей в ТВС меньше удвоенного числа твэлов. Поэтому диапазон регулирования запаса реактивности путём внедрения вытеснителей в модели ТВС должен быть несколько меньше, чем в ячеечном представлении. Сравнение результатов по диапазону регулирования в элементарной ячейке и в ТВС для свежей топливной загрузки и изменения водо-топливного отношения в ячейке и ТВС реактора ВВЭР-1000 приведены в таблице 2. Диапазон регулирования коэффициента размножения (K_{∞}) в ТВС при введении максимального диаметра Zr-стержня составляет -0,156, а для ячейки -0,321.

Таблица 2 – Изменение диапазона регулирования запаса реактивности путём внедрения вытеснителей в ячейке и ТВС ВВЭР-1000.

Эффект Zr-стержня в ячейке				Эффект Zr-стержня в ТВС			
Диаметр стержня Zr (мм)	Водо-топливное отношение в ячейке	K_{∞}	$\frac{\Delta K}{K_0 * K_i}$	Диаметр стержня Zr (мм)	Водо-топливное отношение в шестигранной ТВС с управляющими каналами	K_{∞}	$\frac{\Delta K}{K_0 * K_i}$
0	1,6	1,3353		0	1,85	1,3617	
2	1,46	1,3036	-0,018	0,1	1,75	1,3433	-0,010
3	1,3	1,2649	-0,042	0,15	1,62	1,3210	-0,023
4	1,06	1,1988	-0,085	0,2	1,43	1,2850	-0,044
5	0,76	1,0837	-0,174	0,25	1,20	1,2328	-0,077
5,4	0,62	1,0146	-0,237	0,27	1,09	1,2056	-0,095
$\Delta K_{\infty} =$		-0,3207		$\Delta K_{\infty} =$		-0,156	

Расширение топливного шага изучается в бесконечной решётке топливных элементов с нулевой концентрацией борной кислоты. В процессе увеличения топливного шага необходимо учитывать изменение K_{∞} на разных топливных шагах для двух состояний, холодного и горячего состояний. На рисунке 2 показано изменение значений K_{∞} в зависимости от топливного шага решётки, для холодного и горячего состояний в предлагаемой бесконечной решётке топливного элемента. Наибольшее значение K_{∞} на кривой холодного состояния соответствует оптимальному топливному шагу решётки - оптимальному водо-топливному отношению. Водо-топливное отношение должно быть в диапазоне, обеспечивающем безопасность активной зоны при переходе из холодного состояния в горячее, и находится в области под наибольшим значением K_{∞} на кривой

горячего состояния (области 1). Результаты указывают на возможность увеличения топливного шага решётки с 12,75 мм до 15 мм в отсутствие борной кислоты.

Увеличение шага топливной решётки приводит к увеличению объёма лёгкой воды, используемой в качестве теплоносителя и замедлителя в ВВЭР-1000. Следовательно, необходимо исследовать влияние этого фактора на плотностной коэффициент реактивности на различных шагах топлива. На рисунке 3 показан эффект уменьшения плотности воды в ячейке ВВЭР-1000 при разных шагах решётки. Полученные результаты показывают, что плотностной коэффициент реактивности для шагов решётки от 12 мм до 14 мм (больше, чем $10 \cdot (10^{-2}/(\text{г}/\text{см}^3))$) удовлетворяет требованиям безопасности реактора.

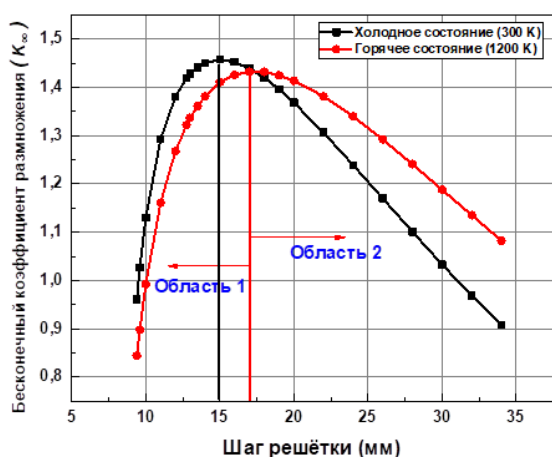
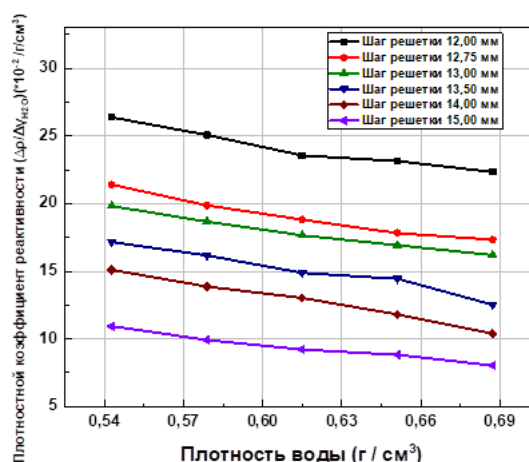


Рисунок 2 – Изменение K_{∞} в зависимости от топливного шага решётки в холодном и горячем состояниях в решётке топливного элемента ВВЭР-1000.



Рисунке 3 - Зависимость плотностного коэффициента реактивности от плотности воды для различных топливных шагов решётки в решётке топливного элемента ВВЭР-1000.

В таблице 3 приведены значения водо-топливного отношения в ТВС при различных шагах решётки, а также процент вытесненной воды при вставке Zr-стержней максимального диаметра в ТВС. Расширение топливного шага решётки приводит к увеличению максимального диаметра Zr-стержней и процент вытесненной воды как показано в таблице 3. Увеличение шага решётки твэлов приводит к увеличению общего объёма ТВС (следовательно, и к повышению водо-топливного отношения) что увеличивает диапазон спектрального регулирования, как показано в таблице 3.

Таблица 3 - Увеличение количества вытесненной воды из ТВС и диаметра Zr-стержней в зависимости от шага решётки.

Шаг решётки (мм)	Водо-топливное отношение ТВС без вытеснителей воды	Максимальный диаметр Zr-стержней (мм)	количество вытесненной воды из ТВС (%)	Диапазон регулирования K_{∞}
12,75	1,85	5,4	23,08	-0,156
13,00	1,98	5,8	25,61	-0,169
13,50	2,25	6,4	28,92	-0,180
14,00	2,53	7,0	32,17	-0,189

На **третьем этапе** сравнивается использование Zr-стержней в качестве вытеснителей воды в топливных циклах на основе низкообогащенного урана и уран-ториевого цикла в реакторах типа ВВЭР-1000. Весовое содержание урана-233 в тории выбрано таким же, как и обогащение уранового топлива 3,7%. Расчётные исследования влияния Zr-стержней на размножающие свойства проводились в ТВС реактора ВВЭР.

В таблице 4 приведены начальные значения коэффициента размножения ТВС ВВЭР-1000 при разных диаметрах Zr-стержней, разница в коэффициенте размножения при разных диаметрах Zr-стержней и соответствующие значения водо-топливного отношения. Результаты показали снижения диапазона регулирования при использовании топлива Th-U233 с одинаковым весовым содержанием делящегося материала, как показано в таблице 4.

Таблица 4 - Коэффициент размножения (K_{∞}) в ТВС ВВЭР-1000 при различных значениях водо-топливного отношения для стандартного топливного цикла (UO_2 -3,7%) и торий-уранового топливного цикла с одинаковым содержанием делящегося материала.

