

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

На правах рукописи



Музаров Анвар Рустамович

**Снижение водообмена и коэффициента неравномерности энерговыделения
в активной зоне реакторов ВВЭР
при использовании различных выгорающих поглотителей**

2.4.9 – ядерные энергетические установки, топливный цикл,
радиационная безопасность

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук,
доцент
Савандер Владимир Игоревич

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ НАЧАЛЬНОЙ ИЗБЫТОЧНОЙ РЕАКТИВНОСТИ В РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР И ПОДХОДЫ К СНИЖЕНИЮ ОБЪЕМОВ БОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ.	17
1.1. Борное регулирование	19
1.2. Подходы к снижению запаса реактивности компенсируемой системой жидкостного регулирования.....	22
1.3. Выгорающие поглотители	27
1.4. Регулирование реактивности при помощи пэлов.....	32
1.5. Спектральное регулирование	34
ГЛАВА 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫГОРАЮЩИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВОДООБМЕНА ПРИ ЖИДКОСТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ В РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР.....	36
2.1. Постановка задачи определения зависимости коэффициента размножения ТВС в процессе выгорания топлива, при которой критичность реактора поддерживается выгорающими поглотителями	37
2.2. Модели для проведения расчетов.....	43
2.3. Расчет кампании реактора	48
2.4. Влияние весового содержания гадолиния в твэгах при их различных конфигурациях расположения в ТВС на нескомпенсированный запас реактивности.....	54
2.4.1. Зависимость нескомпенсированного запаса реактивности от весового содержания гадолиния в твэгах при схеме расположения с большим числом твэгов в ТВС (1:6).....	54
2.4.2. Зависимость нескомпенсированного запаса реактивности от весового содержания гадолиния в твэгах при схеме расположения с числом твэгов в ТВС (1:18)	57
2.5. Методика и результаты расчета водообмена при использовании жидкостной системы компенсации избыточной реактивности.....	60

2.6. Влияние повышенного содержания гадолиния в ТВС с большим числом твэлов на эффективности органов регулирования и коэффициент неравномерности энерговыделения	66
2.7. Выводы ко второй главе	70
ГЛАВА 3. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭРБИЯ В КАЧЕСТВЕ ВЫГОРАЮЩЕГО ПОГЛОТИТЕЛЯ В РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР	71
3.1. Нейтронно-физические характеристики эрбьевого выгорающего поглотителя.....	72
3.2. Постановка задачи и методика формирования концентраций РЕМИКС-топлива	77
3.2.1. Расчетный анализ вариантов с использованием РЕМИКС-топлива ...	81
3.3. Методика выбора оптимального весового содержания эрбия при замене выгорающего поглотителя гадолиния.....	83
3.3.1. Расчет коэффициентов реактивности для элементарной ячейки и полиячейки.....	85
3.3.2. Расчет коэффициентов реактивности для модели частичных перегрузок.....	91
3.4. Выводы к третьей главе	97
ГЛАВА 4. СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫГОРАЮЩИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ.....	98
4.1. Изменение запаса реактивности и относительных объемов водообмена при совместном использовании выгорающих поглотителей при соотношении твэлов и твэлов в ТВС 1:18	99
4.2. Выводы к четвертой главе	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	107
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	108
БЛАГОДАРНОСТИ	109
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	110

ВВЕДЕНИЕ

Основополагающий элемент для развития промышленности, науки, техники и человечества в целом является электрическая энергия. Современные темпы роста энергопотребления требуют увеличения генерируемых мощностей, покрывающие базовую нагрузку. Атомная электростанция (АЭС) – один из немногих источников энергии, покрывающих такую нагрузку. При этом срок службы АЭС – более длительный, и углеродный след ниже, чем у остальных источников энергии [1, 2]. Перспективность этого способа получения энергии – актуальный вопрос развития общества. «Необходимость и целесообразность использования АЭС в обозримое время», – было подчеркнуто на конференции сторон рамочной конвенции ООН об изменении климата. Увеличение доли энергии, вырабатываемой на АЭС, может служить решением растущей проблемы с изменением климата [3].

Стоить отметить, что снижающиеся цены за 1 кВт·ч выработанной энергии с использованием возобновляемых источников энергии создают достойную конкуренцию по срокам строительства и финансовым вложениям [4, 5]. Кроме того, сроки окупаемости сооружаемых станций являются одним из ключевых факторов, определяющих их рентабельность. Так, срок окупаемости АЭС, как инвестиционного проекта, может достигать 15 лет с момента начала строительства. Стоит отметить, что во многом эти значения будут зависеть от простоев в строительстве и отклонений от графика работ [6]. Однако, учитывая, что срок службы возводимых АЭС равен 60 лет с возможностью дальнейшего продления еще на 20 лет, становится ясно, что строительство АЭС является долгосрочной перспективой с большим заделом на будущее. Страх общественности перед строительством новых энергоблоков после аварий на Чернобыльской АЭС и на АЭС Фукусима-Дайichi является еще одним фактором, задерживающим развитие отрасли в целом [7–9]. На сегодняшний день управление реактором преимущественно осуществляется системой автоматики и управления, в которой заложены все возможные сценарии развития событий. Последнее снижает вероятность различных чрезвычайных происшествий на АЭС [10]. Образование облученного ядерного топлива (ОЯТ) при работе АЭС – один из главных

недостатков использования атомной энергии. Хранение, транспортировка и переработка ОЯТ требуют надлежащего контроля, что влечет дополнительные финансовые затраты. Одним из способов решения проблемы накопившегося ОЯТ – возвращение остаточного ^{235}U в составе выгруженного топлива на повторный рецикл путем формирования РЕМИКС-топлива. Для реакторов типа ВВЭР переход на РЕМИКС топлива является приоритетной задачей развития атомной энергетики в России [11–13]. Это топливо из уран-плутониевого регенератора, полученного из ОЯТ, очищенного от минорных актинидов и продуктов деления, смешивается с низкообогащенным ураном. Такой переход может решить острую проблему использования накопившегося ОЯТ, вовлечь накопленный плутоний в топливный цикл действующих АЭС и повысить эффективность использования природного урана (текущих запасов урана хватит примерно на 200 лет) [14, 15].

Генерация электрической энергии на АЭС основывается на контролируемой цепной реакции деления, которая происходит в АЗ реактора. С момента запуска первой АЭС технологии проектирования, эксплуатации и строительства ушли далеко вперед. На сегодняшний день существует различные виды реакторов по разным классификациям. Согласно базе данных PRIS (МАГАТЭ) [16], самыми распространенными реакторами считаются реакторы с водой под давлением. К этой категории относятся реакторы типа ВВЭР, в которых легкая вода (H_2O) одновременно выполняет роль замедлителя и теплоносителя. Этапы развития технологии ВВЭР включают в себя несколько поколений. При этом в каждом новом поколении достигается большая мощность и безопасность с учетом опыта эксплуатации и аварий на АЭС. В поколении 3+ (ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ), которое является усовершенствованным вариантом поколения 3 (ВВЭР-1000), добавлены ловушка расплава для предотвращения выхода кориума за пределы энергоблока [17, 18]. Увеличение мощности реакторных установок приводит к более строгим требованиям к конструктивным материалам.

Актуальность работы

Увеличение вырабатываемой энергии в современных реакторах типа ВВЭР частично достигается за счет повышения массы топлива в ТВС и средней глубины выгорания выгружаемого топлива. Первое достигается за счет увеличения высоты топливного столба и замены отверстия в центре таблетки на небольшую выемку. Среднюю глубину выгорания топлива можно повысить при помощи частичных перегрузок топлива с высокой кратностью, уменьшая кампанию реактора и увеличивая начальное обогащение топлива. Снижение длительности кампании реактора приводит к понижению коэффициента использования установленной мощности (КИУМ), увеличивая время простоя во время перегрузки. Рост обогащения по ^{235}U до 5 % позволил перейти на удлиненные топливные кампании. Обогащение до 5 % пока строго регламентировано в требованиях МАГАТЭ для легководных реакторов. Рост мощностей реакторных установок может привести к пересмотру этого порога [19]. Переход на удлиненные топливные кампании увеличивает КИУМ путем понижения количества перегрузок, что занимает немало времени для реакторов с водой под давлением. Простой реактора в процессе перегрузки негативно отражается на финансовой рентабельности атомной станции [20]. Уменьшение количества перегрузок снижает продолжительность всей топливной кампании. Эффективность такого перехода обуславливается современными низкими ценами на уран. ТВС, разработанные по данной технологии, пока позволяют снизить себестоимость электрической энергии за счет понижения затрат на перегрузку топлива из-за уменьшения количества простоев. Переход на 1,5-годичную топливную кампанию уже осуществляется на АЭС с реактором ВВЭР, эксплуатируемым в России и за рубежом. В перспективах переход на двухгодичную топливную кампанию (24 месяца) [21, 22].

При переходе на длительные топливные кампании увеличивается начальный запас реактивности в реакторе. Возникающий запас реактивности преимущественно компенсируется жидкостной системой регулирования, которая основывается на растворении борной кислоты (H_3BO_3) в теплоносителе. Данный способ компенсации является регулируемым, регулирование производится путем

отбора теплоносителя из первого контура и добавления концентрированного раствора борной кислоты в момент роста реактивности или добавления такого же объема дистиллята для поддержания критичности в период спада реактивности в течение кампании. Введение борной кислоты не приводит к локальным неоднородностям плотности потока нейтронов в АЗ реактора, поскольку концентрация борного поглотителя практически равномерно распределена в теплоносителе – в этом заключается главное достоинство данного метода компенсации реактивности [23, 24]. Однако концентрация борной кислоты в теплоносителе ограничена в связи с негативным влиянием бора на плотностной коэффициент реактивности из-за добавочного поглощения в замедлителе [25]. Использование жидкостного регулирования аккумулирует низкоактивные радиоактивные отходы (НАО), которые накопились за все время работы АЭС с реактором типа ВВЭР. Необходимо вложение финансовых средств для переработки, транспортировки и дальнейшего хранения НАО, что снижает конкурентоспособность АЭС по сравнению с другими источниками энергии. Особую проблему в накопленных НАО создает тритий, который негативно сказывается на жизнедеятельности всей АЭС [26–28]. Наличие борной кислоты в теплоносителе приводит к активному корродированию материалов АЗ реактора и наличию примесей в теплоносителе, как следствие происходит деградация конструкционных материалов. Последнее усложняет процесс очистки теплоносителя и технического обслуживания главных циркуляционных трубопроводов и может повлечь аварию с потерей теплоносителя (LOCA) [29].

Вторым методом компенсации избыточной реактивности служит использование поглощающих элементов (пэл) в составе ТВС. Для реакторов ВВЭР поглощающие элементы изготавливаются в виде стержней из карбида бора (B_4C), обогащенного по ^{10}B [30]. Стержни из чистого бора, в связи радиационной нестойкостью и непрочностью бора, не применяются. Основными преимуществами карбида бора являются высокое микросечение поглощения нейтронов в тепловой области энергий ($^{10}B \sim 4000$ б) и относительная дешевизна природного бора [31]. В процессе выгорания ^{10}B накапливается большое

количество ${}^4\text{He}$, который создает большое давление и может разрушить оболочку. Максимально выгорание поглощающих стержней не превышает 45–50 %, а это всего 3 года пребывания в реакторе, при том, что карбид бора, обогащенный по ${}^{10}\text{B}$, имеет более высокую цену. По причине небольшой температуры плавления карбид бора не отвечает современным требованиям, предъявляемым к поглощающим стержням в аварийных ситуациях [32].

Последним из используемых способов компенсации реактивности является применение интегрированных в топливную матрицу выгорающих поглотителей. В реакторах ВВЭР наибольшую популярность получил выгорающий поглотитель на основе оксида гадолиния (Gd_2O_3) [33, 34]. Гадолиний проявляет свойства поглотителя благодаря своим нечетным изотопам ${}^{155}\text{Gd}$ и ${}^{157}\text{Gd}$, которые обладают большим сечением поглощения в тепловой области спектра нейтронов. В процессе выгорания они переходят в стабильные четные изотопы. Большое сечение поглощения приводит к выгоранию гадолиния в течение одной кампании, и, таким образом, гадолиний не снижает продолжительность кампании, что является его основным преимуществом. Твэлы, содержащие в своем составе гадолиний, называются твэгами. В ТВС реактора ВВЭР используется небольшое число твэгов. Концентрация гадолиния в твэгах варьируется в пределах 5–8 % [35]. Большая концентрация гадолиния в твэге увеличивает неравномерность поля энерговыделения. Это чревато ростом температуры топлива и оболочки в твэлах и может привести к разрушению циркониевой оболочки. По мере выгорания гадолиния неравномерность уменьшается. Также повышение содержания гадолиния ухудшает теплопроводность диоксида урана и приводит к увеличению разности температуры в центре и на крае топливной таблетки [36]. Это может привести к растрескиванию топливной таблетки, что является нарушением одного из барьеров безопасности.

Альтернативным выгорающим поглотителем является эрбий. Эрбий эффективно используется в реакторах РБМК [37]. В составе природного эрбия свойства поглотителя проявляет изотоп ${}^{167}\text{Er}$, который имеет резонанс в тепловой области энергий нейтронов. Эрбий – относительно слабый поглотитель и может

размещаться во всех твэлах. Однородность расположения не создает проблем с неравномерностью энерговыделения. Эрбий влияет на реактивность в течение всей топливной кампании и равномерно выгорает вместе с топливом [38]. Остаточное содержание эрбия снижает выгорание выгружаемого топлива и, как результат, приводит к неполному выгоранию ^{235}U . Переход на РЕМИКС-топливо через повторное использование остаточного ^{235}U в уран-эрбиевом топливе может частично компенсировать потери на выгорание в открытом топливном цикле и сократить расход природного урана.

Переход на длительные топливные кампании оставляет актуальным вопрос компенсации возникающей избыточной реактивности. При этом именно применение выгорающих поглотителей, интегрированных в топливную матрицу, может понизить негативные последствия от этого перехода и уменьшить аккумулируемые НАО через снижение объемов водообмена при компенсации избыточной реактивности.

В данной работе рассмотрены влияние весового содержания гадолиния в твэгах и пространственное расположение выгорающих поглотителей в активной зоне на компенсируемый избыточный запас реактивности. Для гадолиния особо рассмотрены случаи с большим числом твэгов в активной зоне (1:6) по отношению к существующим вариантам (1:18) на упрощенных расчетных моделях. Также анализируется совместное использование этих поглотителей. Получены зависимости изменения коэффициента размножения от времени и выгорания.

Особое внимание в работе уделялось анализу влияния выгорающих поглотителей (ВП) на параметры внутренне присущих свойств безопасности, а именно - плотностной и полный температурный коэффициенты реактивности по теплоносителю. Показано изменение коэффициентов реактивности в зависимости от вида и весового содержания ВП. Рассмотрены реальные варианты расположения твэгов в АЗ реактора.

Все расчеты проводились с использованием программного кода *PSG2/SERPENT*, реализующего метод Монте-Карло [39]. Данное программное средство позволяет рассчитать изменение нуклидного состава ядерного топлива в

процессе выгорания, коэффициент размножения нейтронов, энерговыделение топливных сборок и других важных параметров реактора в двух- и трехмерной геометрии. Функционал программы *PSG2/SERPENT* позволяет моделировать сложную геометрию и проводить расчеты АЗ с детальным описанием каждой отдельной структуры. Программные коды, реализующие метод Монте-Карло, хорошо зарекомендовали себя при проведении бенчмарк расчетов с малой погрешностью, и они часто используются для дополнения или верификации экспериментальных данных [40].

Цели и задачи исследования

Цель диссертационной работы – обоснование возможности снижения водообмена при жидкостном регулировании и степени неравномерности энерговыделения в ТВС и активной зоне за счет использования выгорающих поглотителей, интегрированных в топливную матрицу, путем выбора типа выгорающего поглотителя, весового содержания поглотителя в твэлах и числа твэлов с поглотителем.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработка упрощенной математической модели процесса выгорания топлива при частичных перегрузках и теоретическое обоснование возможности использования выгорающих поглотителей для полной компенсации избыточной реактивности (без привлечения жидкостной системы) за кампанию.
2. Расчетное исследование в обосновании существенного снижения объемов водообмена за счет значительного повышения числа твэлов и подбора весового содержания гадолиния в них при работе реактора на удлиненных кампаниях.
3. Расчетное обоснование весового содержания эрбия в твэлах для замены гадолиния в твэгах в качестве выгорающего поглотителя без потери выгорания топлива при удлиненных кампаниях в реакторах типа ВВЭР-1000, ВВЭР-1200.

4. Сравнительный анализ эффективности системы компенсации избыточной реактивности, основанной на совместном использовании гадолиния и эрбия в реакторах ВВЭР при удлиненных кампаниях.

Научная новизна

1. Впервые получено в рамках упрощенной модели частичных перегрузок топлива аналитическое выражение для зависимости коэффициента размножения ТВС от выгорания, при которой критичность реактора обеспечивается в течение всей кампании без применения жидкостного регулирования.
2. Впервые предложена схема расположения твэгов в ТВС (на один твэг шесть твэлов), при которой достигается существенное снижение водообмена (60 %) жидкостной системы компенсации избыточной реактивности.
3. Разработана методика расчета водообмена для произвольного случая изменения реактивности реактора в течение кампании.
4. Для действующей системы компенсации избыточной реактивности предложен вариант замены выгорающего поглотителя гадолиния на эрбьевое топливо без потери выгорания топлива и с сохранением числовых значений плотностного и полного температурного коэффициентов реактивности по теплоносителю.

Практическая значимость работы

1. Предложен возможный вариант размещения твэгов в ТВС и весовое содержание гадолиния в твэгах, при которых значительно снижается водообмен при жидкостной системе компенсации избыточной реактивности.
2. Предложен подход к выбору весового содержания эрбия при его использовании вместо гадолиния как выгорающего поглотителя, обеспечивающего одинаковый избыточный запас реактивности и отсутствие потерь в выгорании топлива.
3. Показано, что при повторном использовании отработавшего топлива с эрбиевым поглотителем на основе РЕМИКС-технологии расход природного урана снижается на 10 % за счет дожигания остаточного содержания урана.

4. Предложены варианты совместного использования гадолиния и эрбия как выгорающих поглотителей для компенсации избыточной реактивности при удлиненных кампаниях, позволяющие снизить коэффициент неравномерности энерговыделения в ТВС.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Упрощенная модель выгорания топлива при частичных перегрузках с выгорающими поглотителями для реакторов типа ВВЭР.
2. Аналитическая зависимость изменения коэффициента размножения ТВС с выгоранием, при которой критичность реактора ВВЭР-1000 поддерживается в течение всей кампании без применения борного регулирования.
3. Пространственное распределение твэлов и весовое содержание гадолиния в них, обеспечивающие существенное снижение водообмена в активной зоне в процессе выгорания топлива в реакторах ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.
4. Обоснование весового содержания эрбьевого поглотителя в твэлах при замене гадолиниевого поглотителя в реакторах ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200, при котором обеспечивается минимальная потеря в выгорании при сохранении параметров безопасности (коэффициентов реактивности).

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов и выводов, приведенных в диссертации, подтверждена:

- проведением нейтронно-физических расчетов по современным и аттестованным программным средствам, получившим международное признание;
- участием и выступлением с докладом на всероссийских и международных научных конференциях;
- публикацией основных научных результатов в изданиях, рецензируемых ВАК и входящих в международные реферативные базы данных.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались на приведенных ниже конференциях.

1. IX Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», г. Москва, 26 – 28 апреля 2022 г.; НИЯУ МИФИ.
2. Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 80-летию основания НИЯУ МИФИ «Актуальные проблемы развития ядерных технологий», г. Северск, 16 – 20 май 2022 г.; СТИ НИЯУ МИФИ.
3. XVIII Международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики», г. Волгодонск, 19 – 20 май 2022 г.; ВИТИ НИЯУ МИФИ.
4. XVIII Международная молодежная научно-практическая конференция «Будущее атомной энергетики (Atom Future – 2022)», г. Обнинск, 28 – 29 ноября 2022 г.; ИАТЭ НИЯУ МИФИ.
5. Международная научно-практическая конференция молодых специалистов, учёных и аспирантов по физике ядерных реакторов (Волга-2022), Тверская область, 5 – 9 сентября 2022 г.; НИЯУ МИФИ.
6. X Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», г. Москва, 25 – 27 апреля 2023 г.; НИЯУ МИФИ.
7. XIX Международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики», г. Волгодонск, 06 – 07 июнь 2023 г.; ВИТИ НИЯУ МИФИ.
8. XI Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», г. Москва, 23 – 25 апреля 2024 г.; НИЯУ МИФИ.
9. 32-я Всероссийская научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» («Нейтроника-2024»), г. Обнинск, 28 – 31 май 2024 г.; АО ГНЦ РФ ФЭИ.

10. Международная научно-практическая конференция молодых специалистов, учёных и аспирантов по физике ядерных реакторов (Волга-2024), Тверская область, 3 – 6 сентября 2024 г.; НИЯУ МИФИ.
11. XVIII Курчатовская междисциплинарной молодёжной научной школа, г. Москва, 27 – 30 май 2025 г.; НИЦ КИ.

Публикация результатов

По теме диссертационной работы опубликованы четыре работы, из которых две статьи в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus, и две работы в журналах, входящих в перечень ВАК РФ по специальности 2.4.9.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 122 с. основного текста, включая семь таблиц и 56 рисунков (в том числе графиков). Библиографический список содержит 132 источника.

В первой главе проводится литературный обзор основных методов компенсации избыточного запаса реактивности, применяемых в реакторах типа ВВЭР при удлиненных топливных кампаниях. Выделены преимущества и недостатки каждого метода. Рассмотрены подходы к снижению доли запаса реактивности, компенсируемой жидкостной системой регулирования. Дополнительно изучены работы по совместному использованию выгорающих поглотителей на основе гадолиния и эрбия.

Во второй главе в рамках упрощенной модели частичных перегрузок топлива проводится аналитическое решение задачи о том, каким должна быть зависимость коэффициента размножения ТВС с выгорающим поглотителем в процессе выгорания, чтобы в течение всей кампании реактора критичность поддерживалась без применения жидкостной системы компенсации избыточной реактивности. На примере трехкратных перегрузок показано, что при использовании выгорающего поглотителя гадолиния для этого необходимо существенно повысить количество твэлов в ТВС. В частности, при соотношении

количества твэлов, приходящихся на один твэг (1:6), достигается близкое к теоретической зависимости изменение коэффициента размножения ТВС в процессе выгорания топлива.

Для каждого случая расположения твэгов рассмотрены изменения коэффициентов размножения от времени при различных весовых содержаниях гадолиния в твэгах. Приводится методика для расчетов относительных объемов водообмена за кампанию для случая роста и спада реактивности. По приведенной методике рассчитывались величины снижения объемов водообмена для рассмотренных вариантов. Проведена оценка влияния предлагаемой стратегии увеличения числа твэгов на эффективность органов регулирования и на степень неравномерности энерговыделения.