Диаметр Zr-стержня (мм)	Водо-топливное отношение	K_{∞} (UO_2)	Разница K_{∞}	K_{∞} (Th-U233)	Разница K_{∞}
0	1,85	1,3608		1,4594	
2	1,75	1,3443	0,017	1,4487	0,011
3	1,62	1,3210	0,040	1,4110	0,025
4	1,43	1,2857	0,075	1,4344	0,048
5	1,20	1,2329	0,128	1,3743	0,085
5,4	1,09	1,2059	0,155	1,3541	0,105

На **четвёртом этапе** исследуется использование обеднённого урана и природного тория вместо циркония в качестве вытеснителей воды и изучение условия частичных перегрузок топлива при применении спектрального регулирования. Однако использование вытеснителей, вводимых в межтвэльное пространство, приводит к уменьшению проходного сечения теплоносителя, что влияет на теплоотдачу в ТВС. Это может потребовать снижения удельной энергонапряжённости активной зоны в начале

кампании или повышения скорости прокачки теплоносителя. Кроме того, 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 вытеснителями. Одним из главных недостатков циркониевых вытеснителей заключается в небольшом диапазоне регулирования запаса реактивности. Поэтому предлагается использовать дополнительные поглотители добавляемых именно в вытеснитель. Наилучший вариант – использование с вытеснителями полезных поглотителей, то есть сырьевые изотопы.

Использование обеднённого урана и природного тория вместо циркония в качестве вытеснителей воды может одновременно выполнять две функции: изменять водо-топливное отношение и поглощать избыток нейтронов воспроизводящими изотопами. В таблице 5 показано изменение бесконечного коэффициента размножения ТВС ВВЭР-1000 с тремя предложенными материалами в качестве вытеснителей воды. Обеднённый уран увеличивает диапазон на два раза больше, чем у циркониевых вытеснителей, а торий увеличивает диапазон на три раза.

Таблица 5- Изменение бесконечного коэффициента размножения в топливной сборке ВВЭР с тремя предлагаемыми материалами в качестве вытеснителей воды.

Радиус стержня (см)	Водо-топливное отношение	ТВС со стержнями из Zr		ТВС со стержнями из обеднённого урана		ТВС со стержнями из природного тория	
		K_{∞}	ΔK_{∞}	K_{∞}	ΔK_{∞}	K_{∞}	ΔK_{∞}
0,00	1,85	1,3623	0	1,3623	0	1,3623	0
0,10	1,75	1,3427	-0,020	1,3073	-0,055	1,2744	-0,088
0,15	1,62	1,3195	-0,043	1,2495	-0,113	1,1872	-0,175
0,20	1,43	1,2822	-0,080	1,1724	-0,190	1,0820	-0,280
0,25	1,20	1,2325	-0,130	1,0823	-0,280	0,9578	-0,404
0,27	1,09	1,2052	-0,157	1,0394	-0,323	0,9047	-0,458

Частичная перегрузка топлива экономит нейтроны, поглощая их в топливе. В результате комбинация частичной перегрузки со спектральным регулированием вытеснителями воды может позволить полностью отказаться от выгорающих поглотителей и борного регулирования. Для этого необходимо найти кратность перегрузки или, что тоже самое, какова должна быть кампании реактора, чтобы применение вытеснителей с заданным изменением водо-топливного отношения позволило скомпенсировать начальный запас реактивности реактора. В таблице 6 приведены длительность одной кампании реактора (τ), начальный коэффициент размножения ($K^{POLY}(t=0)$) и избыточ-

ную реактивность для каждого режима частичной перегрузки. Рисунки 4 и 5 изображают зависимости изменения реактивности полячейки от кратности перегрузок времени кампаний реактора. Из результатов, представленных на рисунках 4 и 5, можно найти значение кратности перегрузки или время кампании, при которой изменения реактивности полячейки будет соответствовать значению диапазона регулирования запаса реактивности для всех значений водо-топливного отношения. Таким образом, для полуторогодичной кампании циркониевые вытеснители не смогут обеспечить компенсацию требуемого запаса реактивности, а для тяжёлых вытеснителей такая кампания достигается при введении стержней диаметром всего 0,15-0,2 мм.

Таблица 6 - Время кампанией реактора (τ), $K^{\text{POLY}}(t=0)$ и избыточная реактивность, которую необходимо компенсировать, для двухкратной, трёхкратной, четырёхкратной и пятикратной частичной перегрузки.

Параметр кампании	Двухкратная перегрузка	Трёхкратная перегрузка	Четырёхкратная перегрузка	Пятикратная перегрузка
τ	489	372	300	251
$K^{\text{POLY}}(t=0)$	1,2374	1,1860	1,1572	1,1393
$K^{\text{POLY}}(t=0) - 1.05$	0,1874	0,1360	0,1072	0,0893

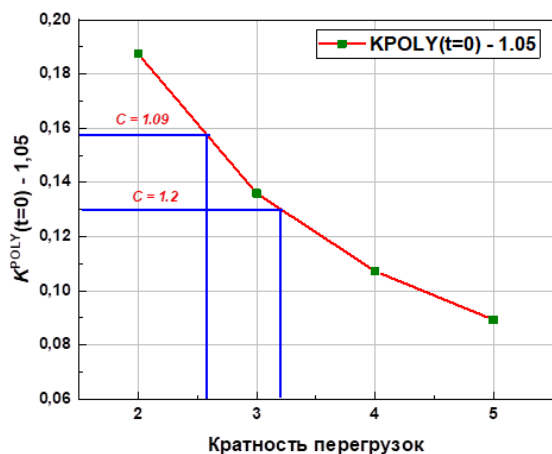


Рисунок 4 - Изменение запаса реактивности полячейки в зависимости от кратности перегрузок.

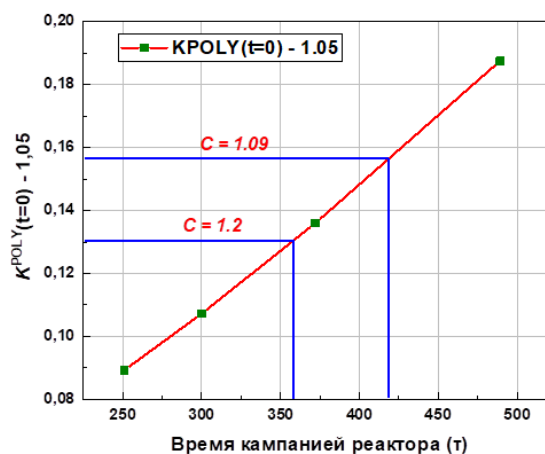


Рисунок 5 - Изменение запаса реактивности полячейки в зависимости от времени кампаний реактора.

На основании изложенного во второй главе, можно заключить, что: возможность использования стержней из циркония (Zr-стержней) для управления избыточной реактивностью при эксплуатации реактора ВВЭР. При сравнении Zr-стержней с борной кислотой, изменение реактивности при максимальной концентрации борной кислоты примерно в два раза меньше, чем при введении максимального диаметра Zr-стержней. Диапазон спектрального регулирования Zr-стержнями в ТВС ВВЭР-1000 увеличивается при расширении топливного шага решётки. Спектральное регулирование Zr-стержнями увеличивает глубину выгорания на 20% в ТВС ВВЭР-1000. Исследования шага решётки показало возможность увеличения шага решётки ВВЭР-1000 до 14 мм в

отсутствии борной кислоты. При одинаковых весовых содержаниях делящегося изотопа в топливе диапазон компенсации избыточной реактивности в урановом топливе в полтора раза больше, чем в ториевом топливном цикле. Вытеснители воды, состоящие из тяжёлых элементов, в несколько раз увеличивают диапазон спектрального регулирования по сравнению со Zr-стержнями.

В **третьей главе** настоящей работы предложено изменить геометрию ТВС для оптимизации спектрального регулирования в водо-водяных реакторах и исследованы новые дизайны ТВС, основанные на геометрии периодических квадратных решёток.

В предыдущей главе были представлены результаты исследований по оценке потенциала вытеснителей воды для спектрального регулирования избыточной реактивности в реакторе с водой под давлением (ВВЭР-1000) с точки зрения нейтронной физики для «идеальной» модели. Однако эта модель практически нереализуема.

В настоящей главе представлены результаты исследований по гетерогенной модели размещения вытеснителей, вводимых в специальные водяные каналы. Основная задача определение оптимального размещения водяных каналов по ТВС, их суммарное число в зависимости от шага решётки ТВЭЛов вокруг этих водяных каналов. При этом необходимо соблюдать определенное соответствие между размерами каналов и шагом решётки. Наиболее просто такую модель осуществить в квадратной ТВС.

В **этой главе** представлены результаты исследований по поиску конструкции ТВС с вытеснителями, которая удовлетворяем следующими свойствами:

1. Вытеснители расположены симметрично;
2. Количество используемых вытеснителей воды должно быть как можно меньшим по сравнению с количеством ТВЭЛов;
3. Эффект вытеснителей воды на реактивности реактора должен быть сравним с эффектом влияния максимальной концентрации борной кислоты на коэффициент размножения бесконечной решётки ТВС;
4. Размер ТВС должен быть близок к размеру ТВС реактора PWR.

В начале исследования выделено особое места в предлагаемых моделях для размещения вытеснителей воды. Разные модели были рассмотрены и диапазон некоторых из них сравним с диапазоном регулирования в предыдущей главе. Возникла проблема с параметрами безопасности, где отрицательность температурного коэффициента реактивности по замедлителю (α_M) очень сильно уменьшается при извлечении Zr-стержней. В предлагаемых моделях большое увеличение объёма воды внутри ТВС после

полного извлечения Zr-стержней влияет на параметры безопасности. Также при извлечении Zr-стержней изменяется проходное сечение теплоносителя. Поэтому предлагается другой метод устранения негативного влияния на параметры безопасности после полного извлечения Zr-стержней. Также этот метод будет эффективен с тепло-гидравлической точки зрения, т.к. не будет изменяться гидравлическое сопротивление при прокачке теплоносителя через ТВС. Способ заключается в том, что стержень из другого материала постепенно вводится в тепловыделяющую сборку для замены Zr стержня во время постепенного извлечения Zr-стержней из тепловыделяющей сборки. Выбранный материал для замены Zr-стержней в тепловыделяющей сборке должен иметь высокую температуру плавления и состоять из лёгких элементов, участвующих в замедлении быстрых нейтронов. В настоящей работе в качестве такого материала был рассмотрен плексиглас (полибензимидазолы) $(C_{20}H_{12}N_4)_n$. Таблица 7 содержит все характеристики полибензимидазолов. Также все материалы вытеснителей воды заключены в водные каналы из циркалоя чтобы не влияли на проходное сечение теплоносителя во время движения вытеснителей воды. Оболочка водных каналов имеет ту же толщину, что и в топливном стержне.

Таблица 7 - Характеристики Плексигласа

Плексиглас (Полибензимидазолы)	
Химическая формула	$(C_{20}H_{12}N_4)_n$
Температура стеклования (Tg) (° C)	430
Температура плавления (° C)	более 600
Плотность (г/см ³)	1,3

Исследование плексигласа в предлагаемых тепловыделяющих сборках будет проводиться путём сравнения результатов трех случаев. Первый — это полное введение Zr-стержней, второй - полное введение стержней из плексигласа, а третий - замена Zr-стержней или плексигласа на водные каналы. В результате поиска были выбраны три модели, изображённые на рисунке 6, в которых расположено в виде решётки 16x16, 15x15 и 22x22 квадратных ячеек в ТВС, а размеры определённого места для вытеснителя воды составляют 4, 9 и 16 квадратных ячеек соответственно. Используемые размеры твэлов такие же, как у реактора PWR. В модели «16x16 четыре» один стержень вытеснителя окружён 12 твэлами, а в модели «15x15 девять» вытеснитель окружён 16 топливными стержнями. В модели «22x22 шестнадцать» один стержень вытеснителя окружён почти 37 твэлами.

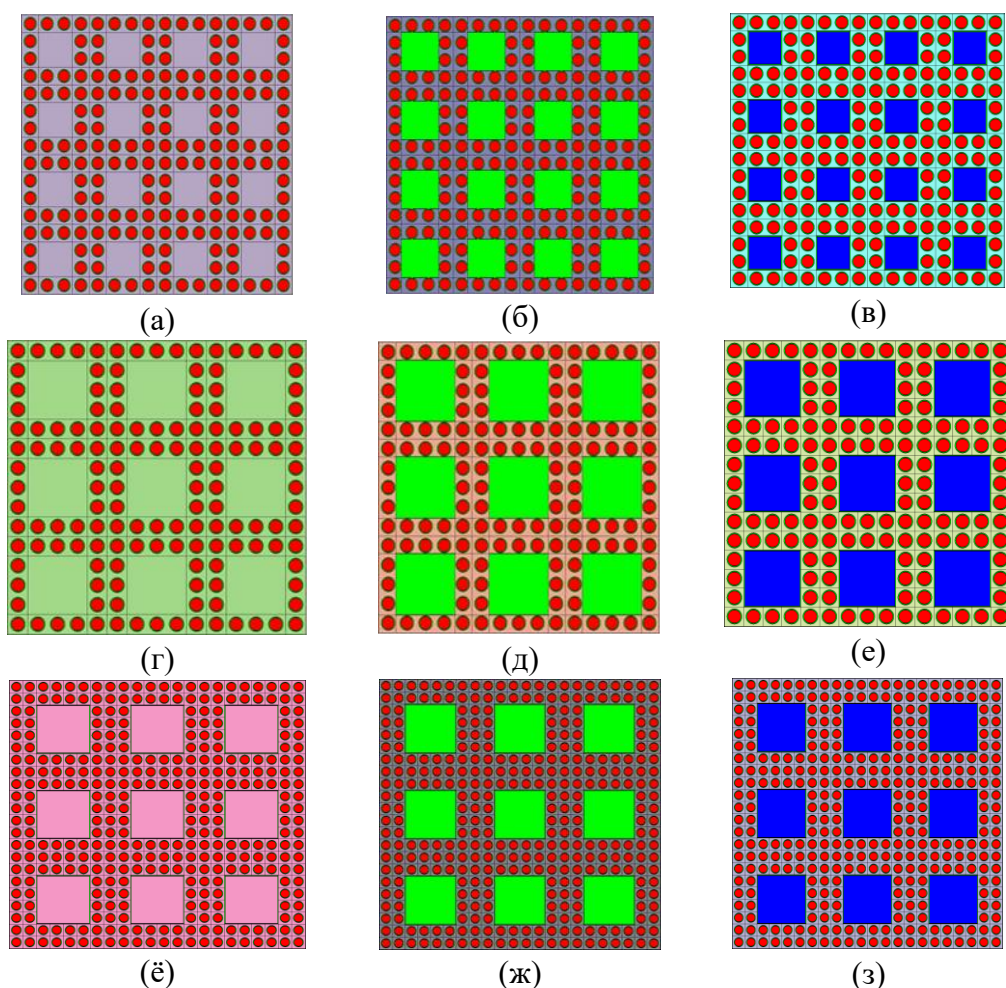


Рисунок 6 - Горизонтальное сечение предлагаемых моделей ТВС со вставленными водяными каналами, Zr-стержнями и стержнями из плексигласа, следовательно, в моделях «16x16 четыре» (а, б и в), «15x15 девять» (г, д и е) и «22x22 шестнадцать» (ё, ж и з).