В третьей главе предлагается применение эрбия в качестве выгорающего поглотителя, размещаемого во всех твэлах, при использовании удлиненных топливных кампаниях. Показано снижение начального избыточного запаса реактивности и объемов водообмена за кампанию при повышении весового содержание эрбия в твэлах. Однако при этом возрастают потери на выгорание. Для частичной компенсации потерь на выгорание рассматривается повторное использование уран-эрбиевого топлива по РЕМИКС-технологии. На основе сопоставительного анализа параметров безопасности (коэффициенты реактивности) оценивается весовое содержание эрбия в твэле для замены гадолиния с учетом влияния борной кислоты. Сравнение производилось с вариантом максимального весового содержания гадолиния при текущей схеме расположения твэгов в ТВС. Показано, что при использовании эрбия предельная концентрация бора в теплоносителе может быть повышена при сохранении коэффициентов реактивности по плотности и температуре теплоносителя на уровне тех значений, которые достигаются при использовании гадолиния.

Найдено весовое содержание эрбия, при котором достигнуты более высокие значения коэффициентов реактивности по сравнению с гадолинием при пренебрежительно малых потерях на выгорание.

В четвертой главе приведены результаты совместного использования выгорающих поглотителей на основе гадолиния и эрбия при трехкратной перегрузке. Представлены несколько вариантов их комбинированного использования. На основе проведенных расчетов показано, что при совместном использовании твэгов и эрбия в твэлах компенсируется больший запас реактивности, по сравнению с одиночным применением поглотителей при равных потерях на выгорание. К тому же, снижается коэффициент неравномерности энерговыделения. Дополнительно, для вариантов с максимальной компенсацией запаса реактивности, рассчитано относительное снижение объемов водообмена за кампанию.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ НАЧАЛЬНОЙ ИЗБЫТОЧНОЙ РЕАКТИВНОСТИ В РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР И ПОДХОДЫ К СНИЖЕНИЮ ОБЪЕМОВ БОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

С точки зрения экономии природного урана при работе в открытом топливном цикле в водо-водяных реакторах оптимальной является стратегия максимального выгорания и минимального расхода природного топлива. Однако применение указанного подхода увеличивает количество перегрузок и время простоя реактора. Последнее негативно сказывается на КИУМ, что чревато ростом сроков окупаемости РУ и снижением ее экономических показателей. Повышение КИУМ достигается путем уменьшения количества перегрузок и увеличения продолжительности кампании.

Один из способов повышения выгорания топлива – увеличение его начального обогащения. В этом случае увеличиваются объемы работ разделения для изготовления топлива, и, принимая во внимание стоимость этого процесса, можно ожидать, что повышение выгорания за счет роста начального обогащения топлива не всегда приводит к снижению топливной составляющей себестоимости производимой энергии [41].

В реакторах канального типа с непрерывной перегрузкой топлива КИУМ и начальное обогащение топлива не имеют прямой зависимости, поскольку отсутствует избыточной запас реактивности, а критичность реактора поддерживается на среднем изотопном составе. Многократная перегрузка топлива в АЗ реактора удовлетворяет вышеприведенным условиям стратегии экономии природного урана. Основная идея метода непрерывной перегрузки заключается в замене полностью выгоревшего топлива на свежее небольшими порциями. В этом случае реактор будет работать практически при нулевом запасе реактивности. В работах [42, 43] показано, что при эксплуатации реактора в этом режиме снижается расход топлива и увеличивается глубина выгорания. В России непрерывные поканальные перегрузки топлива осуществляются в реакторах типа РБМК [44].

Корпусное устройство реактора ВВЭР не позволяет использовать метод непрерывных перегрузок. В водо-водяных реакторах используются частичные перегрузки. Данный метод позволяет повысить глубину выгорания топлива и, в то же время, не требует слишком частой остановки реактора для его перегрузки [45]. Перегрузка в реакторах типа ВВЭР осуществляется только после поэтапного останова и расхолаживания. После расхолаживания активной зоны реактора осуществляется процесс выгрузки выгоревших ТВС, перестановки и загрузки свежих ТВС, что занимает определенное время. В работе [46] показано, что частый простой станции, связанный с перегрузкой топлива, снижает готовность энергоблока работать под нагрузкой. Последнее уменьшает прибыль от продажи электрической энергии и увеличивает сроки окупаемости АЭС. При этом понижается рентабельность реакторной установки, повышается себестоимость произведенной электроэнергии и, в целом, замедляется развитие отрасли, что представлено в работе [47]. Согласно данным ГК «Росатом», компенсация указанных недостатков частично достигается повышением КИУМ, что осуществляется путем уменьшения кратности перегрузок и увеличения продолжительности кампании реактора от одного года до 1,5 или даже до двух лет в перспективе [48]. В этом случае сокращается время простоя реактора на перегрузку. Снижение кратности перегрузок приводит к уменьшению выгорания топлива и увеличению удельного расхода природного урана в расчете на один год. Для обогащения топлива подпитки, равной 4,95 % весовых, которое используется в настоящее время в реакторах ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200, максимальная кратность перегрузки принималась равной $n = 5$. Для повышения длительности кампании в 1,5 раза или даже в 2 раза требуется снизить кратность перегрузки, исходя из вышесказанного. Переход на полутора- и двухгодичную кампанию приводит к потерям в выгорании в связи с уменьшением кратности перегрузки на 10 % и 20 % соответственно по отношению к варианту с кратностью перегрузки $n = 5$. В работе [49] расчетным путем обосновано, что в таком же соотношении будет возрастать удельный расход природного урана и поток отработавших ТВС на хранение. Данный подход оправдан относительно небольшой себестоимостью природного

урана и большими затратами на проведение перегрузок, поскольку это – ядерно-опасная операция.

Для перехода на удлиненные кампании создается начальный избыточный запас реактивности, необходимый для работы реактора на мощности в течение кампании реактора. Критичность в процессе работы реактора на мощности достигается компенсацией данного запаса реактивности. В этом случае компенсация осуществляется борным регулированием, поглощающими элементами (пэл) и выгорающими поглотителями, интегрированными в топливную матрицу.

1.1. Борное регулирование

В реакторах типа ВВЭР традиционным методом компенсации избыточной реактивности является жидкостное регулирование, основанное на растворении в теплоносителе-замедлителе определенного количества ортоборной кислоты (H_3BO_3) [50]. Компенсация достигается за счет поглощения нейтронов изотопом B-10, который имеет большое сечение поглощения в тепловой области ($\sim 4000 \text{ б}$ при энергии 0,0253 эВ). Это – регулируемая система компенсации, поскольку концентрация борного поглотителя изменяется в течение кампании. Регулирование происходит изменением концентрации борной кислоты в зависимости от запаса реактивности. В случае роста реактивности необходимо увеличивать концентрацию борной кислоты в АЗ для поддержания критичности РУ. Для этого отбирается определенный объем теплоносителя и добавляется такой же объем концентрированного раствора борной кислоты [51]. В случае спада реактивности подпитка первого контура осуществляется добавлением чистого дистиллята в контур. Таким образом, добиваются снижения концентрации борной кислоты путем разбавления раствора очищенной водой. Концентрация борной кислоты определяется компенсируемым запасом реактивности. Согласно работе [52], при текущей схеме водообмена максимальная концентрация борной кислоты достигается в начале кампании, и по мере снижения запаса реактивности в течение кампании концентрация борной кислоты постепенно снижается путем водообмена. Таким образом, в конце кампании концентрация принимает минимальное

значение, близкое к нулю. В этом случае график изменения концентрации борной кислоты за кампанию будет близок к линейной, что указано в работе [53].

Главное достоинство жидкостной системы регулирования – отсутствие локальных неоднородностей плотности потока нейтронов в АЗ при любых концентрациях борной кислоты. Применение «твёрдых» поглотителей (пэлов и выгорающих поглотителей) вызывает локальные перекосы полей нейтронов, повышая неравномерность распределения плотности потока нейтронов как в радиальном, так и в аксиальном направлениях. В некоторых случаях данные неравномерности могут нарушить устойчивость нейтронного поля. Вследствие этого снижаются экономические показатели энергоблока [54]. Однако наряду с достоинством имеется и ряд недостатков данной системы компенсации избыточной реактивности. К числу важных недостатков можно отнести аккумулирование больших объемов НАО ЖРО в процессе водообмена. На сегодняшний день АЭС являются одним из основных источников ЖРО. Согласно работе [55], из общего количества скопившихся ЖРО львиная доля приходится на НАО (более 90%). Большая часть НАО ЖРО размещена в пунктах хранения ПО «Маяк» и ОАО «СХК», которые при текущих темпах наработки могут выработать свой ресурс. Тем самым появляется вероятность попадания НАО в окружающую среду. К тому же, образование большого количества трития в жидких отходах в течение топливной кампании при работе реактора на мощности усложняет процесс очистки. Так как тритий является одним из основных дозообразующих радионуклидов [57], то выбросы тритийсодержащей воды в окружающую среду могут вызывать онкологические заболевания [56]. При текущих темпах роста ядерной энергетики к 2050 г. годовая доза от тритийсодержащей воды увеличится более чем в 2 раза [58].

В процессе отбора радиоактивного теплоносителя в случае спада реактивности требуется подготовка большого объема дистиллята для подпитки контура. Учитывая, что к чистоте теплоносителя предъявляются большие требования, процесс дистилляции проходит в несколько этапов. Последнее накладывает определенные сложности при организации водного режима. В работе

[59] указывается дороговизна процесса подготовки дистиллята, ссылаясь на высокую стоимость оборудования.

Наличие в теплоносителе поглотителя в виде борной кислоты приводит к снижению запаса реактивности реактора. Увеличение концентрации борного поглотителя приводит к повышению поглощения в теплоносителе. Поэтому при уменьшении плотности теплоносителя в реакторе будет возникать положительная реактивность. До некоторой степени этот эффект компенсируется ростом резонансного поглощения за счет снижения водотопливного соотношения, но при определенной концентрации борного поглотителя в теплоносителе суммарный эффект может изменить знак плотностного коэффициента реактивности. Этим объясняются ограничения на предельную концентрацию борной кислоты в теплоносителе. В частности, в работе [60] проведено исследование коэффициентов реактивности реактора ВВЭР-1200 при помощи моделирования АЗ в программе MCNP5, используя библиотеки ядерных данных ENDF/B-VII. Расчеты проведены для различных концентраций борной кислоты в теплоносителе. По результатам проведенных расчетов показано, что концентрация борной кислоты для поддержания критичности реактора при работе на мощности не должна превышать концентрации 8 г (борной кислоты)/кг (воды). При такой концентрации критичность достигается без использования стержней управления. При дальнейшем увеличении концентрации борной кислоты величина полного температурного коэффициента реактивности по теплоносителю становится положительной. Данное обстоятельство противоречит условиям безопасной эксплуатации РУ.

В работе [61] смоделированы подобные расчеты для АЗ реактора ВВЭР-1000 Бушерской АЭС. Показано, что максимальная концентрация борной кислоты достигается в начале в связи с создаваемым максимальным запасом реактивности для работы реактора на мощности в течение кампании реактора. Далее, по мере выгорания, концентрация снижается и в конце равняется нулевому значению. В процессе снижения содержания борной кислоты наблюдается повышение по амплитуде плотностного и полного температурного коэффициентов реактивности.

К тому же, в течение кампании реактора максимальная концентрация борной кислоты также не превышала 8 г/кг [62].

Теплоноситель с содержанием борной кислоты является ингибитором коррозии конструкционных материалов АЗ. Увеличение концентрации борного поглотителя в теплоносителе ускоряет процесс корродирования конструкционных материалов [63]. Это опасно быстрым износом, охрупчиванием, снижением прочности и долговечности оболочек ТВС и материала АЗ. Указанные факторы могут привести к разрушению материалов и нарушению одного из барьеров безопасности на АЭС. Для снижения скорости коррозии конструкционных материалов водородный показатель (рН) теплоносителя поддерживается на уровне ~ 5.7 путем ввода растворов щелочных металлов и аммиака. При этом усложняется водно-химический режим на АЭС.

Тенденция перехода на более длительные кампании приводит к увеличению начального избыточного запаса реактивности при длительной работе реактора между перегрузками. Компенсация запаса реактивности системой жидкостного регулирования имеет ряд вышеуказанных недостатков. Исходя из этого, всемерное снижение доли избыточного запаса реактивности, компенсируемого борным регулированием, является актуальной задачей для реакторов типа ВВЭР [64].

1.2. Подходы к снижению запаса реактивности компенсируемой системой жидкостного регулирования

В работах [65–67] для снижения объемов водообмена в реакторах ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 авторы предлагают использовать температурное регулирование, основанное на изменении температуры теплоносителя. Регулирование происходит за счет частичного закрытия регулирующего клапана регулятора турбины. В результате закрытия снижается мощность турбины, повышается давление пара во втором контуре. Авторами рассматривается два диапазона изменения давления пара: широкий ($\pm 0,3$ МПа) и узкий ($\pm 0,2$ МПа). Изменение давления в указанных диапазонах приводит к снижению мощности реактора за счет эффекта саморегулирования. При этом, увеличение давления повышает температуру теплоносителя первого и второго контуров, что сопутствуется с вводом

отрицательной реактивности и снижением мощности. Для расчетов авторы пользуются методом динамического программирования с использованием эвристики, суть которой заключается в отсечении неэффективных ветвей. Согласно представленным результатам, применение предлагаемого способа приводит к снижению водообмена примерно на 25 % и 50 % для узкого и широкого диапазонов, соответственно. Применяемый способ опасен снижением ресурса оборудования, в частности парогенератора. Циклические перегрузки могут негативно отразиться на теплотехнической надежности. К тому же, рассматриваемый авторами вариант широкого изменения диапазона давления менее применим в реальных условиях. Также используемый авторами метод динамического программирования для расчетов является очень времязатратным по сравнению с другими методами расчета, требует больших вычислительных мощностей и памяти для оперативного сохранения промежуточных результатов расчета.

В работах [68, 69] предлагается частичное снижение и полный отказ от борного регулирования в течение кампании на примере реактора PWR. Снижение и отказ происходят за счет увеличения водо-топливного соотношения. В частности, в статье [69] для достижения последнего рассматриваются два варианта: уменьшение объема топлива в ТВС (убираются топливные столбы и заполняются водой) и снижение диаметра топлива. Согласно представленным результатам, второй подход оказался эффективнее по сравнению с первым, так как уменьшение диаметра топливной таблетки резко влияет на водотопливное соотношение. На следующем этапе снижается реактивность в начале кампании путем увеличения числа твэлов от стандартного количества. При этом, автором предлагается использовать два вида твэга: с меньшим (5 %) и большим (14 %) весовым содержанием гадолиния. В результате применения такого подхода начальное значение коэффициента размножения получается ~ 1 . В дальнейшем по мере выгорания наблюдается рост реактивности, где максимум достигается в середине кампании. Возникающий рост реактивности компенсируется «модифицированными» стержнями управления. Модификация получается за счет изменения диаметра и поглощающего материала (гафний) стержней. В

рассматриваемых работах не приводится на сколько снижаются объемы жидкостного регулирования. В связи с этим трудно оценить эффективность предлагаемых конструкционных изменений для достижения поставленной цели. К тому же, увеличение весового содержания гадолиния свыше 10 % приводит к росту неравномерности распределения энерговыделения по сравнению со стандартной ТВС, и неравномерность сохраняется в течение кампании. Данное обстоятельство чревато снижением среднего энерговыделения ТВС, и, как следствие, снижением экономических показателей АЭС. Исходя из представленных выводов, снижение массы топлива и увеличение содержания поглотителя негативно сказалось на продолжительности кампании. Однако автором утверждается необходимость наличия второй независимой системы компенсации реактивности, так как предлагаемая схема не во всех ситуациях может гарантировать подkritичность РУ.

Снижение жидкостного регулирования только при помощи выгорающих поглотителей на основе гадолиния рассмотрено в статьях [70–72]. В работе [70] предлагается размещать уран-гадолиниевое кольцо в направляющие каналы ТВС. При этом подбираются радиусы кольца предлагаемой геометрии, концентрация поглотителя и количество таких стержней в ТВС. В работе не представлена методика по отбору оптимальной модели. Основным критерием оценки является снижение компенсируемого запаса реактивности. Не определено положение стержней управления и их количество. Не исследованы изменения коэффициентов неравномерности в результате такого размещения гадолиниевого поглотителя. В работе [71], в отличие от [70], предлагается три варианта размещения гадолиневого поглотителя в составе оболочки стержней управления. Идея работы [71] дополнена в [72] применением шарообразного выгорающего поглотителя в составе всех твэлов. При сравнении со стандартной схемой размещения поглотителя предлагаемая идея [71] не дает большого изменения. Результаты расчетов [72] показали значительное снижение начального значения коэффициентов размножения в течение кампании реактора, и при этом критичность реактора поддерживается без борного регулирования. Однако загрузка большого количества поглотителя приводит к паразитному бесполезному поглощению нейтронов и

снижению коэффициента воспроизводства плутония. В результате вклад ^{239}Pu в энерговыработку будет снижаться. Исходя из расчетного анализа в работе [72] коэффициенты неравномерности в радиальном и аксиальном направлениях превышают допустимые значения и не снижаются в течение кампании. Размещение шарообразного поглотителя в центре топливного столба усложняет процесс изготовления твэлов. Практическая реализация предлагаемых решений в работах [70–72] представляется невозможной из-за обязательного изменения конструкционных элементов ТВС, которые требуют полного обоснования данной необходимости. К тому же, производство элементов ТВС поставлено на конвейер, и каждый процесс этой цепочки производства максимально оптимизирован для получения прибыли. Изменение конструкционных размеров приведет к большим трансформациям на промышленном уровне, что может повлечь за собой отрицательный экономический эффект.

Имеются примеры [73, 74] интегрированного размещения выгорающего поглотителя в составе топливной матрицы. В работе [74] представлены четыре варианта размещения выгорающих поглотителей, причем помимо гадолиния авторами рассмотрено применение эрбия. Для варианта с эрбием, по мере увеличения его концентрации, достигается существенная компенсация запаса реактивности при больших потерях на выгорание. Как и в случае с [73], концентрации поглотителей варьируются как в радиальном, так и в аксиальном направлениях. В [73] отдельно обращается внимание на расположения твэлов с поглотителем для выравнивания неравномерности поля энерговыделения. Для обоснования предложенной модели приводится расчет полного температурного коэффициента реактивности по теплоносителю. Для предлагаемой модели изменение реактивности за кампанию носит линейный характер с максимумом в середине кампании. Показано, что увеличение числа твэлов приводит к снижению начального значения коэффициента размножения с дальнейшим разблокированием поглотителя.

Для полного отказа от борного регулирования разрабатывались отдельные проекты РУ, в которых полностью отказывались от жидкостного регулирования

при работе реактора на мощности. В России это проект ВВЭР-640 (В-407). В данном проекте для компенсации избыточной реактивности применяются твердые поглотители [75]. В проекте применена активная зона и корпус реактора ВВЭР-1000. Использование большого количества твердых поглотителей приводит к снижению массы топлива и энерговыработки, что является существенным недостатком данного проекта. Меньшая тепловая мощность снижает энергонапряженность АЗ по сравнению с ВВЭР-1000, но при этом повышает безопасность РУ и АЭС в целом [76].

В представленных работах применяются различные подходы к снижению объема водообмена в течение кампании. Однако ни в одной работе не представлена методика расчета объемов водообмена в течение кампании. Исходя из этого, сложно оценить эффективность предлагаемых моделей и подходов. К тому же, в работах [68–74] оптимальные концентрации определяются путем перебора. При этом, не представлены конкретные критерии отбора подходящих вариантов. Единственным критерием отбора служит максимальный компенсируемый запас реактивности. Подходы, представленные в [69–73], практически не реализуемы на практике, так как требуют значительных конструкционных изменений основных компонентов ТВС. Полностью отказаться от использования жидкостного регулирования в реакторах типа ВВЭР невозможно. Согласно требованиям безопасности, для обеспечения надежности РУ в процессе работы необходимо иметь две независимые системы, основанные на разных физических принципах, обеспечивающие перевод и удержание реактора в подкритическом состоянии при внештатных ситуациях [50]. К тому же, борное регулирование используется при стояночных и перегрузочных режимах. Однако можно оценить максимально возможный диапазон снижения НА ЖРО при работе реактора на мощности. Исходя из сказанного, актуальным являются определение критериев выбора концентрации и количества твэлов с поглотителем для максимального снижения запаса реактивности и разработка методики расчета водообмена при различном изменении реактивности от времени.

1.3. Выгорающие поглотители

Гадолиний

Альтернативным способом компенсации избыточной реактивности является использование выгорающих поглотителей, интегрированных в топливную матрицу. В России имеются залежи многих редкоземельных поглотителей нейтронов. К примеру: бор, гафний, самарий, гадолиний, эрбий, кадмий, европий и т.д. Однако только небольшая часть из них используется в роли поглотителей нейтронов. В качестве такого поглотителя в водо-водяных реакторах наиболее известен гадолиний. В составе природного гадолиния свойства сильного поглотителя проявляют изотопы ^{155}Gd и ^{157}Gd , микросечения поглощения которых при $E = 0,0253$ эВ 57000 и 252000 б, соответственно [77]. Большое сечение приводит к быстрому выгоранию (разблокирование поглотителя) в течение одной кампании, и, тем самым, гадолиний не влияет на среднюю глубину выгорания выгружаемого топлива. По мере выгорания нечетные изотопы (^{155}Gd и ^{157}Gd) переходят в четные стабильные изотопы ^{156}Gd и ^{158}Gd с малым сечением поглощения в тепловой области нейтронов [78]. Гадолиний размещается в топливных элементах в виде оксида Gd_2O_3 (твэги), количество которых в ТВС находится в пределах от 6 до 12. Концентрация гадолиния в твэгах варьируется в пределах 5–8 % весовых. Большая концентрация гадолиния обусловлена небольшим количеством твэгов в ТВС. Данное размещение создаёт сильную блокировку потока тепловых нейтронов в твэгах и в окружающих его твэлах в начале кампании, указанный эффект подробно рассматривался в работе [79]. Неоднородность потока в твэгах увеличивает неравномерность поля энерговыделения в ТВС в начале кампании. В результате возникает сильная неравномерность поля энерговыделения в твэге и твэлах вокруг, что чревато растрескиванием топливной таблетки, деформацией циркониевой оболочки и нарушением целостности барьеров безопасности. По мере выгорания поглотителя данная неравномерность снижается и пропадает. В работах [80, 81] были применены подходы для снижения неравномерности и максимальной компенсации избыточной реактивности. При этом поглотители располагались гомогенно в

составе топливной матрицы. Для достижения данных целей авторами был предложен подход увеличения числа твэгов и снижения весовой загрузки гадолиния в них. В результате применения такого подхода изменение коэффициента размножения за кампанию представлялось зависимостью параболического типа. В дополнение к предложенному подходу были рассмотрены случаи гетерогенного размещения гадолиния в центральном отверстии [82, 83] и вокруг твэла [83]. В случае [82] центрального размещения рассматривалась проволока из гадолиния, которая размещалась в центральном отверстии твэла по всей высоте топливного столба. В расчетах использовалась безчехловая ТВС реактора ВВЭР-1000 с шестью твэгами. В случае [83] наносился слой с определенной толщиной поглотителя в центральной части и отдельно вокруг твэла с разным весовым содержанием. Результаты центрального расположения не приводят к существенной разнице с гомогенным размещением поглотителя. К тому же отдельную сложность составляет изготовления проволоки и расположения её по центру по всей длине твэла [82]. Нанесение гадолиния со внешней стороны вокруг таблетки [83] приводит к быстрому выгоранию поглотителя и далее не влияет на запас реактивности. Внешнее расположение опасно быстрым распуханием таблетки. Зависимость размера гадолиниевых микрочастиц в составе топливной таблетки исследована в работах [84, 85]. Расчетным путем показано, что увеличение размера микрочастиц приводит к слабому выгоранию, и график зависимости коэффициента размножения ТВС от времени носит линейный характер. При уменьшении диаметра эта зависимость приобретает параболическую форму с характерным выбегом в начале кампании. Дополнительно в [85] экспериментально исследовано изменение теплопроводности уран-гадолиниевой таблетки при различных весовых содержаниях гадолиния в них и при различных температурах. Сравнение проводится с чисто урановой таблеткой. По итогу сделан вывод о том, что добавление гадолиния в топливную таблетку негативно сказывается на теплопроводности топливной композиции. Чем больше весовое содержание добавляемого гадолиния, тем меньше теплопроводность топлива. В результате эксперимента было замечено ускорение процесса растрескивания

топливной таблетки. В связи с этим для предотвращения дальнейшего ухудшения параметров топлива предлагается ограничить концентрацию добавляемого гадолиния до определенного значения.