Общее количество твэлов и количество стержней вытеснителей для всех моделей приведены в таблице 8. Результаты предлагаемых моделей сравниваются с моделями ТВС реакторов ВВЭР-1000 и PWR. В таблице 8 приведены результаты расчётов для исследуемых моделей с шагами решётки 1,26 и 1,2 см. Величина ΔK_{∞} имеет самые высокие значения -0,155, -0,186 в моделях «15x15 девять» с шагами решётки 1,26 и 1,2 см соответственно. Предпочтительным преимуществом предлагаемых моделей является меньшее количество вытеснителей воды в ТВС по сравнению с моделью ТВС ВВЭР-1000, рассмотренной в предыдущей главе.

Плексиглас участвует в замедлении быстрых нейтронов и введение стержней из плексигласа в тепловыделяющую сборку увеличивает коэффициент размножения. Следовательно, топливный цикл реактора может быть запущен с вставленными Zr-стержнями, и когда реактивность реактора снижается до определенного предела, Zr-стержни могут быть извлечены и заменены стержнями из плексигласа. А в конце цикла, стержни из плексигласа заменяются водными каналами для дальнейшего продления топливного цикла. Так появилась концепция комбинированных вытеснителей.

Таблица 8 - Первоначальные результаты исследуемых моделей с шагом решётки 1,26 и 1,2 см.

Параметр	«16x16 четыре»		«15x15 девять»		«22x22 шестнадцать»		ВВЭР	PWR
Количество ТВЭЛОВ	192		144		340		312	264
Количество Zr стержней	16		9		9		486	
Шаг решётки (см)	1,26	1,2	1,26	1,2	1,26	1,2	1,275	1,26
Водо-топливное отношение со Zr или плексигласовыми стержнями	1,84	1,54	1,72	1,44	1,70	1,42	1,09	
Водо-топливное отношение с водяными каналами	2,63	2,26	3,30	2,87	2,91	2,52	1,85	1,95
K_{∞} (С водными каналами)	1,4117	1,3954	1,4205	1,4150	1,4059	1,3981	1,3623	1,3789
K_{∞} (Со стержнями из плексигласа)	1,3479	1,3299	1,3286	1,3219	1,3303	1,3195	1,3146	
K_{∞} (Со Zr стержнями)	1,3005	1,2645	1,2704	1,2355	1,2892	1,2533		
ΔK_{∞} (Zr стержни - водные каналы)	-0,111	-0,131	-0,150	-0,179	-0,117	-0,145	-0,157	

Для предложенных моделей были рассчитаны параметры безопасности, такие как температурный коэффициент реактивности по замедлителю (α_M) и Доплеровский коэффициент реактивности (α_T). Из предыдущих исследований ясно видно, что температурный коэффициент реактивности по замедлителю (α_M) является очень важным параметром безопасности при реализации спектрального регулирования. В таблице 9 приведён температурный коэффициент реактивности по замедлителю (α_M) предлагаемых моделей со вставленными Zr-стержнями, стержнями из плексигласа и водяными каналами при шагах решётки 1,26 и 1,2 см. Модели «15x15 девять» и «22x22 шестнадцать» имеют во всех вариантах отрицательные величины α_M . Стержни из плексигласа поддерживают значения α_M в безопасном диапазоне по сравнению с водой, несмотря на то, что плексиглас состоит из лёгких элементов. Значения α_M со вставленными стержнями из плексигласа меньше, но сопоставимы с таковыми у реактора PWR. Расчёты выгорания для предлагаемых моделей проведены при шагах решётки 1,26 и 1,2 см. На рисунках 7 и 8 показано поведение бесконечного коэффициента размножения в зависимости от глубины выгорания для модели «15x15 девять» со вставленными Zr-стержнями, стержнями из плексигласа и водяными каналами. Скорость выгорания топлива при вставленных стержнях из плексигласа будет меньше, чем при –заполнении водой водяных каналов. Концентрация водорода в воде-замедлителе (0,048 атома/барн*см) составляет 60 % концентрации водорода в плексигласе (0,0305 атома/барн*см). Следовательно, эффективность замедления плексигласа будет меньше

эффективности водных каналов. Кривая выгорания с введёнными водными каналами пересекает кривую выгорания со вставленными стержнями из плексигласа при $K_{\infty}=1$.

Таблица 9 - Температурный коэффициент реактивности по замедлителю (α_M) в предлагаемых моделях со вставленными Zr стержнями, стержнями из плексигласа и водяными каналами при шаге решётки 1,26 и 1,2 см.

Температурный коэффициент реактивности по замедлителю (α_M) (*10 ⁻⁵ /K)						
Модель	Шаг решётки (см)		581-656	656-731	731-806	806-881
«16x16 четыре»	1,26	С водными каналами	-8,64	-9,47	-11,79	-14,47
		Со стержнями из плексигласа	-10,36	-9,81	-11,03	-11,83
		Со Zr стержнями	-20,14	-21,96	-25,24	-29,19
	1,2	С водными каналами	-8,64	-9,47	-11,79	-14,47
		Со стержнями из плексигласа	-10,36	-9,81	-11,03	-11,83
		Со Zr стержнями	-20,14	-21,96	-25,24	-29,19
«15x15 девять»	1,26	С водными каналами	-1,82	-3,18	-5,30	-7,65
		Со стержнями из плексигласа	-7,99	-6,34	-7,86	-7,77
		Со Zr стержнями	-22,00	-24,29	-27,72	-32,22
	1,2	С водными каналами	-4,51	-5,93	-8,15	-10,73
		Со стержнями из плексигласа	-8,87	-7,45	-8,66	-8,66
		Со Zr стержнями	-28,30	-30,35	-34,71	-40,05
«22x22 шестнадцать»	1,26	С водными каналами	-1,34	-3,41	-5,41	-8,16
		Со стержнями из плексигласа	-9,49	-8,27	-9,86	-9,77
		Со Zr стержнями	-20,94	-22,52	-26,10	-30,28
	1,2	С водными каналами	-4,01	-5,91	-8,31	-11,29
		Со стержнями из плексигласа	-9,85	-8,96	-10,47	-10,37
		Со Zr стержнями	-24,09	-26,43	-30,13	-34,61
ВВЭР -1000	1,275	С водой	-16,16	-17,52	-20,25	-23,22
		Со Zr стержнями	-36,74	-39,56	-43,62	-49,05
PWR	1,26	С водой	-14,07	-15,28	-17,90	-20,84

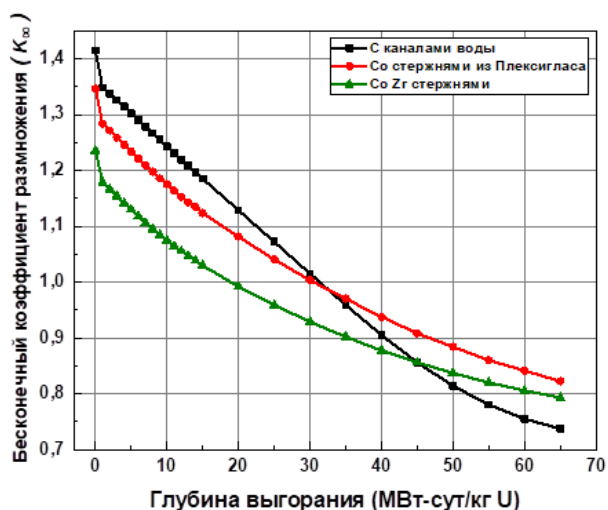


Рисунок 7 - K_{∞} в зависимости от глубины выгорания в модели «15x15 девять» с шагом решётки 1,2 см и со вставленными Zr-стержнями, стержнями из плексигласа и водяными каналами.