Эрбий

Помимо гадолиния в качестве выгорающего поглотителя также используется эрбий. Данный поглотитель хорошо зарекомендовал себя при эксплуатации в реакторах типа РБМК для достижения отрицательного значения парового коэффициента реактивности [86]. В составе природного эрбия свойства поглотителя проявляет изотоп ^{167}Er , микросечение поглощения которого при энергии 0,0253 эВ составляет 650 б [77]. Из-за небольшого сечения эрбий выгорает медленно и может размещаться гомогенно во всех твэлах ТВС. По результатам проведенных расчетов в работе [87] утверждается о соизмеримости скоростей выгорания эрбия и урана в течение кампании. Указано, что однородное расположение поглотителя имеет минимальное влияние на распределение энерговыделения по ТВС. Таким образом, не ухудшается равномерность энерговыделения в АЗ, как это имеет место быть в случае с твэгами. В работе [88] было проведено сравнение основных нейтронно-физических параметров для уран-гадолиниевого и уран-эрбьевого топлива. Согласно проведённому анализу авторами излагается, что увеличение концентрации эрбия в твэлах приводит к заметному снижению максимального запаса реактивности. Однако, в отличие от гадолиния, эрбий не выгорает в течение одной кампании и влияет на избыточную реактивность в течение всей кампании. Это приводит к снижению выгорания выгружаемого топлива, в связи с этим в [88] указывается на необходимость увеличения начального обогащения топлива для достижения заданной кампании. Согласно работам [89, 90] рост весового содержания эрбия в твэлах наряду со снижением запаса реактивности приводит и к снижению максимального значения концентрации борной кислоты за кампанию. Последнее приведет к снижению объемов водообмена за кампанию, что исследовано в работе [91]. Приводятся относительные снижения объемов водообмена для различных концентраций. При этом в [91] наблюдается прямая зависимость между содержанием эрбия в твэлах и

относительным снижением водообмена. Указывается, что увеличение эрбия на 0,1 % снижает объемы ЖРО на 5 %. Наличие резонанса изотопа ^{167}Er в тепловой области [92] позволяет поддерживать отрицательное значение спектральной составляющей полного температурного коэффициента реактивности по температуре теплоносителя [89–91]. При этом, чем выше концентрация эрбия в твэлах, тем выше по модулю полный температурный коэффициент реактивности. Так, в работе [91] указанные коэффициенты реактивности рассчитаны для полутора- и двухгодичной кампаний на упрощенной модели частичных перегрузок. В работе по поиску оптимальной изотопной концентрации эрбия [93] утверждается, что использование эрбия с обогащением 100 % по изотопу ^{167}Er снижает в четыре раза массовую загрузку загружаемого в твэлы эрбия по сравнению с природным эрбием для компенсации одинаковой реактивности. Однако увеличение содержания ^{167}Er повышает неравномерность энерговыделения за счет более сильного поглощения. Опираясь на вышеизложенные факты, в работах [93–95] утверждается об актуальности применения эрбия в качестве выгорающего поглотителя при переходе на более длительные топливные кампании. Применение эрбия позволяет увеличить глубину выгорания выгружаемого топлива за счет снижения запаса реактивности в течение всей топливной кампании. В частности, согласно работе [94], это может позволить организовать 24-месячную топливную кампанию в реакторах ВВЭР. Данное сведение повышает интерес к более подробному исследованию эрбьевого поглотителя.

Как указывалось, основным недостатком эрбия является снижение среднего значения выгорания выгружаемого топлива. Важно подметить, что в этом случае в топливе остается некоторая доля ^{235}U , которую можно повторно вернуть в цикл путем формирования РЕМИКС-загрузки [96]. Возвращение урана на рецикл может частично компенсировать потери в выгорании. Важно оценить эффект от этого процесса. В работах [87, 89, 90, 91, 93, 95] считается возможным применение эрбия при удлиненных топливных кампаниях в реакторах с водой под давлением. Однако расчетным путем не обосновываются примерные концентрации эрбия для

достижения параметров безопасности, удовлетворяющих эксплуатационным требованиям при минимальных потерях на выгорание.

Совместное использование выгорающих поглотителей

Помимо одиночного использования, актуальным является вопрос смешанного применения выгорающих поглотителей расположенных гомогенно и гетерогенно. Данный способ может улучшить эффект от поглотителей для компенсации избыточной реактивности. Так, в работах [80, 81, 90, 99] проведены исследования по гомогенному размещению смеси нескольких поглотителей в топливной матрице. В [80, 81] рассматриваются различные схемы размещения, комбинированного использования гадолиниевого и европиевого выгорающего поглотителя в ТВС реактора ВВЭР-1000. На основе проведенного расчета автором рекомендуется увеличение числа твэлов с поглотителем и снижение его весового содержания. Такой подход позволяет стабилизировать значения коэффициента размножения практически в течении всей кампании реактора. Использование европия даёт возможность компенсировать реактивность в течение всей топливной кампании и снижать концентрацию гадолиния в твэгах. Основным недостатком применения европия является увеличение радиоактивности топлива по сравнению с гадолиниевым поглотителем, что требует длительного времени пребывания выгружаемого топлива в пристаниционном бассейне охлаждения. Причиной повышения радиоактивности служат накопление высокоактивных долгоживущих изотопов ^{152}Eu и ^{154}Eu . В связи с этим в [100] авторами утверждается, что низка вероятность применения европия в качестве поглотителя в мощных энергетических реакторах. В силу высокой наведенной активности всегда будет присутствовать опасность заражения первого контура при разгерметизации оболочки. В работах [90, 99] рассматривается комбинированное использование с эрбиеевым поглотителем. Так, в [90] обсуждается совместное использование эрбия и диборида циркония (ZrB_2). Последний является интегрированным в топливо поглотителем в реакторах PWR. Также компенсируется большая часть запаса реактивности в течение топливной кампании. Определение путем расчетов оптимальной концентрации эрбия позволит достичь указанные показатели без потерь в

выгорании, что требует более подробных расчетов. В работе [99] показано совместное применение гадолиния и эрбия. Видно, что в начале происходит быстрый рост реактивности за счет разблокирования дискретного поглотителя, и далее идёт медленное снижение коэффициента размножения за счет влияния эрбия. Показано, что применение эрбия уменьшает коэффициент неравномерности энерговыделения. Опираясь на указанные выше результаты, в работах [90, 99, 101] авторы резюмируют о эффективности применения эрбия при длительных топливных циклах.

В работах [97, 98, 83] рассматривается гетерогенное размещение комбинированных поглотителей в твэлах. В [83] показано, что для достижения равных показателей коэффициента реактивности в вариантах с гомогенным размещением поглотителя требуется меньшее число твэлов, чем в вариантах с гетерогенным размещением. В [97] предлагается размещать эрбий в центре топливной таблетки, а вокруг наносится слой гадолиния. На основе предложенной модели собирается активная зона реактора ВВЭР-1000. Полученные данные сравниваются со стандартной сборкой (без эрбия). Предложенная модель позволяет увеличить продолжительность кампании [98], что приводит к улучшению экономической составляющей, это показано в работе [97].

Рассмотренные выше работы делают актуальным исследования совместного использования гадолиния и эрбия. К тому же, данной теме посвящен небольшой объем работ.

1.4. Регулирование реактивности при помощи пэлов

Использование подвижных стержней с поглотителем нейтронов является еще одним способом регулирования запаса реактивности. При этом регулирование осуществляется с помощью введения стержней в случае роста реактивности и извлечением в случае снижения реактивности из активной зоны. Применение данных стержней происходит не в единичном виде, а в виде кластеров. Преимуществом стержней на основе карбида бора (B_4C) является то, что они выполняют несколько функций. Это, во-первых, регулирование работы реактора, компенсация температурных и мощностных эффектов, а во-вторых, его останов, в

том числе аварийный. При внештатных ситуациях опускаются органы регулирования и быстро останавливается цепная реакция деления в реакторах, а остаточное тепловыделение отводится циркуляцией теплоносителя через АЗ. Зависимость сечения поглощения ^{10}B подчиняется закону $1/v$, и в логарифмических координатах имеет линейный характер.

Согласно работам [102, 103] основной проблемой поглощающих элементов на основе карбида бора является распухание сердечника вследствие накопления гелия по реакциям (n, α) и $(n, 2\alpha)$. В процессе эксплуатации накапливаются большие объемы гелия, которые создают давление на оболочку. Последнее опасно нарушением целостности и герметичности конструкции оболочки и выходом трития в контур. На основе изложенного в работе [104] предлагается добавить газосборник для гелия в нижней части стержней. Авторами утверждается, что такой подход может снизить давление газа, и увеличить срок службы пэлов до 20–25 лет. В реакторах на быстрых нейтронах данное обстоятельство было исправлено путем добавления щелевого фильтра в верхнем конце пэла [105]. Это приводит к выходу накопившегося гелия в контур. В работе [106] на примере реактора PWR показано, что наличие гелия в зазоре между поглощающим сердечником и оболочкой снижает распухание, и увеличивает срок службы органов регулирования. Неравномерное выгорание ^{10}B образует градиент напряжения и, как результат, появляются кольцевые микро- и макротрешины в изделии B_4C в процессе эксплуатации.

При режиме работы автоматического регулирования (АР) в следствии радиационного распухания срок службы пэлов составляет три года. За указанный период пэлы успевают выгореть на 45–50 % от своего ресурса. Наибольшее распухание происходит в нижней части пэла. Для улучшения радиационной стойкости пэла в нижнюю часть, подверженную интенсивному облучению, размещают сплав из титаната диспрозия ($\text{Dy}_2\text{O}_3\text{TiO}_2$). К тому же, высокое распухание карбида бора приводит к применению специальных сплавов, способных сдерживать большую деформацию. Эффективность от данного применения оценена в [107]. Авторами утверждается, что данное решение

увеличивает срок эксплуатации стержней управления до 10 лет. В зарубежных реакторах PWR в качестве материала для стержней управления используется тройной сплав на основе серебра (AgInCd), разработанный еще 60-е гг. прошлого века. Согласно работе [108], основными достоинствами тройного сплава являются: высокая поглощающая эффективность материала; улучшение прочностных характеристик и ресурса. Однако ни тройной сплав, ни карбид бора не отвечают современным требованиям в аварийных ситуациях, связанных с перегревом активной зоны реактора. Еще одним недостатком карбида бора является высокая стоимость изготовления карбида бора, обогащенного по изотопу ^{10}B . Согласно [109], цена порошка, обогащенного 90 % по ^{10}B , может достигать 15–16 тысяч долл.

Согласно работам [108, 110, 111] в обозримом будущем перспективным материалом является гафнат диспрозия ($\text{Dy}_2\text{O}_3\text{HfO}_2$). Указанный сплав имеет лучшие показатели эффективности и радиационной стойкости. Расширенное производство гафния может снизить цену на этот сплав. Согласно результатам экспериментов, в работе [112] гафний показал малый радиационный рост при длительном облучении и отсутствие потерь в поглощающей способности. Рассмотренные свойства помогут гафию заменить не только карбид бора, но и все известные поглощающие материалы для стержней регулирования в РФ и за рубежом [110].

1.5. Спектральное регулирование

Помимо рассмотренных выше способов компенсации избыточной реактивности, существует еще один вариант, который исключает использование дополнительных поглотителей при работе реактора на мощности. Это метод спектрального регулирования, который основывается на изменении соотношения числа ядер замедлителя и топлива в процессе выгорания, что практически осуществляется путем введения в замедлитель вытеснителей. В начале кампании, когда имеется избыточная реактивность, в АЗ вводятся вытеснители, и создается более жесткий спектр нейтронов. В этом случае появляющиеся нейтроны вместо бесполезного поглощения в выгорающем поглотителе расходуются на воспроизведение делящихся изотопов [82–84]. По мере выгорания топлива

реактивность медленно спадает, и вытеснители извлекаются. В качестве вытеснителей воды используются материалы слабопоглощающие нейтроны, например полые циркониевые вытеснители. Их можно вводить непосредственно в межтвэльное пространство, вытесняя замедлитель и теплоноситель. Диаметр вытеснителей определяет диапазон изменения водно-топливного отношения. В работах [113, 114] авторы применяют циркониевые вытеснители, вставляя их в межтвэльное пространство в ТВС. В работе используются вытеснители различных диаметров. Показано, что по мере роста диаметра вытеснителя снижается начальное значение коэффициента размножения. Увеличение диаметра стержней может сократить расход теплоносителя через твэлы в ТВС, и тем самым ухудшить охлаждение. Для компенсации этого явления необходимо снизить энергонапряженность АЗ, что влечет за собой спад мощности АЭС. Данный факт приводит к ограничению мощности РУ.

Согласно [115], основным достоинством метода спектрального регулирования является эффективное использование нейtronов в АЗ реактора. Благодаря этому способу возрастает коэффициент воспроизводства, снижается удельное потребление природного урана, и осуществляется отказ от борного регулирования при работе реактора на мощности.

Однако для реализации данного способа необходимо изменить конструкцию серийных ВВЭР. Соответственно, это вызывает проблему с большими финансовыми вложениями и дальнейшей окупаемостью проекта. К тому же, отсутствие опытно-демонстрационного варианта также ставит под вопрос практическую рентабельность данного проекта. Однако в Российской Федерации к 2030 г. запланировано строительство и к 2035 г. запуск двух реакторов ВВЭР-С мощностью по 600 МВт каждый на Кольской АЭС [50].

ГЛАВА 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫГОРАЮЩИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВОДООБМЕНА ПРИ ЖИДКОСТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ В РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР

Запас реактивности, создаваемый для непрерывной работы реактора типа ВВЭР на мощности в течение одной кампании, компенсируется различными способами. Во-первых, путем применения частичных перегрузок топлива посредством выгрузки из активной зоны наиболее выгоревших ТВС и загрузке такой же части ТВС с топливом подпитки. Во-вторых, с использованием поглотителей нейтронов, вводимых в активную зону по мере выгорания топлива. Это так называемая жидкостная система компенсации избыточной реактивности, основанная на растворении борной кислоты в теплоносителе.

Это регулируемая часть системы компенсации, поскольку концентрация борного поглотителя изменяется в течение кампании. Такая система имеет ряд существенных недостатков (см. п. 1.1), основными из которых являются образование большого объема низкоактивных ЖРО и негативное влияние на знак плотностного коэффициента реактивности по теплоносителю. Увеличение концентрации борной кислоты выше определенного значения может нарушить условие безопасной эксплуатации РУ. Вышеперечисленные недостатки подтверждают актуальность вопроса снижения объема борного регулирования для реакторов этого типа.

В кампаниях длительностью 1,5–2 года возникает большой запас реактивности, который наряду с жидкостной системой компенсируется поглотителями, интегризованными в топливную матрицу. В качестве таких поглотителей в реакторах типа ВВЭР используется природный гадолиний, микросечение поглощения которого в тепловой области энергий примерно в 400 раза больше, чем ^{235}U . Данный поглотитель располагают в небольшом числе твэлов (твэги). Вследствие большого микросечения поглощения нейтронов изотопами ^{155}Gd и ^{157}Gd в твэлах с их содержанием образуется сильная блокировка потока

тепловых нейтронов. Вариант равномерного распределения гадолиния по всем твэлам приведет к быстрому росту реактивности до исходного уровня в результате большой скорости выгорания. Следовательно, содержание гадолиния в твэгах должно быть таким, чтобы обеспечить его воздействие на реактивность в течение кампании реактора. Ставится задача оценить максимально возможный диапазон снижения объема жидких радиоактивных отходов за счет применения разных выгорающих поглотителей. Этой проблеме уделяется большое внимание, вплоть до полного отказа от борного регулирования при работе реактора на мощности (см. п. 1.2.).

2.1. Постановка задачи определения зависимости коэффициента размножения ТВС в процессе выгорания топлива, при которой критичность реактора поддерживается выгорающими поглотителями

Влияние гадолиния в топливе на коэффициент размножения нейтронов определяется как числом твэлов, приходящихся на один твэг, так и массовым содержанием гадолиния в твэге. Цель данной работы – оценка максимально возможного диапазона снижения водообмена, осуществляемого при использовании жидкостной системы, за счет использования выгорающих поглотителей, интегрированных в топливную матрицу, путем варьирования весового содержания выгорающего поглотителя в твэлах и числа твэлов с поглотителем.

Рассматривается упрощенная модель трехкратной схемы частичных перегрузок без перестановок ТВС. В этом случае АЗ представляется как повторяющаяся структура из трех ТВС с различным временем выдержки. Такую структуру будем называть полиячейкой. Активную зону представляем, как бесконечную решетку из таких полиячеек. Коэффициент размножения нейтронов такой полиячейки $K_{\infty}^{POLY}(t)$ определим как среднее арифметическое по всем ТВС, входящих в полиячейку (2.1):

$$K_{\infty}^{POLY}(t) = \frac{K_{\infty}^{\text{TBC}}(t) + K_{\infty}^{\text{TBC}}(T+t) + K_{\infty}^{\text{TBC}}(2T+t)}{3} \quad (2.1)$$

Для всех вариантов применения выгорающих поглотителей топливная загрузка ТВС одинаковая. Задача формулируется следующим образом: найти такую зависимость $K_{\infty}^{POLY}(t)$ с выгорающим поглотителем, для которой коэффициент размножения нейтронов полиячейки в течение всей кампании будет равен критическому, т.е. не потребуется жидкостная система регулирования.

Для топлива низкого обогащения зависимость коэффициента размножения ТВС без выгорающих поглотителей близка к линейной (кривая 1 на рисунке 2.1):

$$K_{\infty}^{TBC}(t) = K_{\infty}(0) - \alpha t, \quad (2.2)$$

где α – коэффициент депрессии коэффициента размножения нейтронов; $K_{\infty}(0)$ – коэффициент размножения нейтронов в момент времени $t = 0$; t – время выгорания топлива.

При этих предположениях длительность кампании реактора при частичных перегрузках определяется по соотношению:

$$T_n = \frac{2}{(n+1)} T_1, \quad (2.3)$$

где T_1 – кампания при однократной перегрузке; n – количество перегрузок.

Продолжительность кампании при однократной перегрузке определяется из условия критичности в конце кампании:

$$K_{\infty}(T_1) = K_{\infty}(0) - \alpha T_1, \quad (2.4)$$

Для определения длины кампании необходимо учесть реальную утечку нейтронов из активной зоны. Это осуществляется путем задания величины критического значения коэффициента размножения полиячейки $K_{\infty}(T_1) = K_{\infty}^{CRIT}$. Из этого соотношения получаем выражение для продолжительности кампании при однократной перегрузке:

$$T_1 = \frac{K_{\infty}(0) - K_{\infty}^{CRIT}}{\alpha}, \quad (2.5)$$

где K_{∞}^{CRIT} – критическое значение коэффициента размножения.

Тогда при трёхкратной перегрузке кампания топлива

$$T_3 = 3T_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{(K_{\infty}(0) - K_{\infty}^{CRIT})}{\alpha} = \frac{\Delta K_{\infty}}{2\alpha}, \quad (2.6)$$

где ΔK_{∞} – полный запас реактивности на выгорание.

Нас интересует величина нескомпенсированной реактивности в течение кампании, которая будет скомпенсирована жидкостной системой. Для варианта без выгорающих поглотителей этот запас находится из соотношения:

$$K_{\infty}^{POLY}(t = 0) = \frac{K_{\infty}^{\text{TBC}}(0) + K_{\infty}^{\text{TBC}}(T) + K_{\infty}^{\text{TBC}}(2T)}{3} = K_{\infty}(0) - \alpha T. \quad (2.7)$$

Учитывая выражение для T_1 (2.5), получим:

$$K_{\infty}^{POLY}(0) = K_{\infty}(0) - \alpha \cdot \frac{(K_{\infty}(0) - K_{\infty}^{CRIT})}{2\alpha} = \frac{K_{\infty}(0) + K_{\infty}^{CRIT}}{2}. \quad (2.8)$$

В этом случае запас реактивности на жидкостное регулирование составит:

$$\Delta K_{\infty}^{POLY}(T) = K_{\infty}^{POLY} - K_{\infty}^{CRIT} = \frac{K_{\infty}(0) + K_{\infty}^{CRIT}}{2} - K_{\infty}^{CRIT} = \frac{K_{\infty}(0) - K_{\infty}^{CRIT}}{2}. \quad (2.9)$$

Далее будем рассматривать различные варианты использования гадолиния, предполагая, что он полностью выгорает за одну кампанию. Наличие твэгов приводит к трансформации исходной зависимости коэффициента размножения ТВС (2.2). При загрузке большого количества гадолиния и малого числа твэгов начальное значение $K_{\infty}(0)$ будет снижаться. В этом случае изменение реактивности за кампанию будет иметь вид линейной зависимости с максимумом в начале кампании. Величина максимума снижается по мере увеличения содержания гадолиния в твэгах (кривая 2 на рисунке 2.1). Для этого варианта изменение коэффициента размножения на промежутке $(0 < t < T)$ записывается следующим образом:

$$K_{\infty,2}^{(\text{TBC})}(t) = K_{\infty}^{(2)}(0) - \beta t, \quad (2.10)$$

где β – коэффициент депрессии изменения коэффициента размножения со временем.

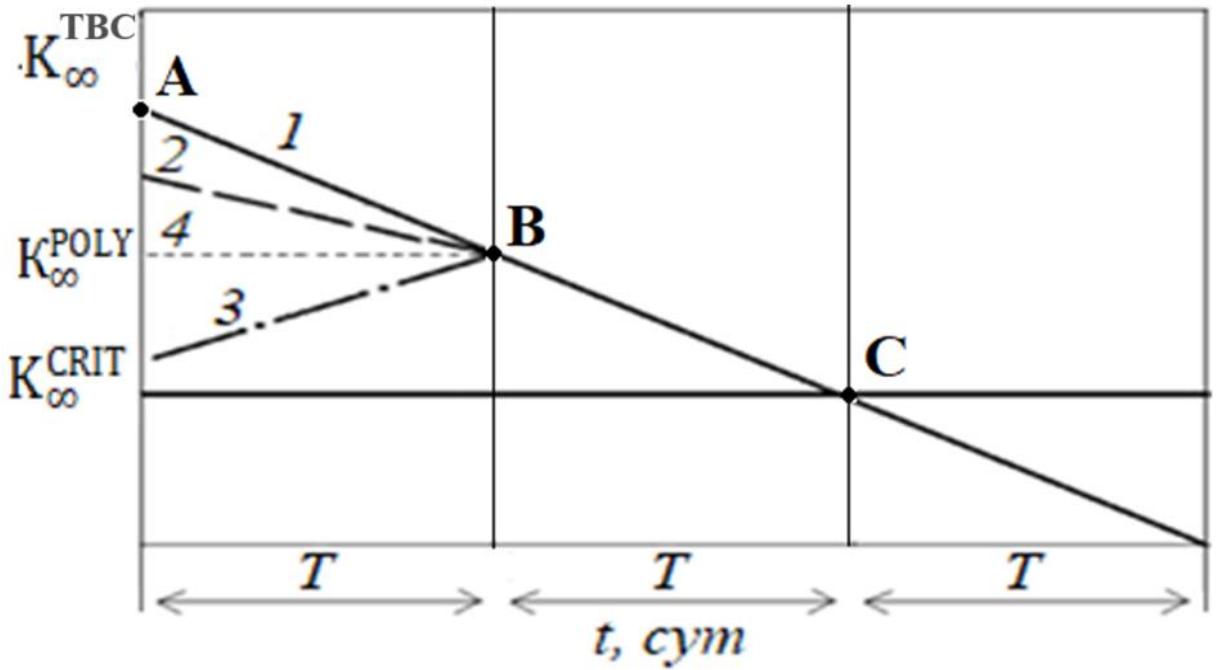


Рисунок 2.1 – Модельные зависимости $K_{\infty}^{TBC}(t)$ для варианта без поглотителя (1), с меньшим (2) и большим числом твэлов с гадолинием (3), $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для одной кампании (4).

Отдельно рассмотрим вариант, при котором изменение K_{∞}^{TBC} за первую кампанию будет описываться прямой линией (рисунок 2.1). В этом случае:

$$K_{\infty,2}^{(TBC)}(0) = K_{\infty,2}^{(TBC)}(T) = K_{\infty}^{POLY}(0). \quad (2.11)$$

Начальный запас реактивности полиячейки для этой зависимости:

$$K_{\infty,2}^{POLY}(0) = \frac{K_{\infty}^{POLY}(0) + K_{\infty}^{POLY}(0) + K_{\infty}^{TBC}(2T)}{3}. \quad (2.12)$$

Учитывая выражения (2.8), (2.6) и (2.2):

$$K_{\infty,2}^{POLY}(0) = \frac{K_{\infty}(0) + 2K_{\infty}^{CRIT}}{3}, \quad (2.13)$$

Запас реактивности для этого случая:

$$\rho_2 = \frac{K_{\infty,2}^{POLY} - K_{\infty}^{CRIT}}{K_{\infty,2}^{POLY}} = \frac{\frac{K_{\infty}(0) + 2K_{\infty}^{CRIT}}{3} - K_{\infty}^{CRIT}}{\frac{K_{\infty}(0) + 2K_{\infty}^{CRIT}}{3}} = \frac{K_{\infty}(0) - K_{\infty}^{CRIT}}{K_{\infty}(0) + 2K_{\infty}^{CRIT}}. \quad (2.14)$$

Для дальнейшего снижения запаса реактивности, компенсируемого жидкостной системой, необходимо увеличивать число твэлов в ТВС и снижать массовую загрузку гадолиния в них. Указанный вариант является альтернативным для первого варианта зависимости коэффициента размножения ТВС. Особенностью этого варианта является то, что в течение первой кампании

наблюдается возрастание реактивности (так называемый выбег реактивности) топлива, кривая 3 на рисунке 2.1. В этом случае изменение коэффициента размножения за первую кампанию можно записать в виде (2.15):

$$K_{\infty,3}^{(TBC)}(t) = K_{\infty}^{(3)}(0) + \beta t. \quad (2.15)$$

В обоих случаях при полном сгорании гадолиния в течение первой кампании, в дальнейшем коэффициент размножения совпадает с зависимостью для случая ТВС без выгорающих поглотителей.

Рассмотрим такой случай, при котором выполняется условие (2.16):

$$K_{\infty,3}^{(TBC)}(0) < \frac{K_{\infty}(0) + K_{\infty}^{CRIT}}{2}. \quad (2.16)$$

В этом случае при $t = T$, т. е. в конце первой кампании гадолиний успевает полностью выгореть. Обозначим $K_{\infty}^{TBC}(0)$ для этого случая как K_{∞}^* . Уравнение этой линии в диапазоне $0 < t < T$ будет иметь вид (2.17):

$$K_{\infty,3}^{TBC}(t) = K_{\infty}^* + \frac{K_{\infty,3}^{TBC}(t) - K_{\infty}^*}{T} t = K_{\infty}^* + \frac{K_{\infty}(0) - \alpha t - K_{\infty}^*}{T}. \quad (2.17)$$

Закон изменения реактивности за кампанию для этого варианта:

$$K_{\infty,3}^{POLY}(t) = \frac{1}{3} \left\{ K_{\infty}^* + 2K_{\infty}(0) + K_{\infty}(0) - \alpha T - 2\alpha T + t \left[\frac{K_{\infty}(0) + K_{\infty}^{CRIT}}{2T} - \frac{K_{\infty}^*}{T} - 2\alpha \right] \right\}. \quad (2.18)$$

Рассмотрим множитель при t :

$$\begin{aligned} \frac{K_{\infty}(0) + K_{\infty}^{CRIT} - 2K_{\infty}^* - 4\alpha T}{2T} &= \frac{K_{\infty}(0) + K_{\infty}^{CRIT} - 2K_{\infty}^* - 4\alpha \frac{K_{\infty}(0) - K_{\infty}^{CRIT}}{2\alpha}}{2T} = \\ &= \frac{3K_{\infty}^{CRIT} - K_{\infty}(0) - 2K_{\infty}^*}{2T}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Условие независимости изменения реактивности за кампанию (2.20) определяется равенством:

$$3K_{\infty}^{CRIT} - K_{\infty}(0) - 2K_{\infty}^* = 0. \quad (2.20)$$

Откуда K_{∞}^* равен:

$$K_{\infty}^* = \frac{3K_{\infty}^{CRIT} - K_{\infty}(0)}{2}. \quad (2.21)$$

Найдем чему равно это постоянное значение для модельной зависимости:

$$K_{\infty,3}^{POLY}(0) = \frac{1}{3} \left[\frac{3K_{\infty}^{CRIT} - K_{\infty}(0) + 4K_{\infty}(0)}{2} - \frac{3K_{\infty}(0) + 3K_{\infty}^{CRIT}}{2} \right] = \frac{6K_{\infty}^{CRIT}}{6} = K_{\infty}^{CRIT}. \quad (2.22)$$

Таким образом, начальное значение коэффициента размножения полиячейки для этого случая равно критическому. Поскольку как в начале, так и в конце кампании коэффициент размножения полиячейки равен критическому, а зависимость от времени носит линейный характер, то и в течение всей кампании реактора этот коэффициент равен критическому (рисунок 2.2), а реактивность будет равна 0:

$$\rho_2 = \frac{K_{\infty}^{POLY} - K_{\infty}^{CRIT}}{K_{\infty}^{POLY}} = \frac{K_{\infty}^{CRIT} - K_{\infty}^{CRIT}}{K_{\infty}^{CRIT}} = 0. \quad (2.23)$$

Получается, что эта теоретическая зависимость коэффициента размножения ТВС обеспечивает критичность в течение всей кампании без применения жидкостной системы компенсации.

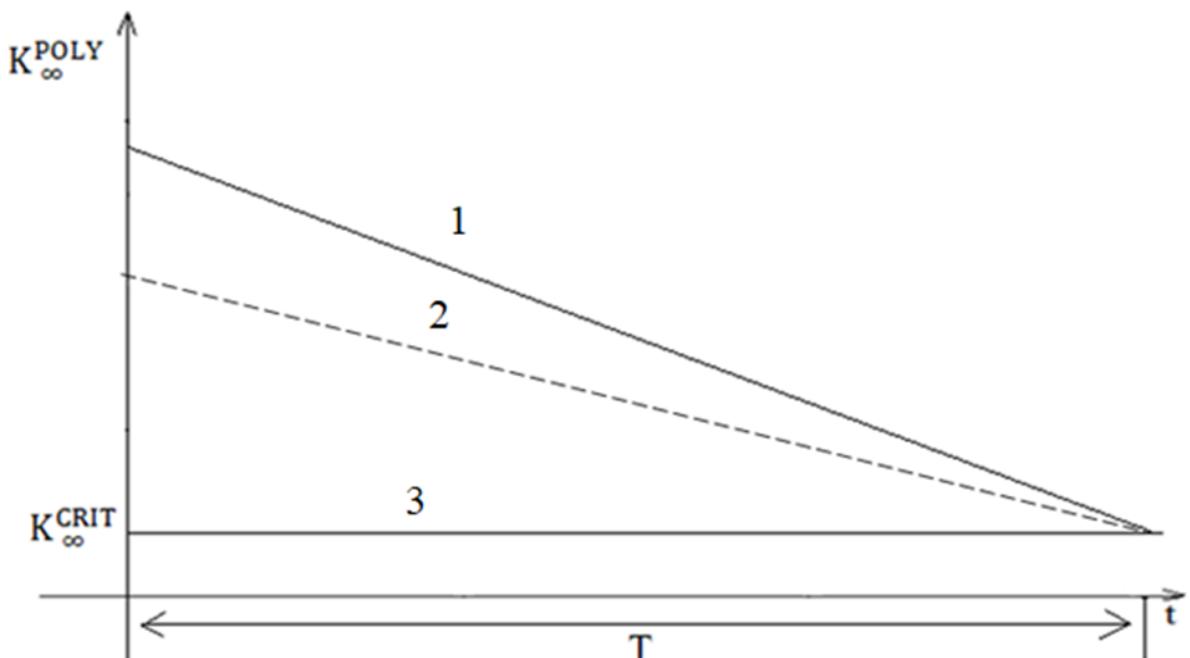


Рисунок 2.2 – Модельная зависимость $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для варианта без поглотителя (1), с меньшим (2) и большим числом твэлов с гадолинием (3)

Однако это достигается при условии, что начальный коэффициент размножения нейтронов становится меньше критического значения. Такую зависимость коэффициента размножения от времени для реальных поглотителей получить вряд ли возможно, но этот результат указывает на то, что для

минимизации некомпенсированной реактивности необходимо увеличивать число твэгов в ТВС и подбирать массовую долю гадолиния в них.

Полученный результат опирается на тот факт, что для исключения жидкостной системы компенсации избыточной реактивности необходимо скомпенсировать запас реактивности жидкостной системы увеличением количества выгорающего поглотителя, размещаемого в ТВС. В рамках принятой модели такой же результат можно получить для любой кратности перегрузок.

2.2. Модели для проведения расчетов

Для подтверждения выводов, сделанных при решении аналитической задачи, проведем нейтронно-физический расчет с использованием программного кода *Serpent* версии 2.1.32 [116]. Верификация данного программного кода была проведена в работах [117–120] с использованием различных тестовых задач и экспериментальных данных для реактора ВВЭР. В работе [118] проводится сравнение экспериментальных данных критической сборки с расчетными, среднее отклонение составило $\sim 0,3\%$, а максимальное не более $0,43\%$. При этом отклонение результатов расчета ПС *PSG2/SERPENT* ни для одной из конфигураций не превышает погрешности определения экспериментального значения коэффициента размножения нейтронов. В работе [119] проводилась верификация программного кода *Serpent* сотрудниками НТЦ ЯРБ с применением тестовых задач для реактора ВВЭР-1000. Результаты сравнивались со значениями, полученными по таким программным кодам, как *MCU*, *MCNP* и *KENO*. Отклонение значений составило не более $0,5\%$. Результаты указанных работ свидетельствуют о возможности использования программного кода *Serpent* для проведения нейтронно-физических расчетов для реакторов типа ВВЭР.

В расчетах будем рассматривать стандартную топливную сборку [121, 122] для реактора типа ВВЭР-1000 с обогащением топлива подпитки 4,9 %. При фиксированном числе твэгов в топливной сборке будем считать, что они равномерно распределены по ТВС. В таком случае в ТВС можно будет выделить элемент периодичности, состоящий из твэга в центре и симметрично

расположенных твэлов вокруг него (рисунки 2.3 и 2.4). В дальнейшем этот элемент будем называть полиячейкой.

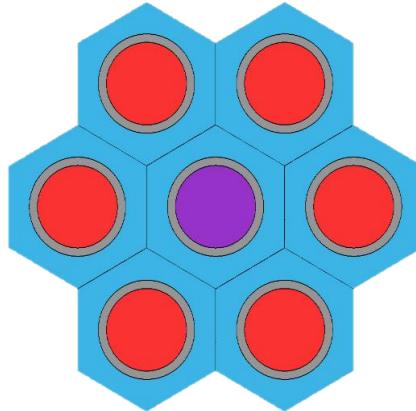


Рисунок 2.3 – Полиячейка с большим числом твэгов (1:6) в ТВС

Полиячейка, представленная на рисунке 2.3, выбрана с целью проведения численных расчетов для вариантов с большим числом твэгов. При данной схеме расположения в ТВС будет 44 твэга. Полиячейка, представленная на рисунке 2.4, учитывает существующее количество твэгов в реакторах типа ВВЭР-1000. В этом случае ТВС будет содержать 16 твэгов. В современных ТВС реактора ВВЭР-1200 число твэгов с поглотителем достигает 12 [123]. Данные схемы расположения твэгов в полиячейках были выбраны по причине простоты расчетов, в виду симметричного расположения твэлов вокруг твэга.

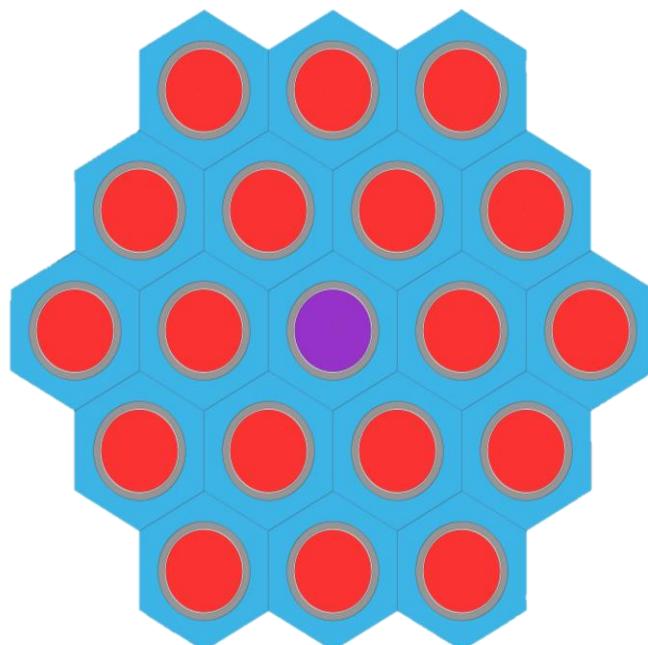


Рисунок 2.4 – Полиячейка с меньшим числом твэгов (1:18) в ТВС

Размеры полиячеек получены с учетом равенства водо-топливных соотношений для ТВС и полиячеек. В ТВС каналы, отведенные под органы регулирования, в штатном режиме заполняются теплоносителем. При формировании полиячеек необходимо учитывать этот теплоноситель. Тогда площадь элементарной ячейки будет увеличена (рисунок 2.5):

$$S_1 = S + \frac{nS}{N} = \frac{S(N + n)}{N}, \quad (2.24)$$

где S – площадь элементарной ячейки без учета воды в направляющих каналах; N – количество твэлов; n – количество каналов, отведенных под органы регулирования (18) и центральная труба (1).

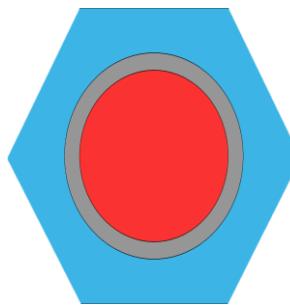


Рисунок 2.5 – Элементарная ячейка

Имея S_1 и учитывая шестигранную форму, можно найти новый шаг решетки с учетом добавления теплоносителя. Зная указанные параметры, можно сформировать геометрию полиячеек в программе. Задавая равные концентрации нуклидов, сверим изменение коэффициента размножения для представленных моделей. В расчетах используется библиотека данных ENDFb7, задана статистика $40 \cdot 10^6$ нейtronов. Согласно представленному графику, значения коэффициентов размножения для различных моделей совпадают. Это говорит о том, что геометрические размеры выбранных полиячеек рассчитаны верно. Использование полиячеек позволит сократить время расчета примерно в 5 раз по сравнению с расчетом стандартной ТВС реактора ВВЭР-1000. К тому же, для проведения расчетов полиячеек не потребуется большого числа ядер процессора и оперативной памяти для проведения расчета, что снизит нагрузку на аппаратные средства ЭВМ. При этом, спектр нейtronов в полиячейках будет определять спектр нейtronов в ТВС (рисунок 2.6).

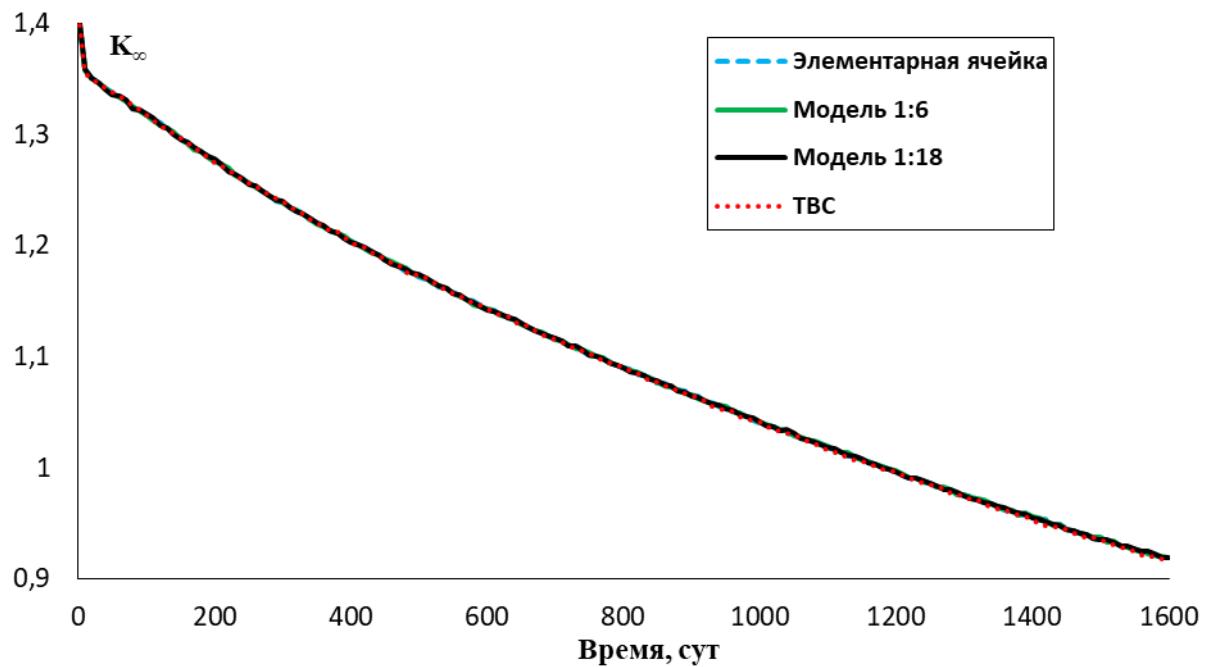


Рисунок 2.6 – Сравнение коэффициентов размножения для различных моделей

Согласно рисунку 2.6 графики изменения коэффициентов размножения для всех моделей совпали. Это дает возможность использовать полиячейки с большим (1:6) и малым (1:18) числом твэгов для моделирования коэффициента размножения ТВС. При использовании одномерных программ по типу Getera [124] можно из гексагональной модели полиячеек перейти в цилиндрическую [125] с учетом сохранения площадей топлива, оболочек и замедлителя. В этом случае гексагональные полиячейки (элемент периодичности) заменяются кольцевой системой, состоящей из слоев топлива (урана), оболочки (твэлов) и слоев теплоносителя (рисунки 2.7 и 2.8).

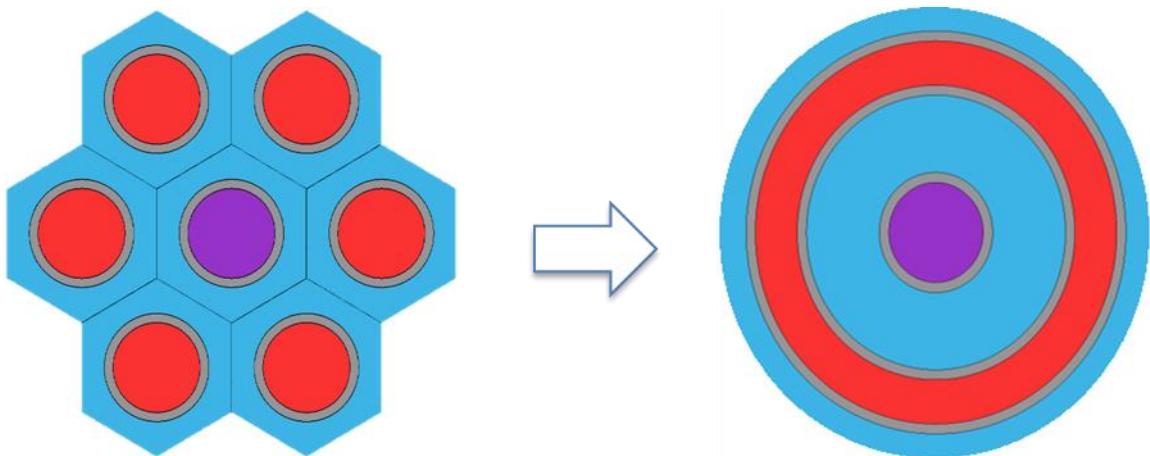


Рисунок 2.7 – Переход из гексагональной в цилиндрическую модель для случая с большим числом твэгов (1:6)

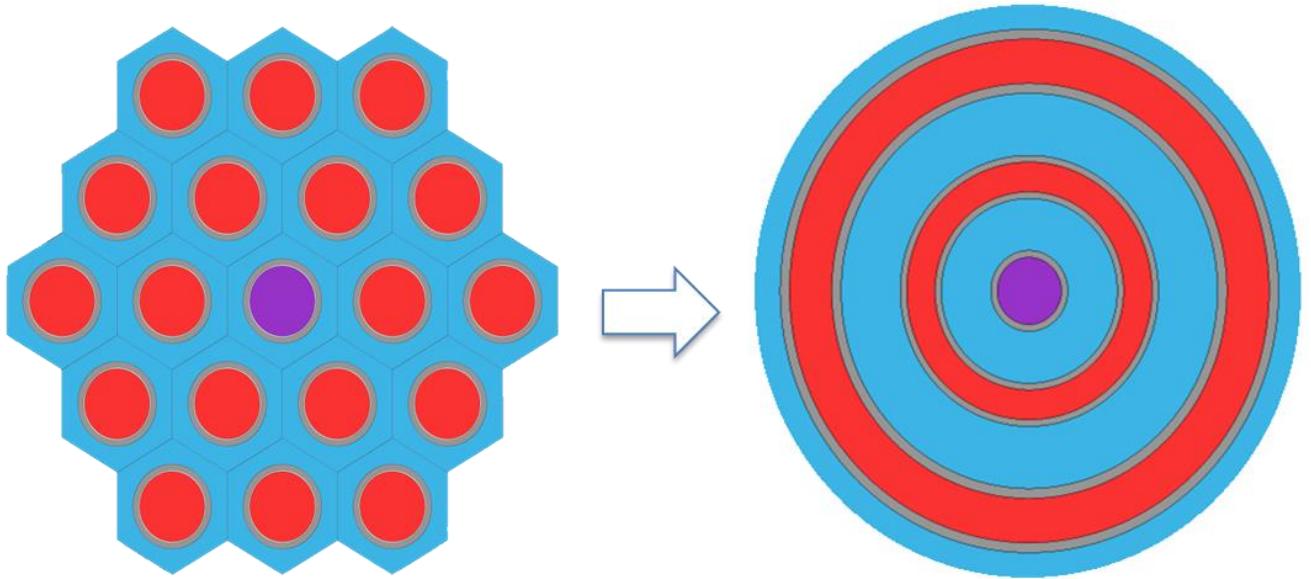


Рисунок 2.8 – Переход из гексагональной в цилиндрическую модель для случая с меньшим числом твэгов (1:18)

При расчете характерных радиусов для цилиндрической геометрии достигается такое же водотопливное соотношение, как и в случае с гексагональной геометрией. По рассчитанным характерным радиусам создана геометрия в *Serpent* для расчета изменения коэффициента размножения от времени. Проведены сравнения коэффициентов размножения для гексагональной и цилиндрической геометрии (рисунки 2.9 и 2.10).