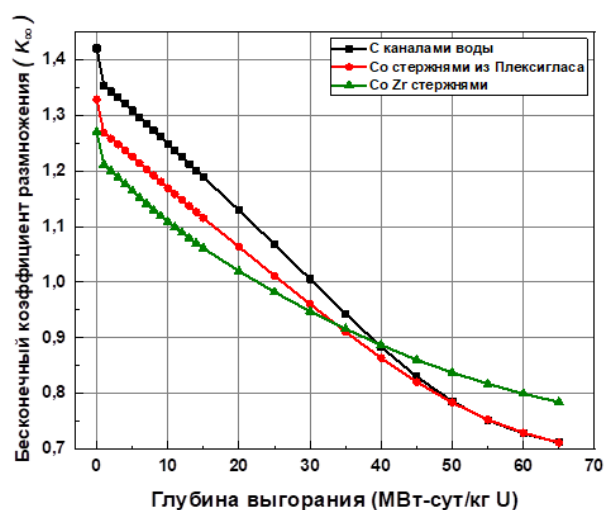


Рисунок 8 - K_{∞} в зависимости от глубины выгорания в модели «15x15 девять» с шагом решётки 1,26 см и со вставленными Zr-стержнями, стержнями из плексигласа и водяными каналами.

Исходя из предыдущих результатов, выбор наилучших моделей может быть основан на:

1. Стабильности параметров безопасности.
2. Диапазоне регулирования коэффициента размножения (ΔK_{∞}).
3. Количестве ТВЭЛов на один вытеснитель воды в ТВС.
4. Отношения объёма ячеек ТВЭЛов к объёму вытеснителей (%).

Модели «15x15 девять» и «22x22 шестнадцать» удовлетворяют предыдущими условиями на выбор наилучших моделей. В таблице 10 показано изменение водо-топливного отношения и разность бесконечного коэффициента размножения (ΔK_{∞}). Водо-топливное отношение в случае водных каналов определяет стабильность параметров безопасности при отсутствии вытеснителей воды. Доплеровский коэффициент реактивности (α_T) для всех моделей отрицательный. Изменение объёма замедлителя в ТВС серьёзно влияет на температурный коэффициент реактивности по замедлителю (α_M). Как следствие, с точки зрения параметров безопасности лучшие модели - «15x15 девять» и «22x22 шестнадцать» при шаге решётки 1,2 см. Параметры безопасности (α_M и α_T) для этих моделей при шаге решётки 1,2 даже при отсутствии стержней из Zr и плексигласа (водо-топливное отношение 2,867 и 2,515, соответственно) более надёжны и сопоставимы с параметрами безопасности реактора PWR. С другой стороны, вариация бесконечного коэффициента размножения (ΔK_{∞}) в этих моделях при шаге решётки 1,2 см составляет -0,178 и -0,1448 с Zr-стержнями. ΔK_{∞} со Zr-стержнями (0,178) в модели «15x15 девять» при шаге топлива 1,2 см больше, чем эффект максимальной концентрации борной кислоты ($\Delta K_{\infty} = 0,15$) в реакторе ВВЭР. В таблице 11 показаны количество ТВЭЛов на один вытеснитель воды (стержни из Zr или плексигласа) в ТВС (λ), отношение объёма ячеек ТВЭЛов к объёму вытеснителей количество вытеснителей воды и общее количество ТВЭЛов в ТВС всех предлагаемых моделей. Количество ТВЭЛов на один вытеснитель воды (λ), равное 16 и 38 в моделях «15x15 девять» и «22x22 шестнадцать». Отношение объёма ячеек ТВЭЛов к объёму вытеснителей (%) определяет диапазон оптимального объёма вытеснителей в ТВС. Отношение объёма ячеек ТВЭЛов к объёму вытеснителей (%) в моделях «15x15 девять» и «22x22 шестнадцать» составляет 56,25 и 42,35 %. Следовательно отношение объёма ячеек ТВЭЛов к объёму вытеснителей (%) при шаге решётки 1,2 см должен быть в этом диапазоне для эффективного регулирования вытеснителями воды.

Таблица 10 - Изменение бесконечного коэффициента размножения (K_{∞}), Водо-топливное отношение и температурного коэффициента реактивности по замедлителю для всех предлагаемых моделей со вставленными водяными каналами и вытеснителями.

Модель	Водо-топливное отношение с водяными каналами	Температурный коэффициент реактивности по замедлителю (α_M) (581-656 K)	ΔK_{∞} (стержни из плексигласа - водные каналы)	Водо-топливное отношение со Zr или плексигласовыми стержнями	ΔK_{∞} (Zr-стержни - водные каналы)
22x22 шестнадцать (1,2 см)	2,515	-4,014	-0,07860	1,420	-0,1448
15x15 девять (1,2 см)	2,867	-3,086	-0,093	1,439	-0,179
22x22 шестнадцать (1,26 см)	2,912	-1,338	-0,076	1,702	-0,117
15x15 девять (1,26 см)	3,302	-1,822	-0,092	1,722	-0,150

Таблица 11 - Количество ТВЭЛов на один вытеснитель воды в ТВС (λ) и отношение объёма ячеек ТВЭЛов к объёму вытеснителей для всех предлагаемых моделей.

Модель	Количество ТВЭЛов	Количество вытеснителей воды	Количество ТВЭЛов на один вытеснитель воды в ТВС (λ)	Отношение объёма ячеек ТВЭЛов к объёму вытеснителей (%)
Серпинский	64	9	7,11	20,31
18x18 один	288	36	8	12,50
16x16 четыре	192	14	13,71	33,33
15x15 девять	144	9	16	56,25
18x18 шестнадцать	180	9	20	80,00
22x22 шестнадцать	432	9	38	42,35
24x24 шестнадцать	340	9	48,00	33,33

Регулирование избыточной реактивности может быть выполнено путём последовательной замены Zr-стержней на стержни из плексигласа и водяные каналы. Реактор может запускаться со вставленными Zr-стержнями в качестве вытеснителей воды. После периода от начала выгорания до исчерпания потенциала топлива реактивность реактора может быть увеличена за счёт замены Zr-стержней стержнями из плексигласа. На последних этапах выгорания замена стержней из плексигласа на водные каналы может обеспечить дополнительную положительную реактивность и продлить кампанию реактора. Последовательная замена между разными вытеснителями воды выполняется в двух режимах, чтобы показать, как режим замены влияет на глубину выгорания. Первый режим включает три этапа замены, а второй режим включает семь шагов для последовательной замены всех материалов. На рисунках 9 и 10 показано сравнение ре-

результатов выгорания при заполненных водяных каналах и при последовательной замене стержней вытеснителей воды из разных материалов; первый и второй режим замены, соответственно для модели «15x15 девять». Реактор сохраняет свою критичность с введёнными водяными каналами до глубины выгорания 30 МВт. Сут. / кг U, но при последовательной замене стержней вытеснителей воды из разных материалов по первому и второму режиму замены, глубина выгорания достигает 36,75 и 39,20 МВт. Сут. / кг U следовательно. Произведённый и накопленный плутоний на первых стадиях выгорания может эффективно увеличить глубину выгорания путём применения оптимальной модели замены вытеснителей воды.