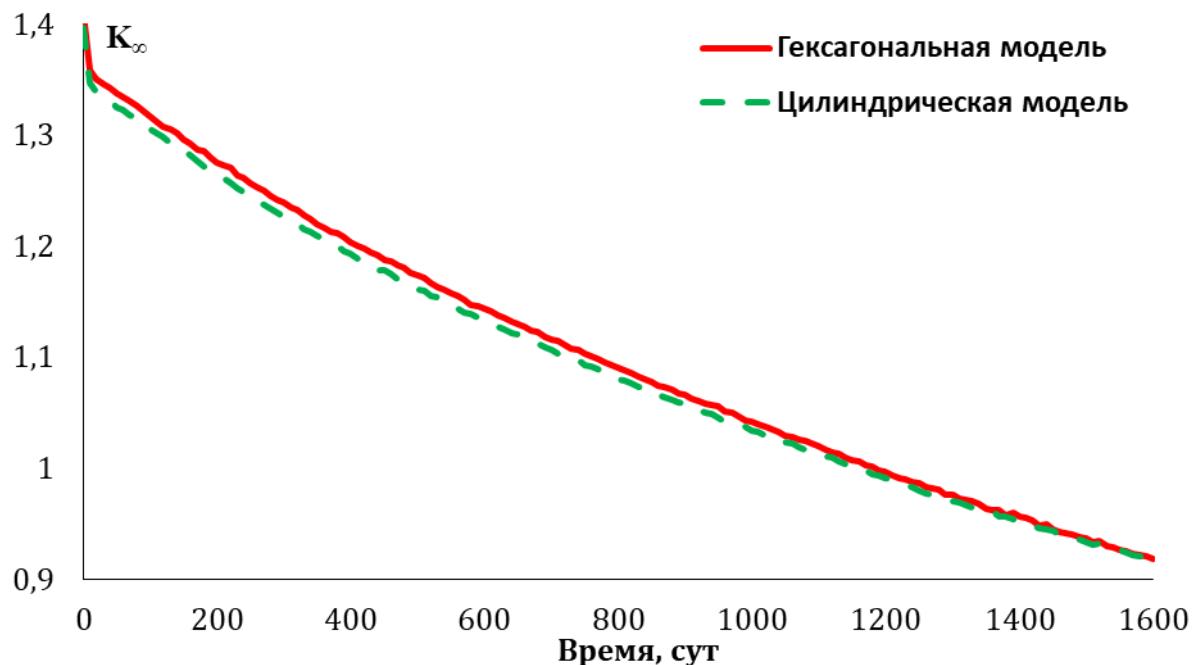


Рисунок 2.9 – Сравнение изменения коэффициентов размножения для гексагональной и цилиндрической модели для случая с большим числом твэгов (1:6)

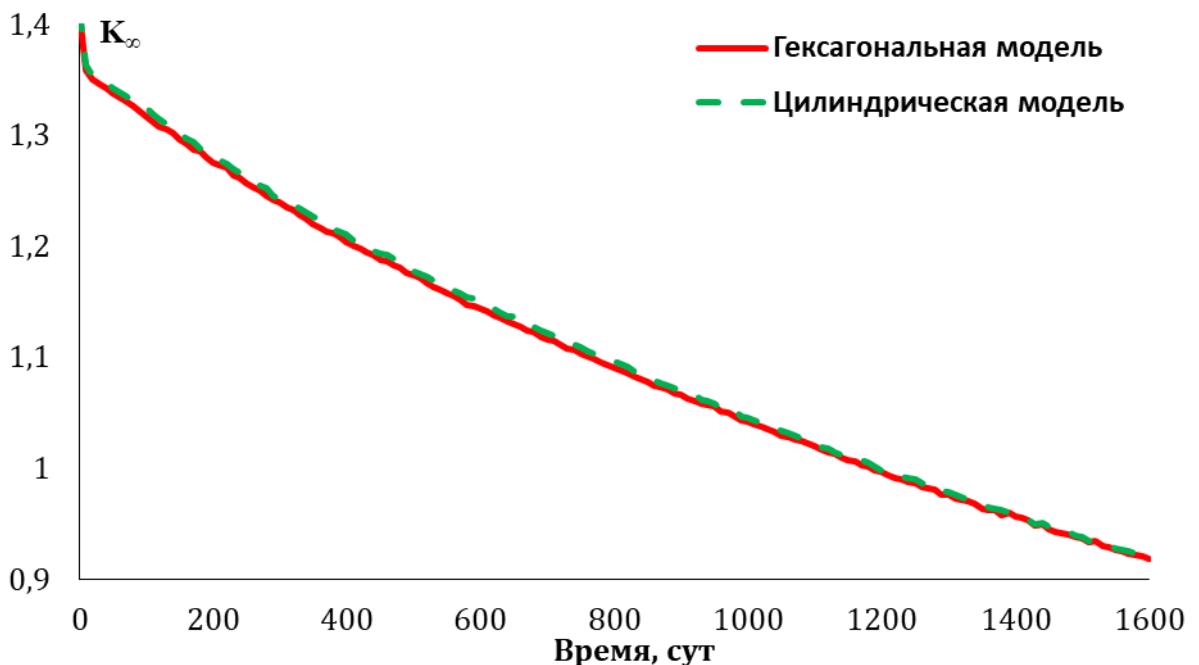


Рисунок 2.10 – Сравнение изменения коэффициентов размножения для гексагональной и цилиндрической модели для случая с меньшим числом твэгов (1:18)

Графики коэффициентов размножения совпадают. Таким образом, цилиндрические модели могут применяться для моделирования нейтронно-физических процессов в ТВС реактора ВВЭР-1000. В дальнейшем все расчеты будут проведены на гексагональных моделях рисунки 2.3. и 2.4.

2.3. Расчет кампании реактора

В расчетном исследовании выгорания применяется схема частичных перегрузок на упрощенной модели. Рассматриваются трехкратные перегрузки без перестановок ТВС. В этом случае в АЗ образуются повторяющиеся структуры, состоящие из ТВС с различными длительностями облучения в реакторе. Задавая условие критичности с учетом утечки нейtronов из активной зоны реактора ВВЭР-1000, (2.25) находим значение критического коэффициента размножения для повторяющейся структуры (2.26). Учитывая критичность, принимаем эффективный коэффициент размножения нейtronов за 1. При этом принимается, что утечка рут не зависит от способа компенсации запаса реактивности:

$$K_{\text{эфф}} = K_{\infty}^{\text{CRIT}} (1 - p_{\text{ут}}) = 1, \quad (2.25)$$

$$K_{\infty}^{\text{CRIT}} = \frac{1}{(1 - p_{\text{ут}})} = \frac{1}{0,95} \approx 1,05, \quad (2.26)$$

где $K_{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент размножения.

Реактивность в этом случае определяется следующим образом:

$$\rho = 1 - \frac{1}{K_{\text{ЭФ}}} = 1 - \frac{1}{\frac{K_{\infty}^{\text{POLY}}}{K_{\infty}^{\text{CRIT}}}} = \frac{K_{\infty}^{\text{POLY}} - K_{\infty}^{\text{CRIT}}}{K_{\infty}^{\text{POLY}}}. \quad (2.27)$$

Предполагается, что эти повторяющиеся структуры образуют периодическую полирешетку, состоящую из трех ТВС в АЗ. Для простоты коэффициент размножения АЗ представляется в виде среднего арифметического из входящих в неё ТВС (2.28):

$$K_{\infty}^{\text{A3}}(t) = K_{\infty}^{\text{POLY}}(t) = \frac{K_{\infty}^{\text{TBC}}(t) + K_{\infty}^{\text{TBC}}(T+t) + K_{\infty}^{\text{TBC}}(2T+t)}{3}, \quad (2.28)$$

$$0 < t < T,$$

где $K_{\infty}^{\text{A3}}(t)$ – коэффициент размножения АЗ.

В этом случае зависимость коэффициента размножения ТВС $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$ делится на три участка. Значения, полученные в промежутке от 0 до T , соответствуют коэффициенту размножения свежей ТВС, простоявшей одну кампанию. Это компонент $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$ в формуле (2.28). Соответственно, компоненты $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t+T)$ и $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t+2T)$ учитывают коэффициент размножения для ТВС с двумя и тремя кампаниями в АЗ. Продолжительность кампаний реактора определяется из условия, что коэффициент размножения в конце кампании повторяющейся структуры равен критическому $K_{\infty}^{\text{POLY}} = K_{\infty}^{\text{CRIT}} = 1,05$.

При однократной перегрузке для топлива без выгорающих поглотителей критический коэффициент размножения $K_{\infty}^{\text{CRIT}} = 1,05$ достигается примерно при 1000 сут. (рисунок 2.6). Согласно формуле (2.3), при трехкратной перегрузке топлива с начальным обогащением 4,9 % продолжительность кампании должна составлять 500 сут. Подставляя данные в формулу (2.28), получаем продолжительность кампании реактора 500 сут. [126] для всех гексагональных моделей (рисунок 2.11).

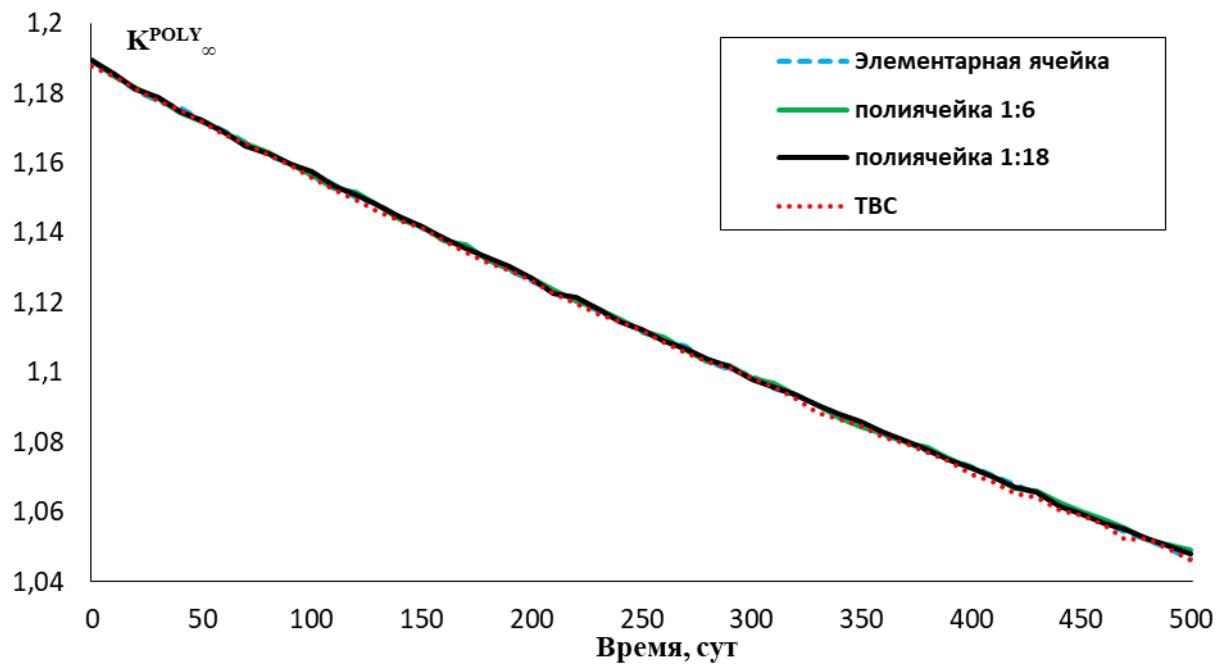


Рисунок 2.11 – Сравнение зависимостей $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для гексагональных моделей

Для проверки предлагаемой упрощенной модели выгорания топлива была собрана структура из трех ТВС, представленная на рисунке 2.12. Для собранной структуры были заданы концентрации топлива без выгорающих поглотителей, аналогичные для одной ТВС. На рисунке 2.13 представлены полученные расчетные данные $K_{\infty}^{TBC}(t)$. Значения коэффициентов размножения полностью совпадают. Это дает возможность применения структуры из трех ТВС для расчета равновесного режима перегрузок топлива.

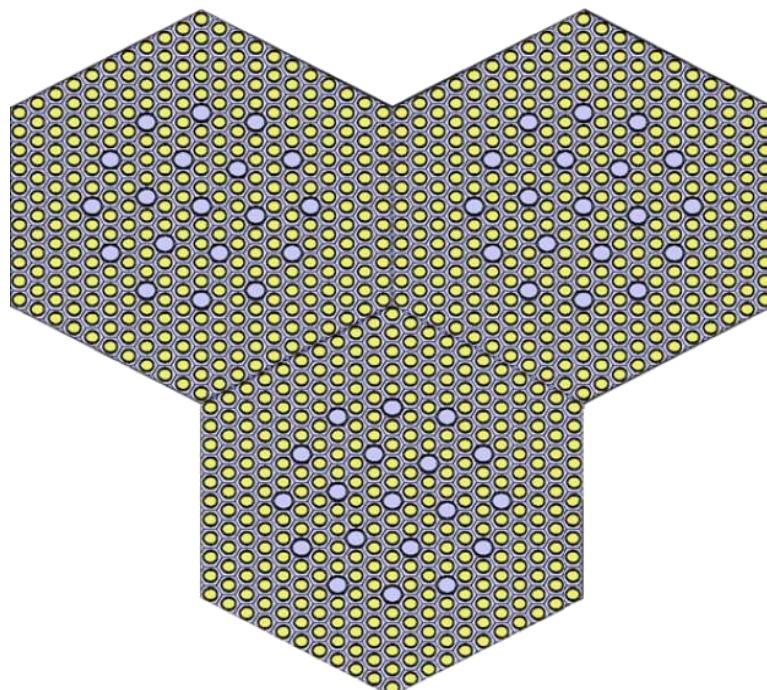


Рисунок 2.12 – Модель из трех ТВС

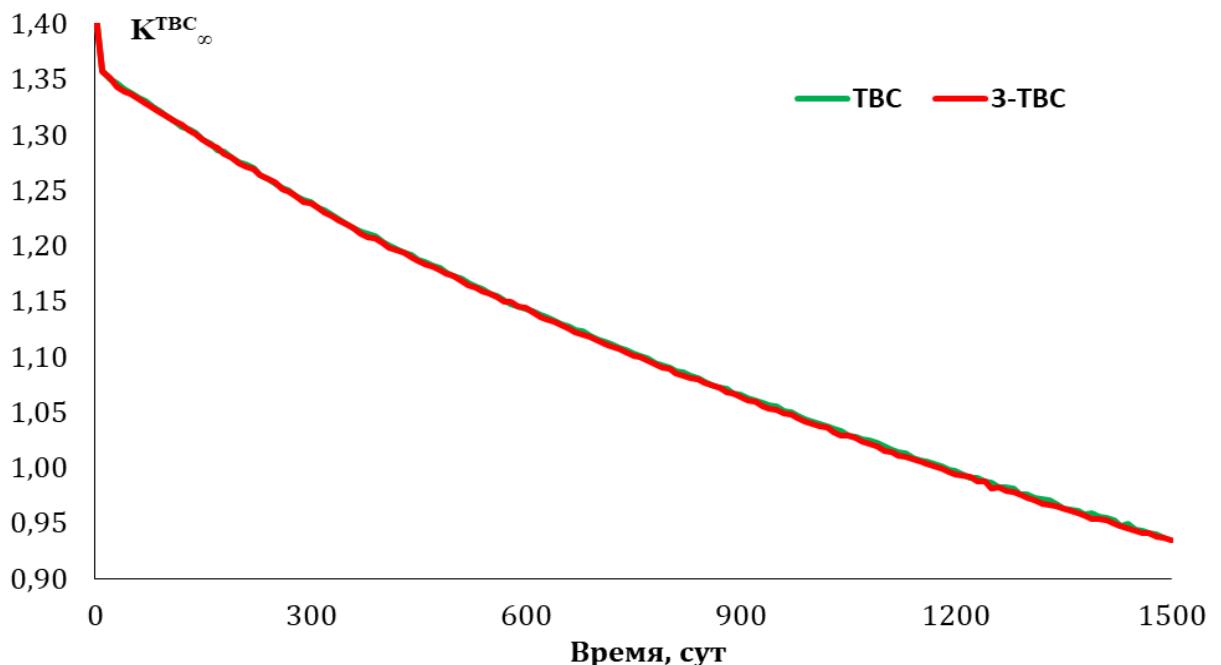


Рисунок 2.13 – Сравнение зависимостей $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$ для ТВС и модели из 3-х ТВС

На следующем этапе проводится расчет по определению кампании реактора итерационным способом с целью выйти на равновесный режим. Продолжительность кампании определяется из условия достижения в конце топливной кампании значения K_{∞}^{CRIT} . Учитывая трехкратную схему перегрузки, формируется полиячейка, состоящая из трех ТВС с разными временами пребывания в реакторе (рисунок 2.14). В результате, получаются ТВС с одной (желтая), двумя (оранжевая) и тремя (красная) кампаниями. Результаты изменения зависимости $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$ при одно- и трехкратной перегрузках показаны на рисунке 2.15. Применение трехкратной перегрузки приводит к снижению кампании реактора на половину по сравнению с однократной перегрузкой. Согласно проведенным расчетам, в результате применения перегрузок создается запас реактивности для работы реактора на мощности в течение кампании. При этом топливная кампания для трехкратной перегрузки увеличивается в 1,5 раза. На рисунке 2.16 показано сравнение значений $K_{\infty}^{\text{POLY}}(t)$, полученных при частичных перегрузках, со значениями упрощенной модели выгорания, рассчитанными по формуле (2.28) для модели из трех ТВС. Отклонения значений упрощенной модели выгорания от частичных перегрузок рассчитаны по формуле (2.29). Полученные отклонения записаны в таблице 2.1.

$$D = \left(\frac{K_{\infty 1}^{POLY}}{K_{\infty 2}^{POLY}} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (2.29)$$

где $K_{\infty 1}^{POLY}$ – значения упрощенной модели выгорания; $K_{\infty 2}^{POLY}$ – значения для модели перегрузок.

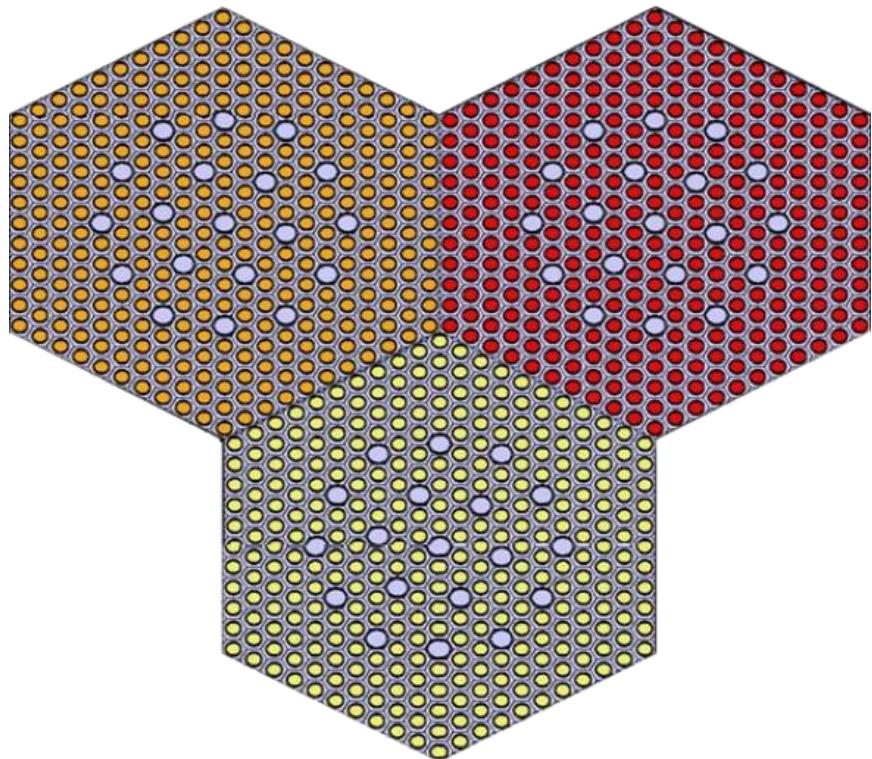


Рисунок 2.14 – Расчетная модель из трех ТВС с различными кампаниями

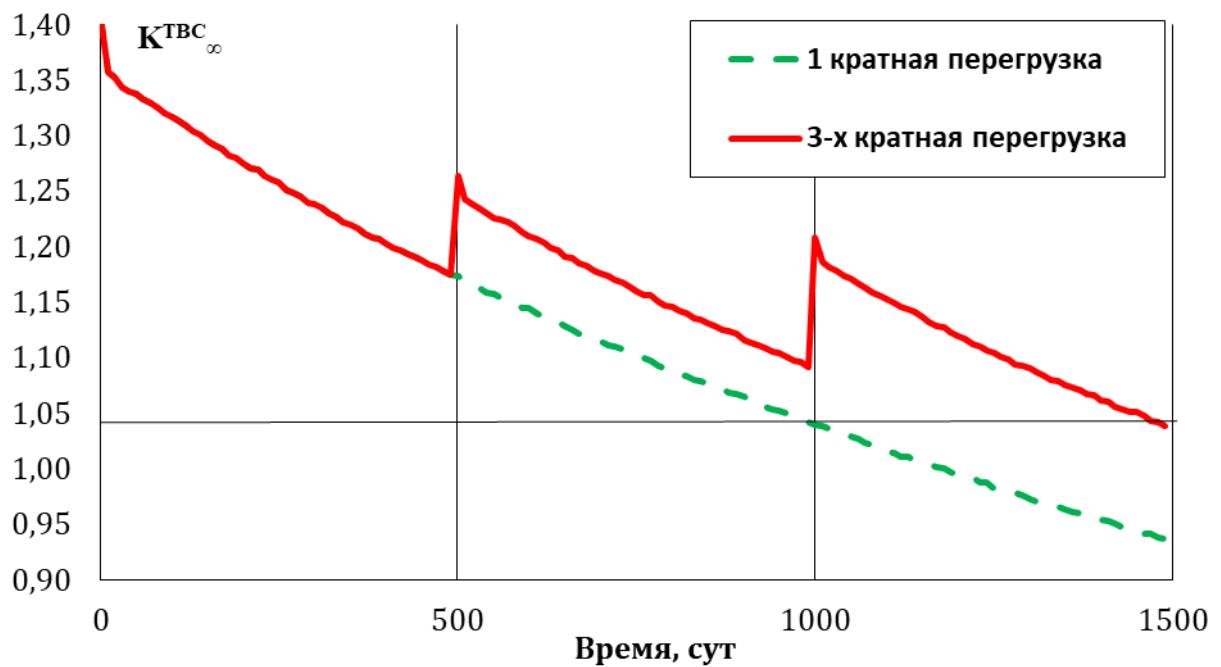


Рисунок 2.15 – Зависимость $K_{\infty}^{TBC}(t)$ при 1- и трехкратной перегрузке для модели из трех ТВС

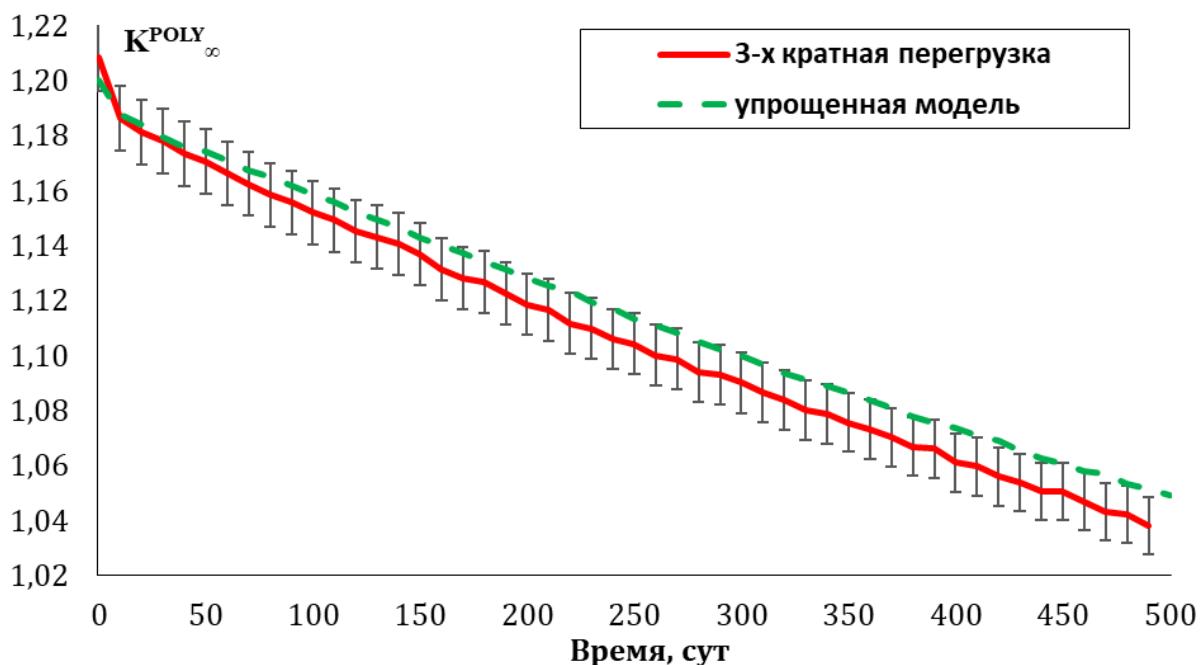


Рисунок 2.16 – Зависимости $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для упрощенной модели и модели из трех ТВС

Максимальные значения, которые достигаются в начале кампании практически совпали. Дальше, по мере выгорания, возникает небольшая разница в значениях. Среднее значение отклонения $\sim 0,7 \%$, максимальное не превышает $1,3 \%$. Полученные результаты находятся в допустимой области отклонений ($\sim 5 \%$) [127]. Следовательно, можно использовать формулу (2.28) для расчета значений $K_{\infty}^{POLY}(t)$ периодической структуры, и определять по данному условию продолжительность кампании.

Таблица 2.1. Отклонения значений $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для упрощенной модели и модели частичных перегрузок

Время выгорания, сут.	Упрощенная модель	Частичные перегрузки	Отклонение, %
0	1,205	1,208	-0,282
50	1,174	1,171	0,310
100	1,159	1,152	0,576
150	1,143	1,137	0,515
200	1,128	1,119	0,840
250	1,113	1,104	0,841
300	1,100	1,090	0,928
350	1,087	1,076	1,021
400	1,074	1,061	1,192
450	1,060	1,050	0,958
500	1,049	1,042	0,674

2.4. Влияние весового содержания гадолиния в твэгах при их различных конфигурациях расположения в ТВС на нескомпенсированный запас реактивности

В этом разделе приведены результаты расчетных исследований влияния числа твэгов и весового содержания загружаемого в них гадолиния на нескомпенсированный запас реактивности. Цель исследований – снижение запаса реактивности, компенсируемого жидкостной системой компенсации избыточной реактивности. При этом будем рассматривать варианты как с большим числом твэгов (1:6) (рисунок 2.3), так и с малым числом твэгов (1:18) (рисунок 2.4).

2.4.1. Зависимость нескомпенсированного запаса реактивности от весового содержания гадолиния в твэгах при схеме расположения с большим числом твэгов в ТВС (1:6)

В расчетах для этого варианта содержание гадолиния в твэге варьировалось в диапазоне от 2 до 6 % (весовых). Характер изменения коэффициентов размножения в течение топливной кампании для всех рассмотренных вариантов характеризуется наличием участка с выбегом реактивности (рисунок 2.17).

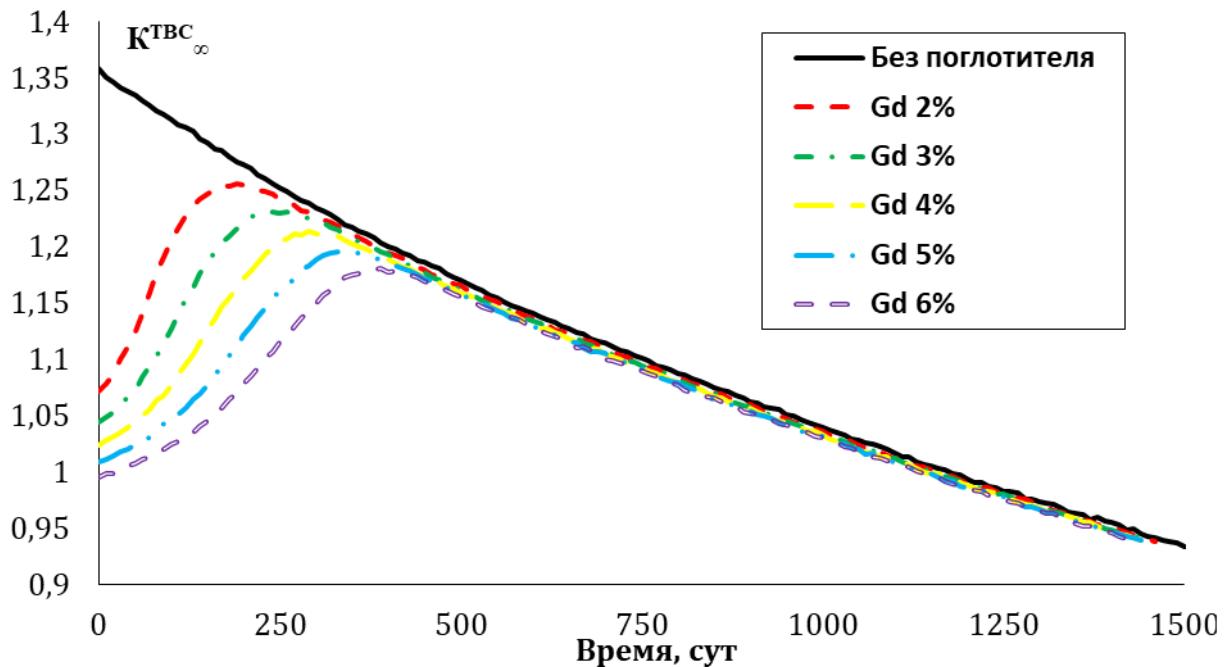


Рисунок 2.17 – Зависимости $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$ для случая с большим числом твэгов (1:6)

При увеличении весового содержания гадолиния в твэге, во-первых, уменьшается начальное значение коэффициента размножения $K_{\infty}^{\text{TBC}}(0)$, во-вторых,

снижается выбег реактивности в начале кампании, а, в-третьих, максимум реактивности сдвигается к концу кампании.

Для выбранных вариантов были рассчитаны значения за кампанию для оценки избыточного запаса реактивности, который должен компенсироваться жидкостной системой. Характер изменения за кампанию для всех $K_{\infty}^{POLY}(t)$ вариантов представлен на рисунке 2.18, причем все они отличаются от линейной зависимости. Для вариантов с небольшой концентрацией гадолиния $K_{\infty}^{POLY}(t)$ в твэгах эта зависимость близка к параболическому типу. В этом случае в начале происходит интенсивный рост и дальше наблюдается спад реактивности. По мере повышения весового содержания гадолиния в твэгах максимум некомпенсированного запаса реактивности снижается, а сам максимум сдвигается к концу кампании. Значения максимальной некомпенсированной реактивности для исследуемых вариантов рассчитаны по формуле (2.27) и приведены в таблице 2.2.

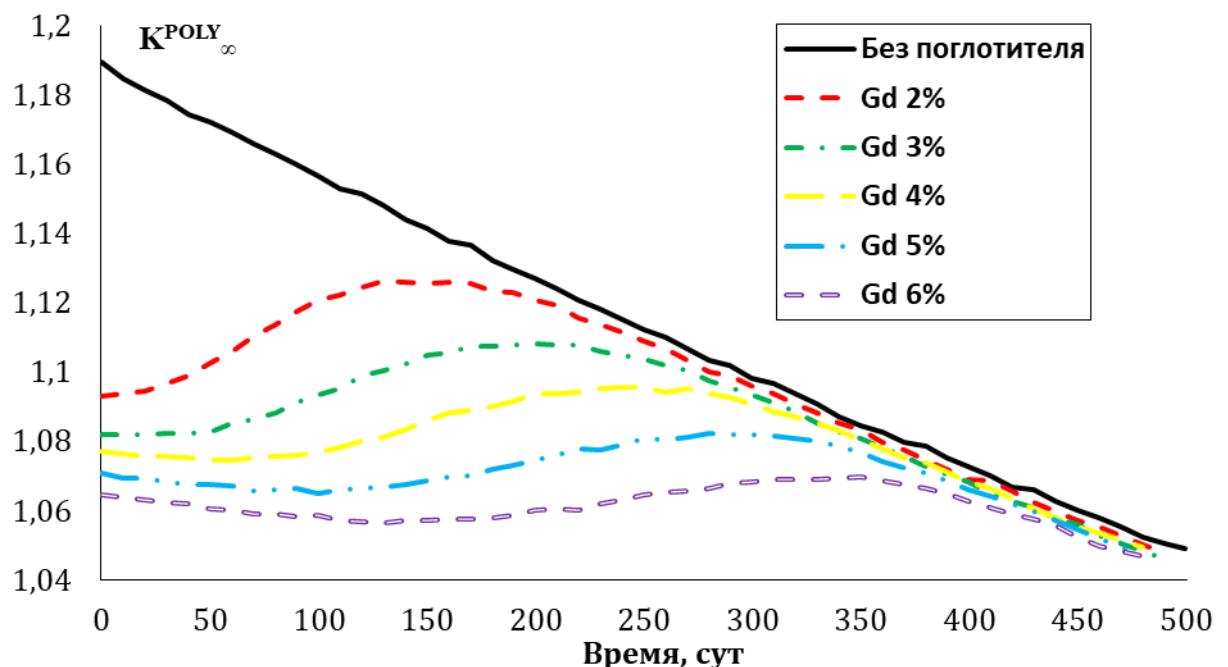


Рисунок 2.18 – Зависимости $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для случая с большим числом твэгов (1:6)

В таблице 2.2 величина $\rho_{\text{относ}}$ – относительное снижение максимального некомпенсированного значения реактивности, взятое по отношению к варианту без поглотителя. Данное выражение определяется по формуле (2.30).

Таблица 2.2. Максимальный нескомпенсированный запас реактивности для вариантов с большим числом твэгов (1:6)

№	Вариант	$\max K_{\infty}^{\text{POLY}}$	K_{∞}^{CRIT}	ρ	$\rho_{\text{относ, \%}}$
1	Без поглотителя	1,189	1,05	0,117	–
2	Gd 2 %	1,126	1,05	0,067	42
3	Gd 3 %	1,108	1,05	0,052	55
4	Gd 4 %	1,096	1,05	0,042	64
5	Gd 5 %	1,082	1,05	0,030	75
6	Gd 6 %	1,070	1,05	0,019	84

$$\rho_{\text{относ}} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{поглотитель}}}{\rho_{\text{без поглотителя}}}\right) \cdot 100 \%. \quad (2.30)$$

Повышение весового содержания поглотителя в твэге при данной компоновке (1:6) приводит к заметному снижению максимального запаса реактивности. Этот эффект сильно выражен для вариантов с максимальным содержанием гадолиния в твэге 5 и 6 %. Для идеального варианта, при котором достигается полное исключение борного регулирования при компенсации избыточной реактивности за кампанию, выполняются условия $K_{\infty}^{\text{TBC}}(0) < K_{\infty}^{\text{CRIT}}$ и $\max K_{\infty}^{\text{TBC}}(0) \leq K_{\infty}^{\text{POLY}}(0)$. Согласно рисунку 2.17, этим условиям соответствует вариант с наибольшим весовым содержанием поглотителя 6 %. Следовательно, стратегия увеличения числа твэгов и весового содержания гадолиния в них приводит к снижению запаса реактивности, компенсируемого жидкостной системой, и, тем самым, минимизируется концентрация борного поглотителя за кампанию.

Однако при больших загрузках гадолиния происходит спад мощности твэга, что приводит к сильной неравномерности энерговыделения в полиячайке. На рисунке 2.19, представлена величина отношение мощности твэга к средней мощности окружающих его твэлов за кампанию. Максимум неравномерности достигается в начале кампании, когда содержание гадолиния в твэгах максимальное. По мере выгорания поглотителя неравномерность снижается и в конце кампании пропадает.

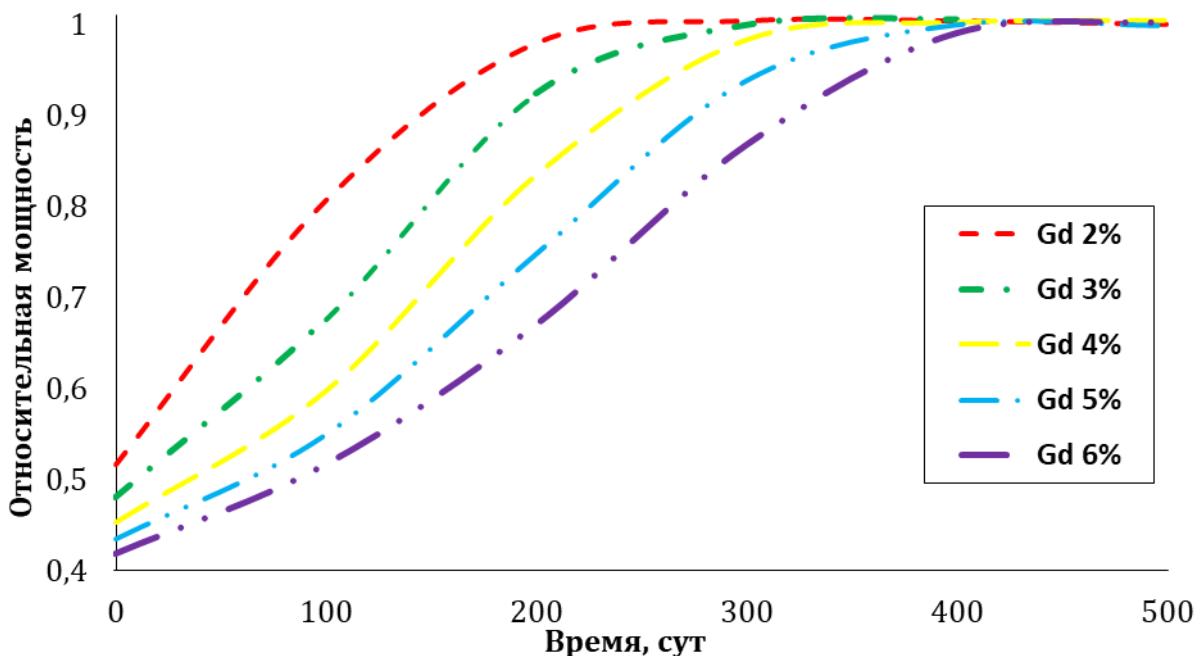


Рисунок 2.19 – Изменение отношения мощности твэга к средней мощности твэлов за кампанию для варианта с большим числом твэгов (1:6)

2.4.2. Зависимость нескомпенсированного запаса реактивности от весового содержания гадолиния в твэгах при схеме расположения с числом твэгов в ТВС (1:18)

В этих вариантах твэг окружен двумя рядами твэлов, а концентрация гадолиния в твэге варьировалась в интервале от 4 до 8 %, что представлено на рисунке 2.20. Главная особенность зависимости коэффициента размножения ТВС от времени заключается в том, что начальное значение $K_{\infty}^{\text{ТВС}}(0)$ слабо изменяется в зависимости от содержания гадолиния в твэгах. По зависимостям $K_{\infty}^{\text{ТВС}}(t)$ для вариантов с поглотителем наблюдается выравнивание графика коэффициента размножения в течение первой кампании, что подтверждает предположения, сделанные для модельной зависимости второго типа. Кроме того, после полного выгорания гадолиния за первую кампанию все зависимости $K_{\infty}^{\text{ТВС}}(t)$ для вариантов с поглотителем совпадают с вариантом без поглотителя.

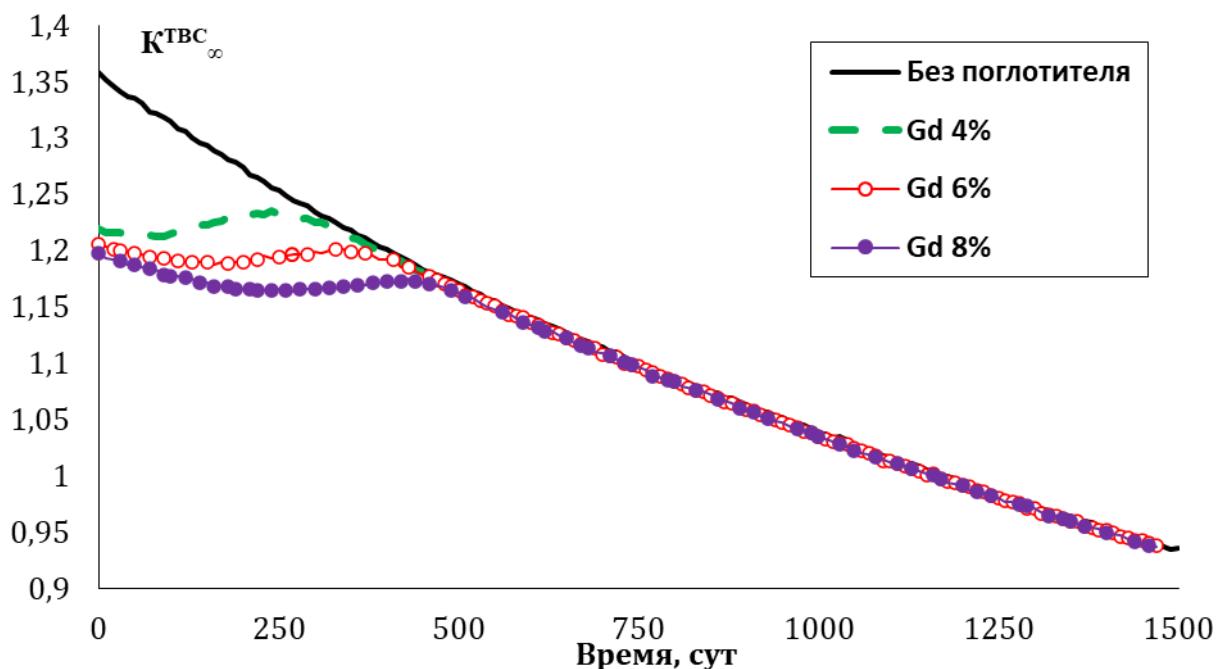


Рисунок 2.20 – Зависимости $K_{\infty}^{TBC}(t)$ для варианта с меньшим числом твэгов (1:18)

Некомпенсированный запас реактивности для этих вариантов слабо зависит от весового содержания гадолиния в твэгах, поскольку начальный коэффициент размножения ТВС также слабо изменяется при повышении содержания гадолиния в них. Изменение запаса реактивности за кампанию реактора для этих вариантов происходит по линейному закону. В результате полный запас реактивности, компенсируемый гадолинием, также слабо зависит от весового содержания гадолиния в твэгах. Таким образом, повышение весового содержания гадолиния в твэге не влияет на величину запаса реактивности, компенсируемого борным регулированием. Следовательно, при небольшом числе твэгов в ТВС существенно уменьшить водообмен путем увеличения загрузки гадолиния в твэге невозможно. В таблице 2.3 представлены значения максимального нескомпенсированного запаса реактивности на жидкостное регулирование для рассматриваемых вариантов.