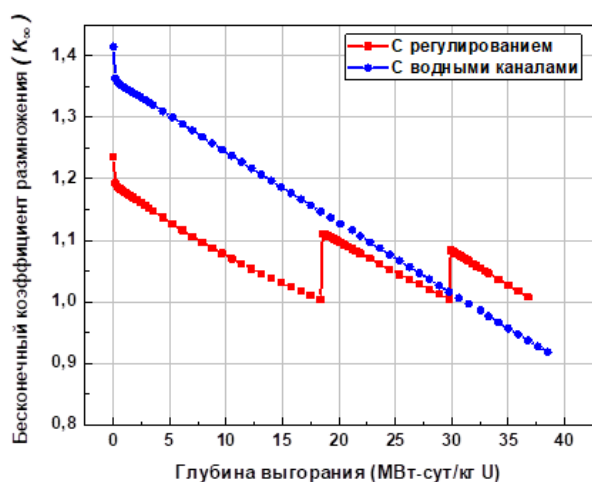


Рисунок 9 - K_{∞} в зависимости от глубины выгорания в модели «15x15 девять» с водяными каналами и при последовательной замене стержней вытеснителей воды (первый режим замены).

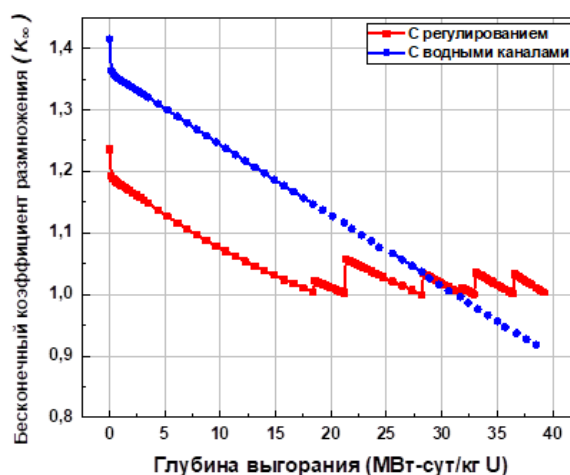


Рисунок 10 - K_{∞} в зависимости от глубины выгорания в модели «15x15 девять» с водяными каналами и при последовательной замене стержней вытеснителей воды (второй режим замены).

Четвертая глава посвящена управлению избыточной реактивностью в реакторе PWR за счёт изменения состава топлива и размещения топлива в гетерогенном и гомогенном распределении. Анализируется влияние замены U-238 в UO₂ на Th-232 на реактивность реактора для исследования их способности подавлять начальную избыточную реактивность. Исследованы несколько моделей, которые разделены на две группы и сравнены их свойства со стандартной структурой топлива реактора PWR. Общая цель текущей работы - исследование нового метода для полного отказа от борного регулирования запаса реактивности реактора PWR.

Размещение топлива в гетерогенном распределении реализуется по концепции двойной активной зоны (Blanket-Seed) (BS) (с запальной зоной и зоной воспроизводства). Запальная зона представляет собой источник нейтронов, а воспроизводящий материал помещается в окружающую область (зона воспроизводства). Таким образом,

нейтроны переносятся из запальной зоны в зону воспроизводства, и воспроизводящий материал в ней превращается в делящийся.

Тепловыделяющая сборка Westinghouse PWR была выбрана в качестве тестовой задачи для представленного исследования. Трёхмерная геометрия тепловыделяющей сборки PWR моделируется с использованием MCNPX версии 2.7 с библиотеками поперечных сечений ENDF / B-VII.0. На рисунке 11 (а) показано горизонтальное сечение стандартной топливной сборки PWR. Предлагается разделить сборку PWR на две области: область зоны воспроизводства (Blanket) и область запальной зоны (Seed), как показано на рисунке 11 (б). Зона воспроизводства содержит 156 топливных стержней, а запальная зона содержит 108 топливных стержней. И стержни запальной зоны, и стержни зоны воспроизводства имеют одинаковые размеры.

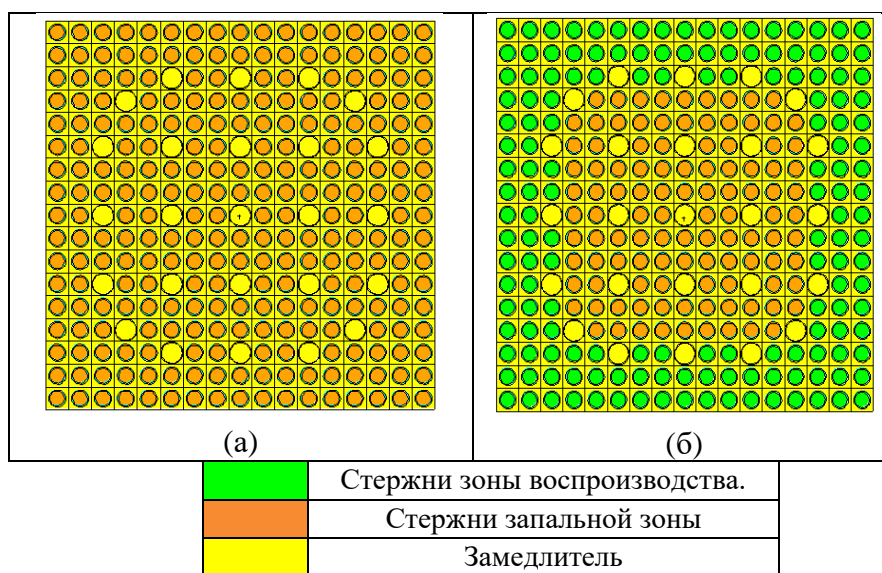


Рисунок 11 - Горизонтальное поперечное сечение тепловыделяющей сборки PWR, (а) Стандартная тепловыделяющая сборка PWR, (б) ТВС с двойной активной зоной PWR.

Замена воспроизводящего компонента в топливе реактора PWR на Th-232 в гомогенном и гетерогенном размещении топлива исследована на двух этапах. Первый этап заключается в частичной замене U-238 в топливе PWR на Th-232. А второй этап представляет собой полную замену U-238 в топливе PWR на Th-232. Получается десять моделей которые разделены на две группы.

В Первой группе различные типы топлива исследуются либо в однородном, либо в гетерогенном распределении (BS). Таблица 12 иллюстрирует свойства исследованных видов топлива. UO₂ - традиционное топливо сборки PWR. Фертильный материал (U-238) в UO₂ заменяется Th-232. Оба типа топлива исследуются в стандартной топливной сборке и в сборке BS для исследования влияния конструкции BS на нейтронно-физические характеристики PWR в дополнение к влиянию Th-232.

Таблица 12 - Свойства исследуемых видов топлива.