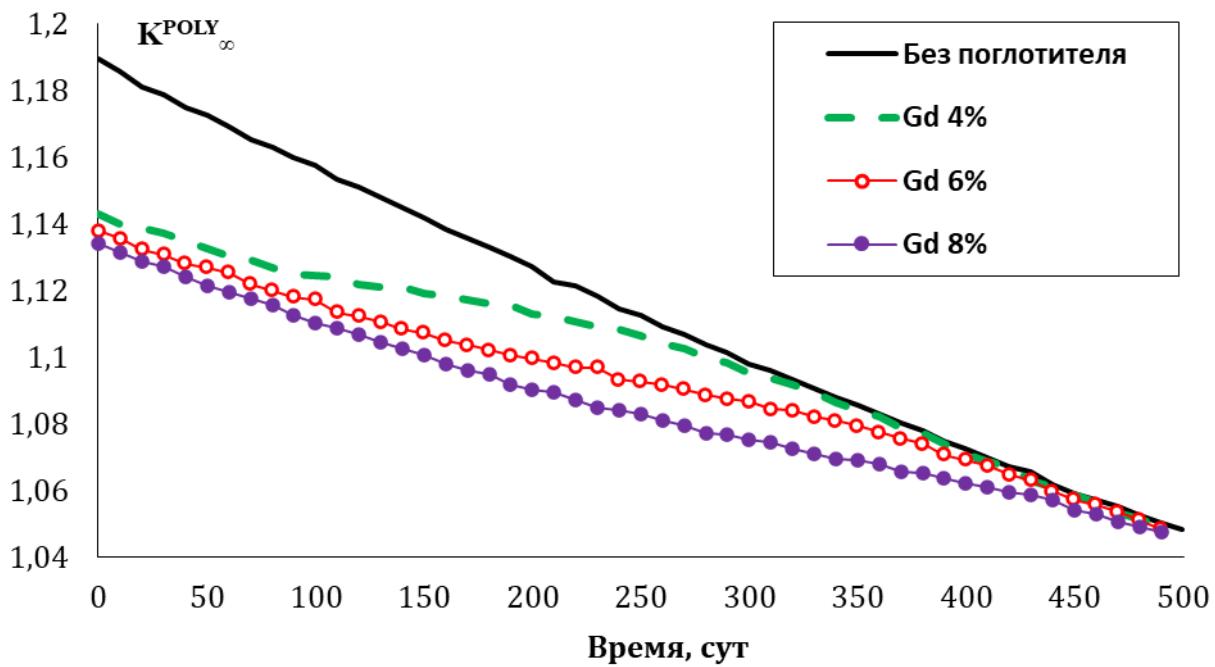


Рисунок 2.21 – Зависимости $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для случая с меньшим числом твэлов (1:18)

Таблица 2.3. Максимальный нескомпенсированный запас реактивности для вариантов с меньшим числом твэлов (1:18)

№	Вариант	$\max K_{\infty}^{POLY}$	K_{∞}^{CRIT}	ρ	$\rho_{\text{относ, \%}}$
1	Без поглотителя	1,189	1,05	0,117	
2	Gd 4%	1,143	1,05	0,081	30
3	Gd 6%	1,138	1,05	0,077	34
4	Gd 8%	1,134	1,05	0,074	37

Так, увеличение концентрации гадолиния в 2 раза от 4 до 8 % привело к снижению максимального запаса реактивности всего на 7 %. При этом в варианте с максимальной концентрацией гадолиния 8 % при размещении твэлов по схеме (1:18) компенсируется меньший запас реактивности чем для варианта размещения твэлов (1:6) при минимальной загрузке 2 %. При данной схеме расположения гадолиния нескомпенсированный запас реактивности практически не зависит от весового содержания гадолиния в твэгах. Таким образом, не изменяется доля жидкостного регулирования при варьировании концентрации гадолиния в твэге.

Применение больших загрузок гадолиния при данной схеме размещения снижает отношение средней мощности твэга к средней мощности окружающих твэлов (рисунок 2.22). При равных весовых содержаниях поглотителя (4 и 6 %) в твэге коэффициент неравномерности энерговыделения для варианта (1:18) меньше,

чем для варианта с большим числом твэгов (1:6) в ТВС, так как в этом случае количество твэгов меньше.

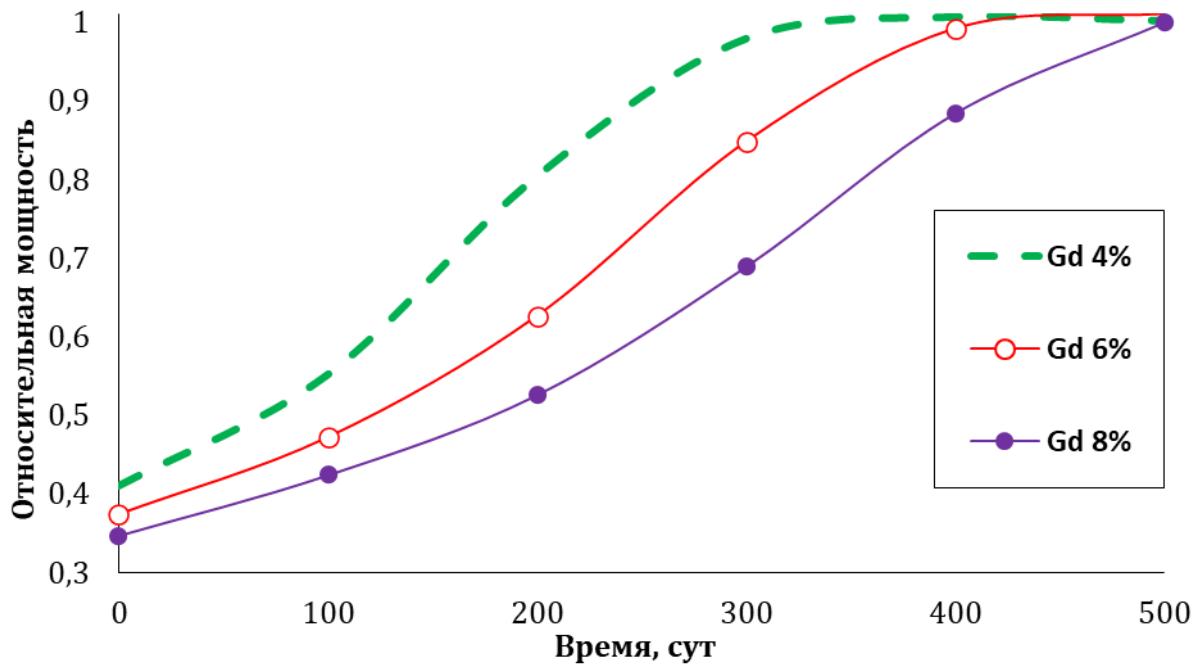


Рисунок 2.22 – Изменение отношения мощности твэга к средней мощности твэлов за кампанию для случая (1:18)

2.5. Методика и результаты расчета водообмена при использовании жидкостной системы компенсации избыточной реактивности

Для расчета полного объема извлекаемого теплоносителя при компенсации избыточной реактивности при борном регулировании необходимо знать изменение концентрации бора в теплоносителе $\rho_B(t)$ в течение кампании реактора. При этом предполагается, что концентрация бора в теплоносителе в любой момент времени кампании одинакова по всему объему первого контура. Кроме того, рассматривается непрерывный процесс изменения концентрации бора в активной зоне для поддержания критичности.

Итак, будем считать известной зависимость $\rho_B(t)$, при которой в течение всей кампании поддерживается критичность реактора. В момент времени t концентрация бора в теплоносителе равна $\rho_B(t)$, а в момент $t + dt$ времени требуется обеспечить концентрацию $\rho_B(t + dt)$. Следовательно, за время dt из теплоносителя необходимо вывести количество бора $\Delta\rho_B = \rho_B(t + dt) - \rho_B(t)$, если реактивность снижается, или ввести, если реактивность увеличивается. Соответственно, полное количество борного поглотителя, вводимого (выводимого)

в первый контур, будет равно $\Delta\rho_B V_K$. Тогда для вариантов с малым числом твэгов (1:18) и без выгорающих поглотителей полное количество бора, выводимого из реактора, $\Delta\rho_B V_K$ при этом $\Delta\rho_B < 0$. Концентрация борного поглотителя изменяется по двум причинам. Первая – за время dt выгорит определенное количество бора

$$-\int_{V_{H_2O}^{A3}} \frac{\rho_B(t)\bar{\sigma}_B}{V_{H_2O}^{A3}} \varphi(\bar{r}, t) dV_{A3} \frac{dt}{n} = -\bar{\sigma}_B \rho_B(t) \int_0^T \varphi_0(t) \frac{dt}{n} \quad (2.31)$$

где $n = \frac{T_0}{\tau_0}$; T_0 – время однократной циркуляции теплоносителя по контуру; τ_0 – время прохождения теплоносителем через активную зону; $\bar{\sigma}_B$ – среднее микросечение поглощения бора в теплоносителе.

Вторая – часть борного поглотителя выводится из контура путем процедуры водообмена. Это осуществляется путем отбора из первого контура объема теплоносителя dV с концентрацией поглотителя $\rho_B(t)$. Следовательно, балансовое соотношение будет выглядеть следующим образом:

$$\delta\rho_B V_K = \rho_B(t) dV(t), \quad (2.32)$$

откуда получим уравнение:

$$\delta\rho_B = \frac{\rho_B(t) dV(t)}{V_K}. \quad (2.33)$$

Учитывая обе части, запишем полное уравнение:

$$d\rho_B = -\bar{\sigma}_B \rho_B(t) \int_0^T \varphi_0(t) \frac{dt}{n} - \rho_B(t) \frac{dV(t)}{V_K}. \quad (2.34)$$

Делим на $\rho_B(t)$ и интегрируем по длине кампании:

$$\frac{V(T)}{V_K} = -\bar{\sigma}_B \int_0^T \varphi_0(t) \frac{dt}{n} + \ln \frac{\rho_B(0)}{\rho_B(T)}. \quad (2.35)$$

Следовательно объем ЖРО, извлекаемый из первого контура за всю кампанию, не зависит от вида функции $\rho_B(t)$, а определяется отношением начальной и конечной концентрацией бора в теплоносителе. Результат зависит как от конечной концентрации бора, так и от величины n . В расчетах было принято $n = 10$ и конечная концентрация при реактивности равной 1 %.

В том случае, когда происходит рост реактивности при выгорании гадолиния, необходимо не только компенсировать потери бора при отборе, но и добавить

концентрированный раствор борной кислоты ρ_B^k до нужного значения $\rho_B(t)$. В этом случае $\Delta\rho_B > 0$,

$$\delta\rho V_K = (\rho_B^k - \rho_B(t))dV(t). \quad (2.36)$$

Следовательно, получаем уравнение баланса:

$$d\rho_B = \frac{-\bar{\sigma}_B \rho_B(t)}{V_{H_2O}^{A3}} \int_{V_{H_2O}^{A3}} \frac{\varphi(\bar{r}, t)}{V_{H_2O}^{A3}} dV_{A3} \frac{dt}{n} + (\rho_B^k - \rho_B(t)) \frac{dV(t)}{V_K}. \quad (2.37)$$

Интегрируя по тому промежутку времени кампании, в котором происходит рост концентрации бора, определим относительный объем водообмена за этот промежуток времени:

$$\frac{V(T)}{V_K} = -\ln \frac{(\rho_B^k - \rho_B(T))}{(\rho_B^k - \rho_B(0))} - \bar{\sigma}_B \rho_B^k \int_0^T \frac{\varphi_0(t)}{(\rho_B^k - \rho_B(t))} \frac{dt}{n} + \bar{\sigma}_B \int_0^T \varphi_0(t) \frac{dt}{n}. \quad (2.38)$$

Если при достижении максимума реактивности в дальнейшем происходит спад реактивности, то на интервале времени спада реактивности вместо извлекаемой части бора вводится такой же объем дистиллята, поэтому должно выполняться равенство (2.34). Соответственно, объемы водообмена для этого промежутка времени рассчитываются по формуле (2.35). Тогда полный водообмен за кампанию для случая с большим числом твэгов (1:6) определяется как сумма выражений (2.35) и (2.38).

По представленным выше формулам рассчитаны значения водообмена для рассмотренных вариантов.

Будем считать, что изменение концентрации борной кислоты за кампанию пропорционально изменению реактивности:

$$\frac{\rho_B(t)}{\rho(t)} = \frac{\rho_B(0)}{\rho^{POLY}(0)}, \quad 0 < t < T, \quad (2.39)$$

где $\rho^{POLY}(0)$ – начальная нескомпенсированная реактивность полиячейки; $\rho_B(0)$ – начальная концентрация борной кислоты; $\rho(t)$ – изменение реактивности за кампанию.

Для определения коэффициента пропорциональности между реактивностью и критической концентрацией борного поглотителя для каждого варианта путем подбора находится начальная концентрация борной кислоты, с помощью которой

вычисляется коэффициент пропорциональности, который считается независящим от выгорания топлива. При этом, для вариантов с выбегом реактивности отдельно подбирается максимальная концентрация за кампанию. Если предположить, что этот коэффициент пропорциональности один и тот же для всех рассматриваемых вариантов, то отпадает необходимость определять начальные концентрации бора для всех вариантов. Проще всего вычислить этот коэффициент для варианта без поглотителя в твэлах. Вычислив начальную концентрацию бора в теплоносителе для варианта без поглотителя, можно получить зависимость $\rho_B(t)$ для всех рассматриваемых вариантов.

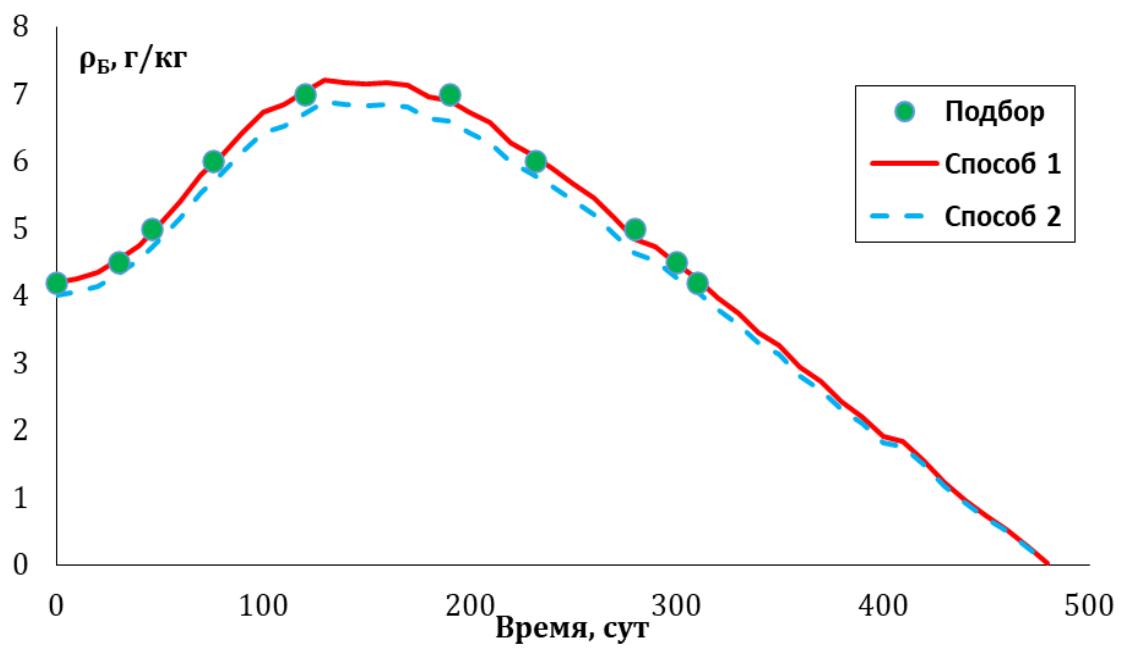


Рисунок 2.23 – Изменение $\rho_B(t)$ для варианта Gd 2 % при схеме расположения с большим числом твэлов (1:6)

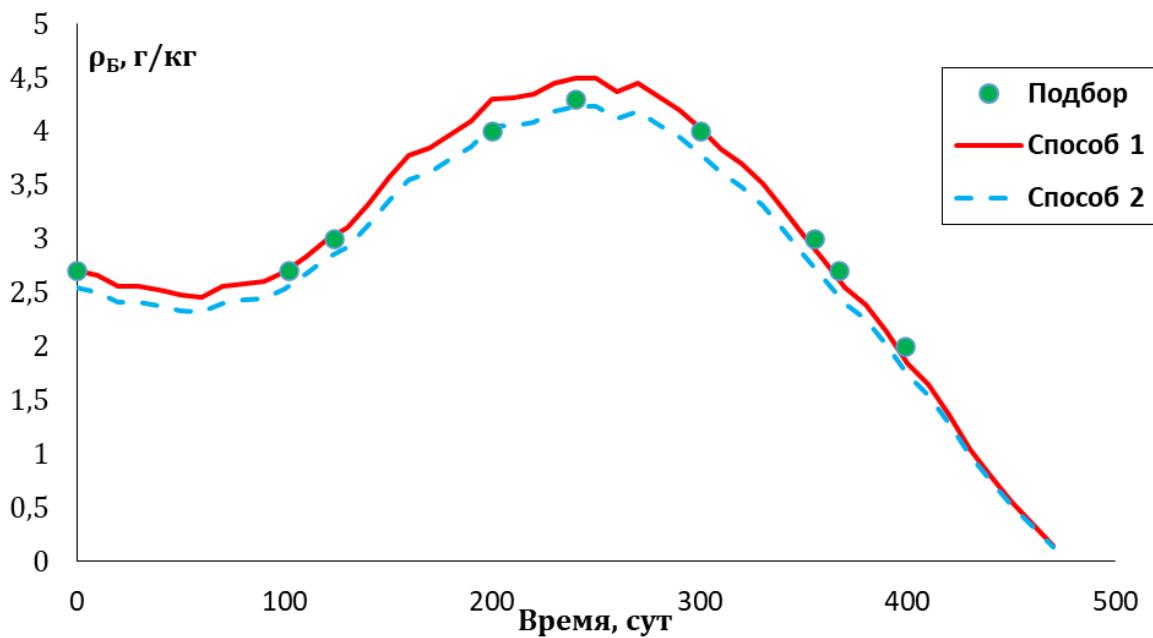
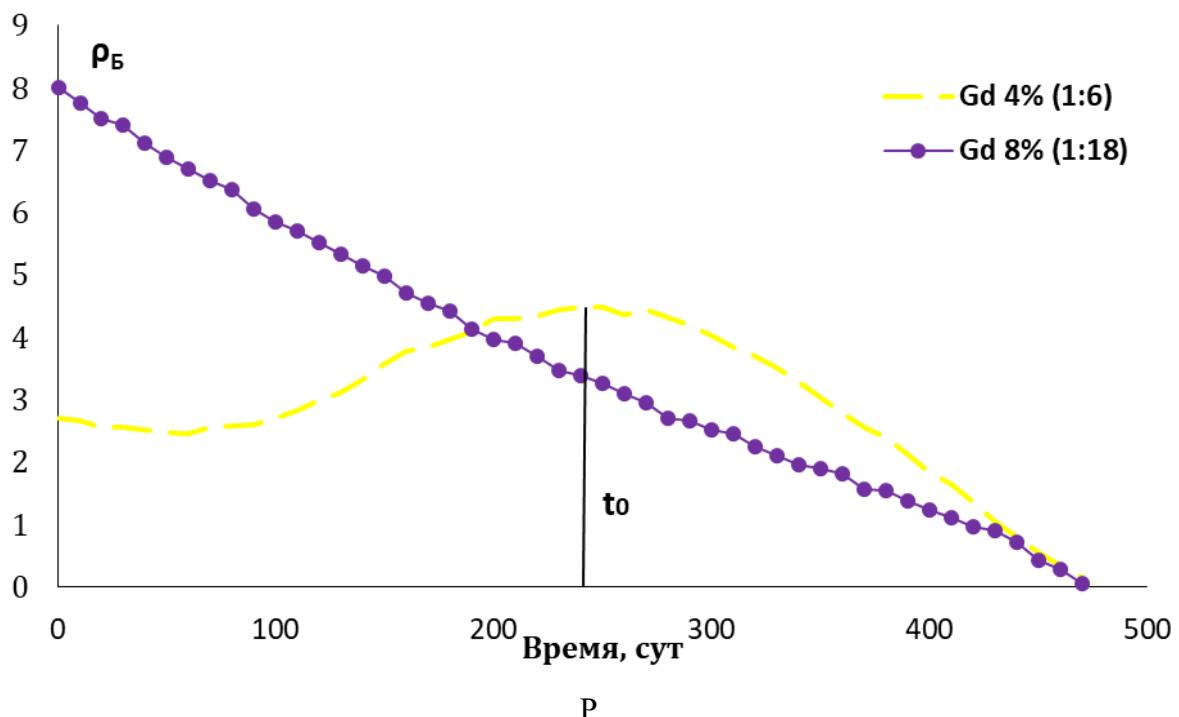


Рисунок 2.24 – Изменение $\rho_B(t)$ для варианта Gd 4 % при схеме расположения с большим числом твэгов (1:6)

На рисунках 2.23 и 2.24 показаны изменения концентраций борной кислоты, рассчитанных двумя способами для вариантов Gd 2 % и Gd 4 %. По представленным данным наблюдается хорошее совпадение концентраций борного поглотителя в теплоносителе как путем подбора, так и с помощью рассчитанного коэффициента пропорциональности. В дальнейшем расчет концентраций бора для всех исследуемых вариантов осуществлялся, используя выражение (2.39).

Зависимость $\rho_B(t)$ для варианта с числом твэгов 1:18 представляет изменения содержания борного поглотителя в теплоносителе при реальной схеме расположения твэгов в ТВС. В этом случае наблюдается линейный спад концентрации борной кислоты в теплоносителе от максимального значения, достигнутого в начале кампании (рисунок 2.25), до минимального значения. Для варианта с числом твэгов 1:6 максимум концентрации жидкостной системой достигается не в начале кампании, а примерно в середине (в момент времени t_0). Соответственно, в первой половине кампании необходимо добавлять концентрат, а во второй – извлекать бор и добавлять дистиллят. Для этого случая необходимо будет менять режим водообмена. Снижение максимального запаса реактивности за кампанию по мере повышения весового содержания гадолиния в твэге при схеме расположения 1:6, что представлено на рисунке 2.18, уменьшает максимальную

концентрацию борного поглотителя в теплоносителе за кампанию. Таким образом, можно снизить объем водообмена за кампанию реактора.



Найдены относительные сокращения объемов водообмена в вариантах с большим содержанием гадолиния с числом твэлов 1:6. Полученные значения взяты по отношению к варианту с числом твэлов 1:18 с концентрацией гадолиния 8 %. Полученные значения представлены на рисунке 2.26.