Тип топлива	Запальная зона	Зона воспроизводства	Плотность топлива в запальной зоне (г / см ³)	Плотность топлива в зоне воспроизводства (г / см ³)
UO ₂	UO ₂ (4,7 мас.%)		10,22	
(Th, U-235)O ₂	(Th, U-235)O ₂ (4,7 мас.%)		9,64	
BST-1	UO ₂ (10,43 мас.%)	UO ₂ (0,711 мас.%)	10,22	
BST-2	UO ₂ (11,69 мас.%)	ThO ₂	10,22	9,64

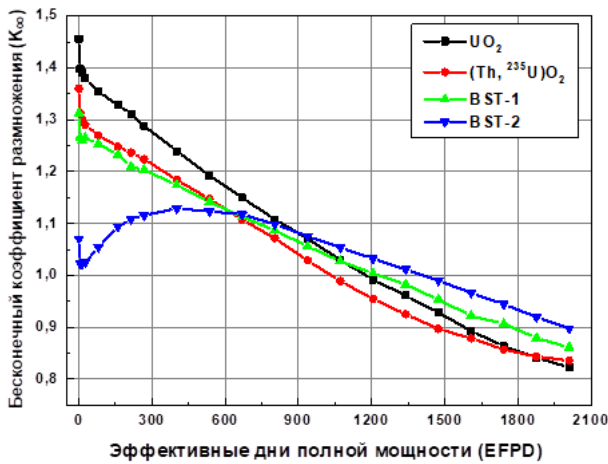


Рисунок 12 - Изменение K_{∞} в зависимости от эффективных дней полной мощности (EFPD) для исследуемых видов топлива.

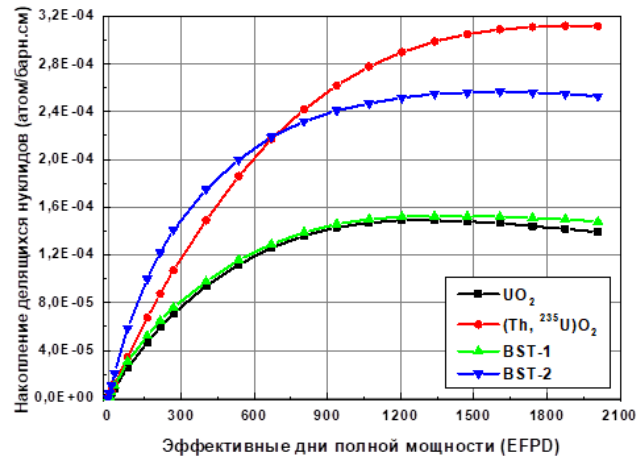


Рисунок 13 - Изменение концентрации делящихся нуклидов в зависимости от эффективных дней полной мощности (EFPD) для исследуемых видов топлива.

Подходящее управление избыточной реактивностью в начале топливного цикла обеспечивает экономическую целесообразность используемого топлива. На рисунке 12 показано изменение значений K_{∞} в зависимости от эффективных дней полной мощности (EFPD) для исследуемых типов и конструкций топлива. В стандартной модели PWR замена U-238 в UO_2 на Th-232 снижает начальные значения K_{∞} примерно на 6%, но новые значения K_{∞} все ещё остаются высокими. UO_2 , так и $(Th, U-235)O_2$ были исследованы в предлагаемой сборке BS PWR с различными схемами, названными BST-1 и BST-2, соответственно. В случае BST-1 K_{∞} уменьшается примерно на 9%, в то время как K_{∞} в случае BST-2 уменьшается примерно на 26,4%. Использование сборки BS уменьшило начальную избыточную реактивность, поскольку сборка BS позволяет тепловым нейтронам уходить от делящегося материала, существующего в запальной зоне, к воспроизводящему материалу в зоне воспроизводства. Воспроизводящий материал улавливает тепловые нейтроны. Следовательно, производство делящегося материала в случаях BST-1 и BST-2 больше, чем UO_2 и $(Th, U-235)O_2$, соответственно, как показано на рисунке 13. В случае BST-2 значение K_{∞} увеличивалось с выгоранием топлива до 450 EFPD, затем начало медленно уменьшаться. Это связано с производством

U-233 из Th-232 в большом количестве, особенно в этот период. Делящиеся материалы, образующиеся в топливе на основе тория, больше, чем топливо на основе урана, поскольку сечение поглощения тепловых нейтронов торием больше, чем ураном.

Из предыдущих результатов мы сможем сделать вывод что, частичная замена воспроизводящего материала в UO₂ на Th-232 в гетерогенном размещении топлива (Blanket-Seed) улучшает управление избыточной реактивностью для отказа от борной кислоты.

Во **второй группе** шесть моделей структуры топлива исследуются и сравниваются со стандартной рабочей структурой топлива PWR. В этой части исследование будет сосредоточено на полной замене воспроизводящего материала на Th-232 и его комбинации с различными делящимися материалами, как в гетерогенном, так и в гомогенном распределении делящегося материала. Два типа делящегося материала (U-235 и U-233) исследуются в предлагаемых топливных структурах. Состав топлива и обогащение всех моделей приведены в таблице 13.

Таблица 13 - Топливный состав и обогащение топлива в исследуемых моделях ТВС PWR.

Модели гомогенного распределения топлива			
Модель	состав топлива		Обогащение в ТВС (мас. %)
FAT-1	UO ₂		4,7
FAT-2	(Th, U-235)O ₂		4,7
FAT-3	(Th, U-233)O ₂		4,7
FAT-4	ThO ₂ + UO ₂ (19,75 мас. %)		4,7
Модели гетерогенного распределения топлива			
Модель	Запальная зона	Зона воспроизводства	Обогащение в запальной зоне (мас. %)
FAT-5	(Th, U-235)O ₂	ThO ₂	11.69
FAT-6	(Th, U-233)O ₂	ThO ₂	11.69
FAT-7	ThO ₂ + UO ₂ (19,75 мас. %)	ThO ₂	11.69

На рисунке 14 приведены зависимости коэффициента размножения (K_{∞}) от степени выгорания для предлагаемых тепловыделяющих сборок. Значения K_{∞} уменьшаются в зависимости от степени выгорания в первых четырёх моделях (FAT-1, FAT-2, FAT-3 и FAT-4). Делящийся материал в первых четырёх моделях распределён равномерно. Воспроизводство делящегося материала с Th-232 лучше, чем с U-238. Следовательно, значения K_{∞} в FAT-2 и FAT-4 ниже, чем в FAT-1. Значения K_{∞} в FAT-3 выше, чем в FAT-1, FAT-2 и FAT-4. Делящийся материал U-233 отличается более высоким числом испускаемых нейтронов на одно деление (2,4968) и низким поперечным сечением радиационного захвата нейтронов (45 Барн) по сравнению с U-235. Воспроизводящий материал в области воспроизводства в моделях двойной активной зоны (Blanket-Seed) (BS) поглощает нейтроны, испускаемые из запальной области, и превращается в

делящиеся изотопы. С этой точки зрения Th-232, который имеет сечение поглощения тепловых нейтронов в три раза больше, чем U-238, поэтому существует подавление значений K_{∞} в моделях FAT-5, FAT-6 и FAT-7 в начале цикла. Значения K_{∞} медленно увеличиваются от 3 МВт-сут/кг U до 17 МВт-сут/кг U из-за выделения U-233 из Th-232, затем значения K_{∞} медленно уменьшаются с выгоранием до конца топливного цикла. Значение K_{∞} в случае FAT-5, FAT-6 и FAT-7 уменьшается примерно на 28,8%, 16,5% и 29,2% соответственно от эталонных значений K_{∞} . Использование Th-232 в модели BS увеличивает срок службы топлива примерно на 31%, как показано на рисунке 14.

Расход делящегося материала в зависимости от степени выгорания включает расход загруженных и генерируемых делящихся материалов. Накопление образовавшегося делящегося материала представляет собой эффективность реактора на преобразовании делящегося материала. На рисунке 15 показано отношение расхода делящегося материала (FIS/IHM) в зависимости от степеней выгорания в предлагаемых топливных структурах. Отношение FIS/IHM представляет собой отношение концентрации делящихся изотопов на данной стадии выгорания ко всем тяжёлым изотопам, включая фертильные (IHM) при нулевом выгорании. На рисунке 15 структура двойной активной зоны (BS) в FAT-5, FAT-6 и FAT-7 обеспечивает более эффективное преобразование.

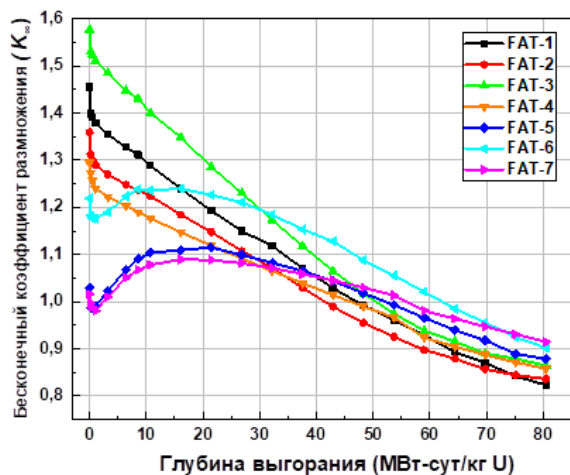


Рисунок 14 - K_{∞} в зависимости от выгорания для тепловыделяющих сборок PWR, работающих на различных топливных структурах.

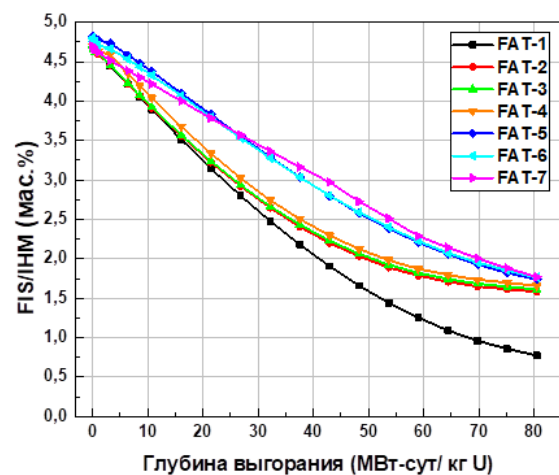


Рисунок 15 - Расход делящегося материала в зависимости от выгорания в топливной сборке PWR, работающей на различных топливных структурах.

На основании изложенного в четвертой главе, можно заключить, это исследование показало, что новый подход к управлению реактивностью реактора PWR с изменением структуры топлива и распределения делящегося материала. Исследованные модели показали существенное поглощение нейтронов внутри активной зоны реактора и открыли путь к реализации концепции отказа от растворимого бора в энергетических

реакторах PWR. Модели FAT-6 и FAT-7 считаются наиболее многообещающими моделями, поскольку они подавляют избыточную реактивность в начале цикла, обеспечивают более длительный топливный цикл, чем эталонная тепловыделяющая сборка, достигают более высокой способности преобразования, производят наименьшее количество изотопов плутония и низкие младшие актиниды. В этих моделях получается плоская зависимость K_{∞} до глубины выгорания 50 МВт-сут/кг U. Параметры безопасности для всех исследованных моделей обеспечивают безопасность эксплуатации PWR.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На базе программы SERPENT создана расчётная модель «идеальной» схемы спектрального регулирования путём внедрения вытеснителей из различных материалов непосредственно в межтвэльное пространство. Показано, что с помощью вытеснителей можно достичь такой же компенсации избыточной реактивности, как и для борного регулирования при максимально допустимой концентрации бора в активной зоне. При этом выгорание топлива увеличивается на 20%.

2. Выполнена оценка повышения диапазона регулирования реактивности с помощью вытеснителей как при увеличении шага решётки твэлов, так и при изменении состава вытеснителей. Показано увеличение диапазона регулирования при увеличении шага решётки твэлов до 14 мм, с сохранением внутренне присущих свойств безопасности, а при использовании тяжёлых вытеснителей, содержащих сырьевые изотопы, диапазон регулирования увеличивается в 2-3 раза.

3. Расчётным путём показано, что при одинаковых весовых содержаниях делящегося изотопа в топливе (3,7%) диапазон компенсации избыточной реактивности в урановом топливе в полтора раза больше, чем в ториевом топливном цикле с использованием вытеснителей, погружаемых непосредственно в межтвэльное пространство в реакторе ВВЭР-1000.

4. Предложены новые конструктивные варианты ТВС водо-водяных реакторов с квадратной решёткой твэлов, в которых демонстрируется практическая возможность реализации спектрального регулирования с использованием комбинированных вытеснителей, состоящих из циркония и плексигласа, которые обеспечивают такой же большой диапазон регулирования избыточной реактивности с безопасными параметрами реактивности, как и при борном регулировании с максимально-допустимой концентрацией борной кислоты.

5. Показана возможность использования изменения состава топлива и структуры распределения делящегося и сырьевого материала в ТВС для управления избы-

точной реактивностью в водо-водяных реакторах с квадратной решёткой твэлов. В гетерогенных комбинациях топлива $\text{ThO}_2 + \text{UO}_2$ (19,75 мас. %) и $(\text{Th}, \text{U-233})\text{O}_2$ достигается почти постоянная величина коэффициента размножения от выгорания до величины 50 МВт·сут/кг U. При этом сохраняются безопасные внутренние эксплуатационные параметры.

Основные публикации по теме диссертации.

1. **A.I. Elazaka**, G.V. Tikhomirov, Potential of the VVER reactor spectral regulation with regard for fuel burn-up, **Izv. Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yad. Energ.** 2020 (2020) 27–38. <https://doi.org/10.26583/npe.2020.2.03>. (**БАК и Scopus**)
2. **A.I. Elazaka**, G.V. Tikhomirov, A. Abdelghafar Galahom, Study the neutronic feasibility of using Zr as an energy regulator instead of traditional methods, **Int. J. Energy Res.** 45 (2021) 10012–10023. <https://doi.org/10.1002/er.6494> . (**Scopus**)
3. A.A. Galahom, **A.I. Elazaka**, G.V. Tikhomirov, Searching for managing the reactivity and increasing the fuel cycle life in the PWR by an untraditional method, **Nucl. Eng. Des.** 383 (2021) 111433. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111433>. (**Scopus**)
4. **A.I. Elazaka**, G.V. Tikhomirov, V.I. Savander, M. A.E.Abdel-Rahman, A. Abdelghafar Galahom, Investigation of a new approach for regulating the reactivity and achieving economic feasibility using Thorium in a blanket-seed assembly of pressurized water reactors, **Int. J. Energy Res.** (2021). <https://doi.org/10.1002/er.7551>. (**Scopus**)
5. **A.I. Elazaka**, G.V. Tikhomirov, V.I. Savander, Comparative Study of Spectral Regulation Range of Excess Reactivity Control in Pressurized Water Reactors Using Zirconium Displacers for Uranium and Thorium Fuel Cycles, **Glob. Nucl. Saf.** 39 (2021) 58–67. <https://doi.org/10.26583/gns-2021-02-06>. (**БАК**)