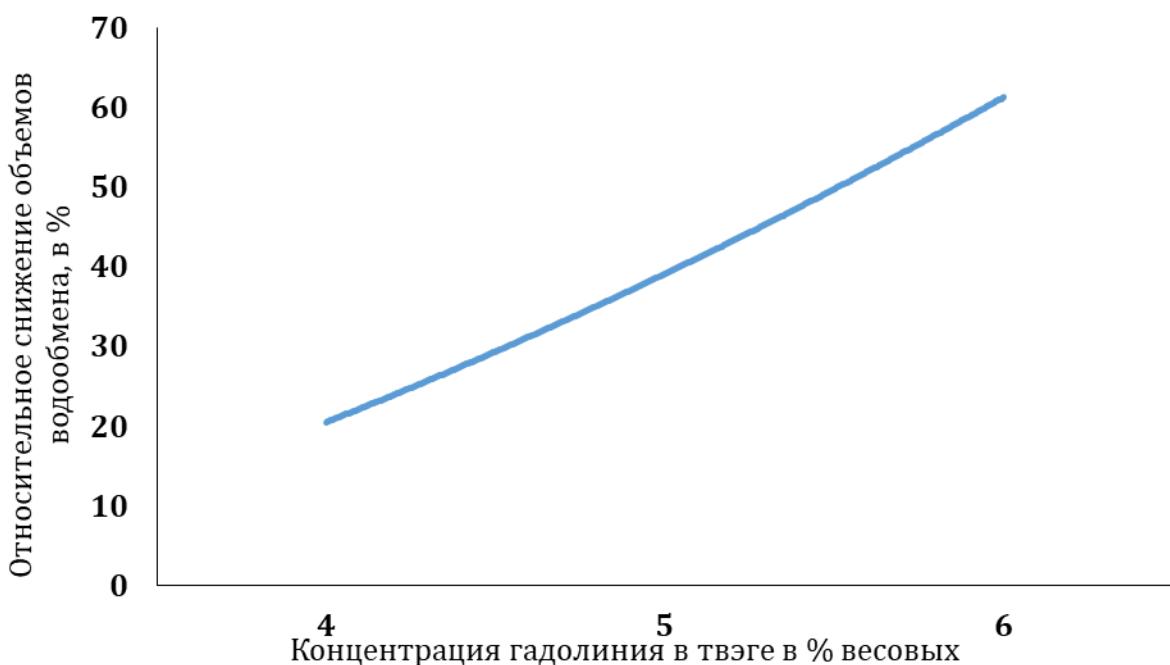


Рисунок 2.26 – Относительное снижение объемов водообмена для вариантов с большим числом твэлов (1:6)

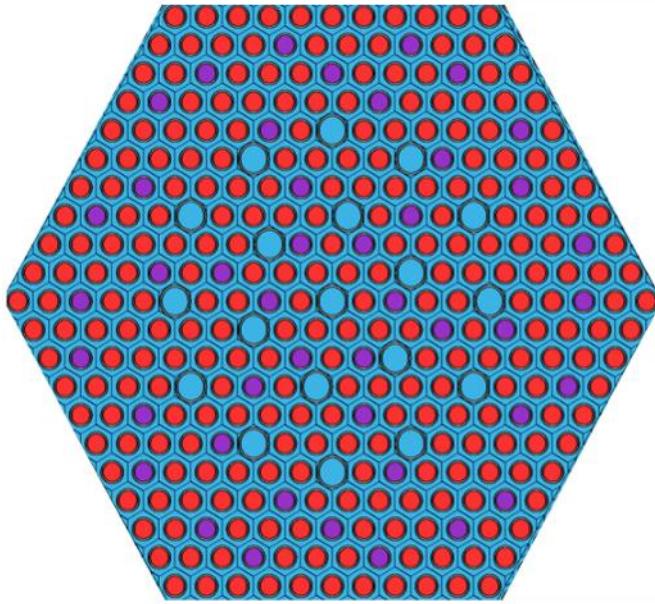
На рисунке 2.26 показано, что в вариантах с числом твэгов 1:6 при увеличении концентрации гадолиния в твэге от 4 до 6 % объемы водообмена снижаются от 20 до 60 %. При росте весового содержания поглотителя на 1 % весовых относительный спад объемов водообмена в среднем составил 20 %. Наибольшее снижение достигается для варианта 6 % Gd, так как в этом случае происходила максимальная компенсация избыточной реактивности гадолинием, и, как следствие, требуется меньшая концентрация борной кислоты. Полученные значения подтверждают эффективность применения стратегии увеличения числа твэгов и варьирования весового содержания поглотителя в них для снижения объемов водообмена. Выбранные схемы расположения твэгов не являются оптимальными, они были выбраны по причине симметричного расположения твэлов вокруг твэга и для удобства проведения расчетных исследований. Для определения оптимальной схемы расположения необходимо придерживаться предлагаемой стратегии увеличения числа твэгов и варьировать весовое содержания гадолиния в них. Кроме того, полученная теоретическая зависимость коэффициента размножения, позволяющая исключить жидкостную систему компенсации избыточной реактивности, может оказаться полезной для реакторов малой мощности, в которых система компенсации основана только на выгорающих поглотителях.

2.6. Влияние повышенного содержания гадолиния в ТВС с большим числом твэгов на эффективности органов регулирования и коэффициент неравномерности энерговыделения

В принципе увеличение числа твэгов с содержанием гадолиния в них на уровне 5–6 весовых процентов будет оказывать влияние как на эффективность органов оперативного управления реактором, так и на степень неравномерности энерговыделения в плане ТВС. Что касается влияния на эффективности органов управления, то, во-первых, органы регулирования, в основном, вводятся в ТВС после первой кампании, в которых уже отсутствует гадолиний, а, во-вторых, при неизменной топливной загрузке поглощение нейтронов на избыточном гадолинии будет таким же, как и на замещающем борном поглотителе. Поэтому можно

ожидать слабое влияние избыточного гадолиния на эффективность органов регулирования.

Более существенное влияние повышенное содержание твэлов будет оказывать на неравномерность распределение энерговыделения в ТВС.



P

и

Для оценки этих влияний для варианта с числом твэлов 1:6 была собрана модель ТВС с 44 твэгами (рисунок 2.27). Для собранной ТВС и полиячейки 1:6 были проведены расчеты значений $K_{\infty}^{POLY}(t)$ и $K_{\infty}^{TBC}(t)$, которые оказались в хорошем согласии. Соответственно, собранную ТВС можно использовать для нейтронно-физического моделирования для схемы расположения с большим числом твэлов (1:6). По собранным ТВС формируется равновесный режим трехкратных перегрузок топлива (см. рисунок 2.14). Далее состояние со значением $\max K_{\infty}^{TBC}(t)$ доводится до критичности ($K_{\text{эфф}} = 1$) путем добавления требуемой концентрации борной кислоты. Расчеты проводятся для вариантов с максимальными концентрациями гадолиния и без поглотителя. На следующем этапе в полиячейку из трех ТВС, доведенную до критичности, опускаются органы регулирования, и рассчитываются значения реактивности, используя выражение (2.27). Именно эта реактивность и принимается за эффективность органов регулирования. На рисунке 2.28 продемонстрировано изменение эффективности от времени для исследуемых вариантов. Увеличение весового содержания и числа

твэгов слегка снижает начальное значение эффективности по сравнению с вариантами без поглотителя и с числом твэгов 1:18. Максимальные значения реактивности для вариантов с числом твэгов 1:6 и 1:18 равны.

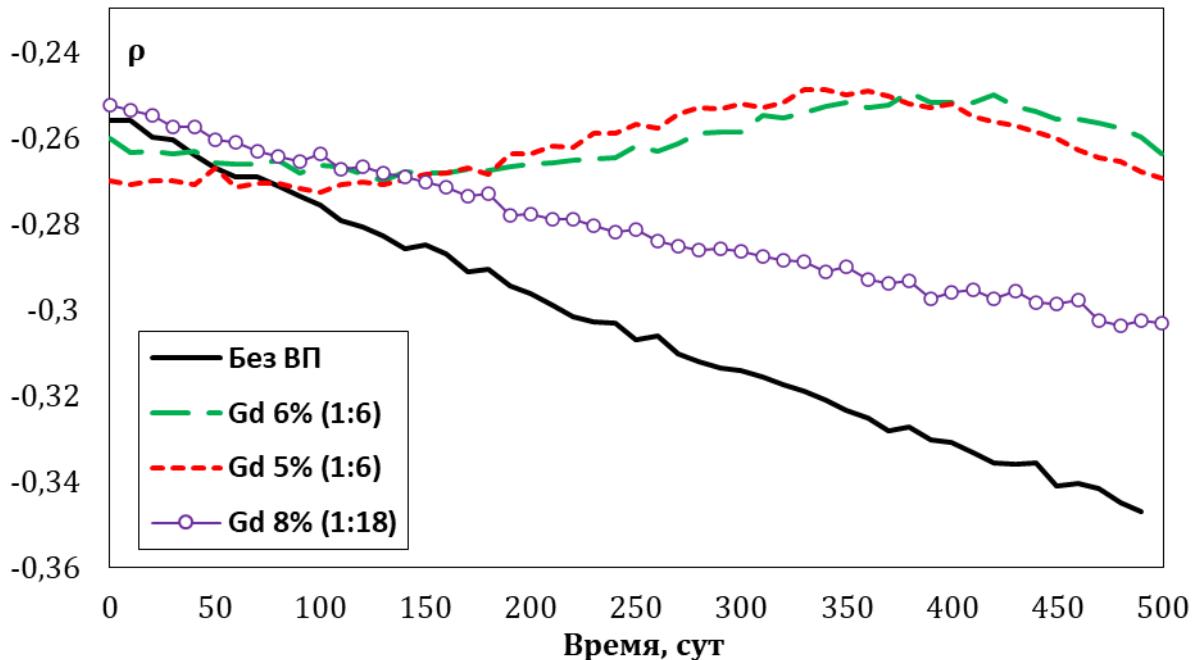


Рисунок 2.28 – Зависимости реактивности для вариантов с поглотителем и без

В расчетах обогащение твэга принималось за 4,9 %. Однако в реальных ТВС обогащение твэга снижается до 3,6 %. В связи с этим были проведены расчеты со сниженным обогащением в твэге для предлагаемой схемы расположения с максимальной концентрацией гадолиния. В этом случае применение схемы 1:6 с концентрацией гадолиния 6% приводит к снижению кампании по сравнению с реальной на 4%. Коэффициенты неравномерности при обогащении в твэгах 4,9 % и 3,6% не сильно отличаются. В варианте с обогащением в твэге 3,6 % к концу кампании реактора выгорает значительная часть ^{235}U в твэге по сравнению с окружающими твэлами и вариантом 4,9 %. Как указывалось ранее, основным недостатком предлагаемой стратегии увеличения числа твэгов является повышение коэффициента неравномерности распределения энерговыделения по ТВС. При этом увеличение концентрации поглотителя в твэге повышает данную неравномерность по сравнению с действующей схемой расположения, что представлено на рисунках 2.29 и 2.30. Максимальная неравномерность достигается

в начале, и по мере выгорания гадолиния неравномерность уменьшается и в дальнейшем пропадает.

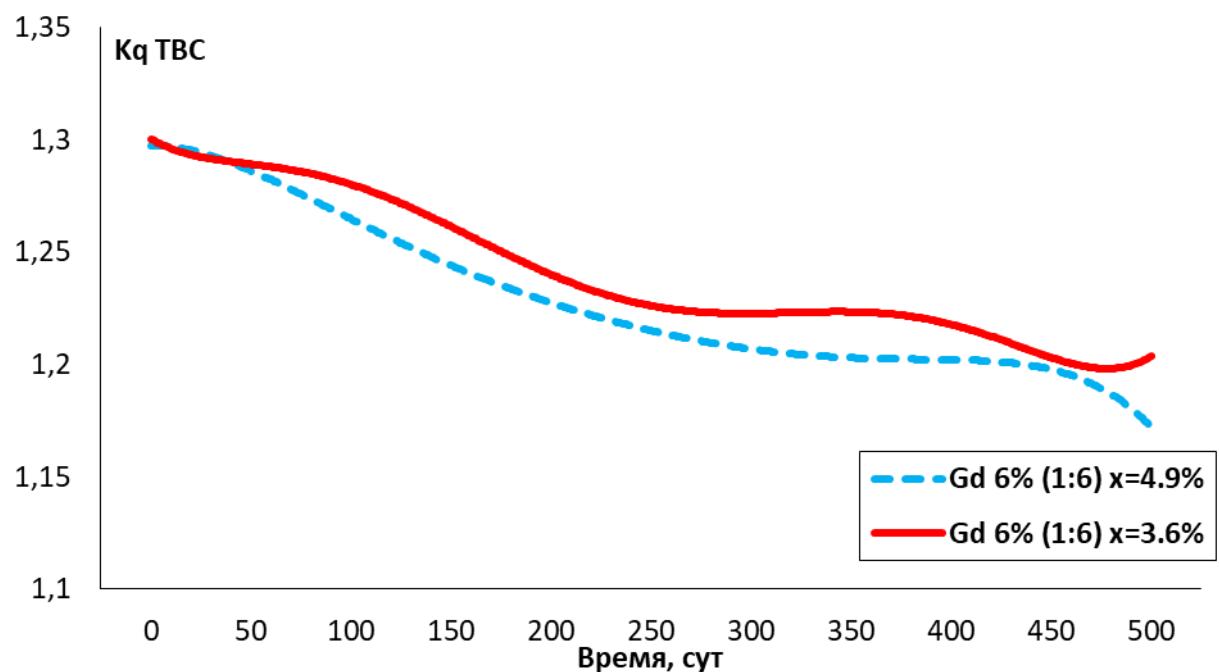


Рисунок 2.29 – Изменение коэффициента неравномерности ТВС за кампанию при схеме 1:6 с концентрацией гадолиния 6 %

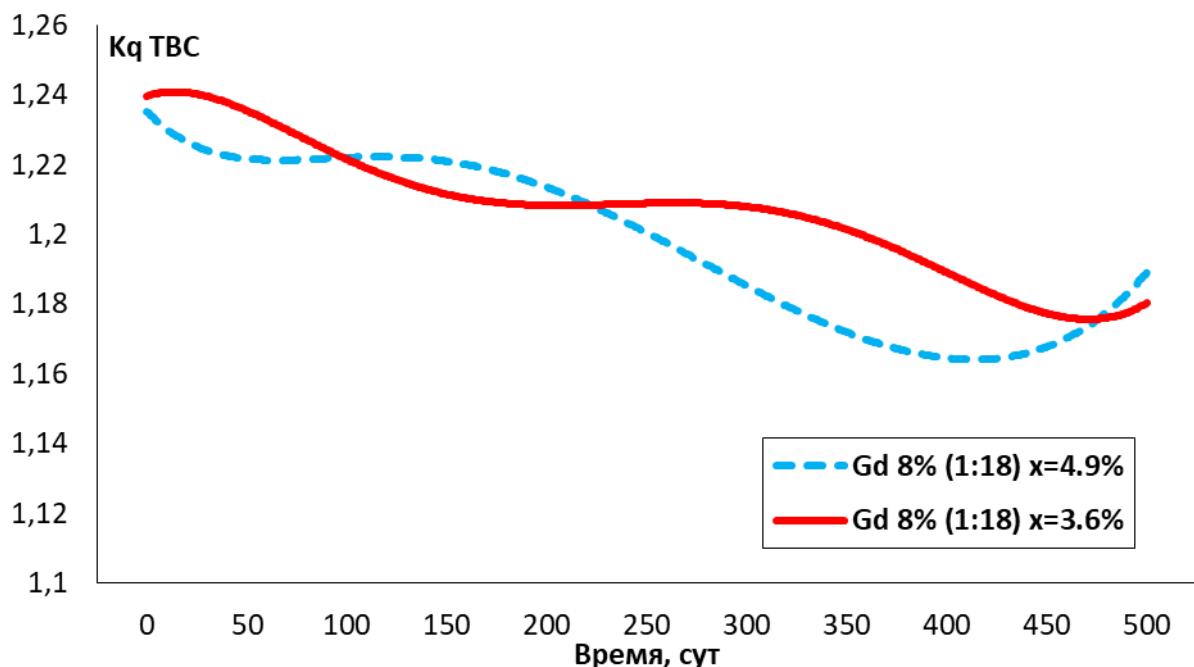


Рисунок 2.30 – Изменение коэффициента неравномерности ТВС за кампанию при схеме 1:18 с концентрацией гадолиния 8 %

2.7. Выводы ко второй главе

1. Теоретически показано и подтверждено расчетами, что для снижения водообмена в реакторах типа ВВЭР необходимо увеличивать число твэгов с высоким весовым содержанием гадолиния в твэгах.
2. Предложена методика расчета объемов водообмена при произвольной зависимости компенсируемого запаса реактивности в течение кампании реактора, включая и зависимость параболического типа.
3. На упрощенной модели трехкратной перегрузки топлива показано, что увеличение общего количества гадолиния в ТВС практически не приводит к снижению эффективности органов оперативного управления реактором.
4. Рост числа твэгов повышает степень неравномерности энерговыделения в ТВС, что потребует изменения картограммы перегрузок ТВС в реакторе.

ГЛАВА 3. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭРБИЯ В КАЧЕСТВЕ ВЫГОРАЮЩЕГО ПОГЛОТИТЕЛЯ В РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР

В предыдущей главе рассматривалось влияние количества твэлов и весовое содержание гадолиния в них на снижение доли запаса реактивности, компенсируемой системой жидкостного регулирования. Однако применение гадолиния вызывает неоднородность потока тепловых нейтронов за счет сильного поглощения нейтронов в твэге. Этот эффект проявляется в начале кампании, когда поглотитель имеет максимальную концентрацию. Данное обстоятельство приводит к повышению коэффициента неравномерности поля энерговыделения по ТВС, а, следовательно, и к повышению радиального коэффициента неравномерности по активной зоне по сравнению с гомогенным поглотителем (жидкостное регулирование). Снижение степени неравномерности энерговыделения при использовании перестановок ТВС в активной зоне в процессе перегрузки приводит к спаду выгорания выгружаемого топлива.

Для снижения неравномерности энерговыделения необходимо использовать «слабый» поглотитель с относительно небольшим сечением поглощения по сравнению с гадолинием. Среди таких поглотителей широко известен эрбий по своему использованию в реакторах РБМК-1000. Внедрение уран-эрбьевого топлива улучшило ядерную безопасность и экономику топливного цикла реактора РБМК. Природный эрбий имеет шесть изотопов, из которых только изотоп ^{167}Er проявляет свойство поглотителя в тепловой области $\sigma \sim 670 \text{ б}$. В процессе выгорания эрбий не образует долгоживущих изотопов, наибольший период полураспада 9,4 сут. имеет изотоп ^{169}Er . Эрбий можно размещать однородно во все твэлы. Данный способ размещения поглотителя не приводит к неравномерности поля энерговыделения. С производственной точки зрения, технология изготовления уран-эрбьевого топлива идентична технологии изготовления диоксида урана (UO_2) [128]. С экономической точки зрения, равная стоимость оксидов гадолиния (Gd_2O_3) и эрбия (Er_2O_3) делает эрбий конкурентоспособным с гадолинием [129]. К тому же данные соединения имеют близкие температуры

плавления. Большой интерес к эрбию появился после перехода зарубежных легководных реакторов на полутора- и двухгодичную топливные кампании [130, 131]. Для этой цели были проведены расчетно-экспериментальные работы, по результатам которых было заключено о целесообразности использования гадолиния при коротких, а эрбий при длительных кампаниях. Последнее увеличивает интерес к исследованию применения эрбия в реакторах типа ВВЭР при удлиненных кампаниях. Цель этого раздела – нейтронно-физическое обоснование применения эрбия в качестве выгорающего поглотителя для компенсации избыточной реактивности в реакторах типа ВВЭР-1000, ВВЭР-1200.

3.1. Нейтронно-физические характеристики эрбьевого выгорающего поглотителя

Как указывалось, небольшое сечение поглощения эрбия позволяет размещать его во всех твэлах, так что в этом случае образуется однородная загрузка твэлов в ТВС. Поскольку элементом периодичности в ТВС является элементарная ячейка, то и расчет выгорания топлива в ТВС будем осуществлять на уровне элементарной ячейки (рисунок 2.5), или в гексагональных полиячейках, заменив твэг на твэл с эрбием (рисунки 2.3 и 2.4). По нейтронно-физическим характеристикам гадолиний и эрбий сильно отличаются друг от друга. Если гадолиний успевает полностью выгореть за первую кампанию, то эрбий влияет на запас реактивности в течение всей топливной кампании. Небольшое весовое содержание эрбьевого поглотителя в составе диоксида урана не приводит к резкому ухудшению теплопроводности топливной таблетки. Концентрация эрбия в расчетах варьировалась в пределах от 0 до 1 % (весовых) с шагом 0,2 %. Графики зависимостей $K_{\infty}^{\text{ТВС}}(t)$ при весовых содержаниях эрбия менее 0,5 % носят линейный характер, и максимальное значение достигается в начале кампании. При этом, по мере повышения весового содержания эрбия, снижается начальное значение коэффициента размножения. Увеличение весового содержания эрбия выше 0,5 % в твэлах слегка искривляет форму графика $K_{\infty}^{\text{ТВС}}(t)$ за первую кампанию. В этом случае максимальное значение коэффициента размножения достигается уже к середине первой кампании. После второй кампании все значения коэффициентов размножения для

рассматриваемых вариантов с эрбием совпадают со значениями варианта без поглотителя. Причиной тому является выгорание преобладающей части изотопа эрбия ^{167}Er к концу второй кампании. Данный изотоп – эффективный поглотитель нейтронов в составе естественной смеси эрбия.

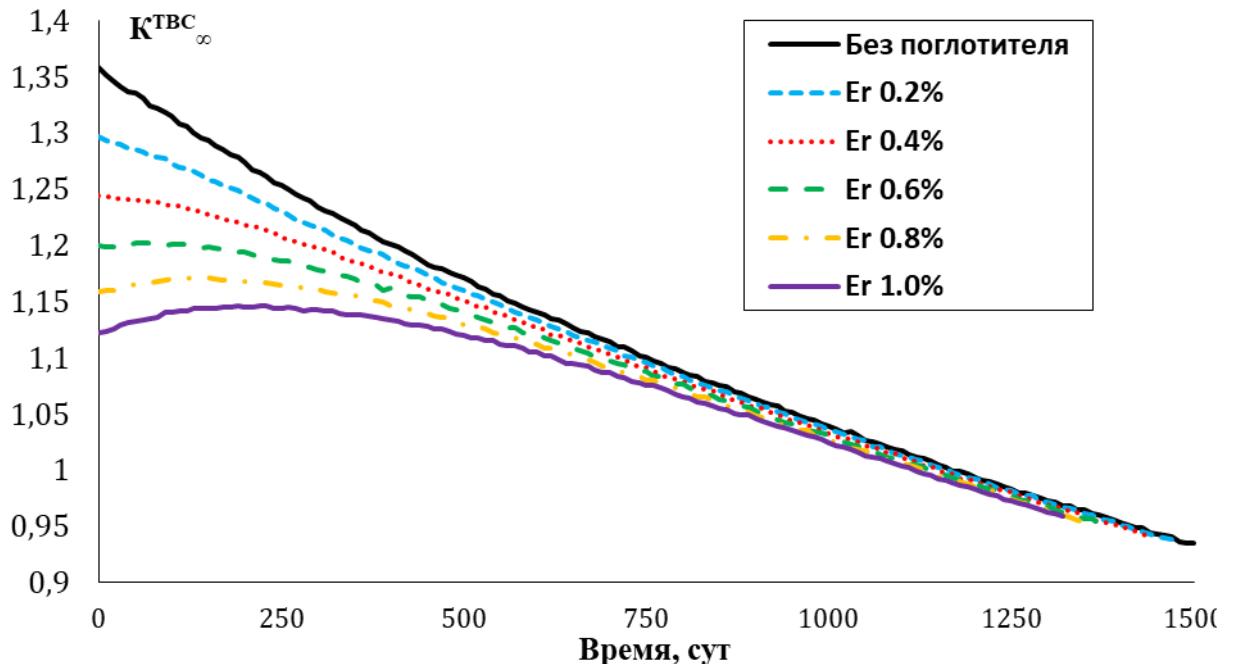


Рисунок 3.1 – Зависимости $K_{\infty}^{\text{ТВС}}(t)$ для вариантов с эрбием

График изменения концентрации ^{167}Er представляется экспоненциальной зависимостью, для которой ось абсцисс является асимптотой (рисунок 3.2). Скорость выгорания изотопа после второй кампании резко снижается. Остаточное содержание по окончании топливной кампании во всех представленных вариантах составляет $\sim 3\%$ от первоначальной концентрации. Таким образом, полностью он не выгорает. Причиной тому служит изотоп ^{166}Er , который является сырьевым для ^{167}Er . Изотоп ^{166}Er обладает наибольшим содержанием в составе природного эрбия, примерно 33,5 %. Поглощение нейтронов изотопом ^{166}Er приводит к замедлению выгорания ^{167}Er , поскольку происходит наработка последнего в результате радиационного захвата по каналу реакции (n, γ) . Выгорание ^{167}Er не образует изотопов с большим сечением, которые могут привести к паразитному поглощению в процессе работы реактора на мощности. В процессе выгорания ^{167}Er переходит в стабильный ^{168}Er с небольшим сечением (~ 10 б) в тепловой области.

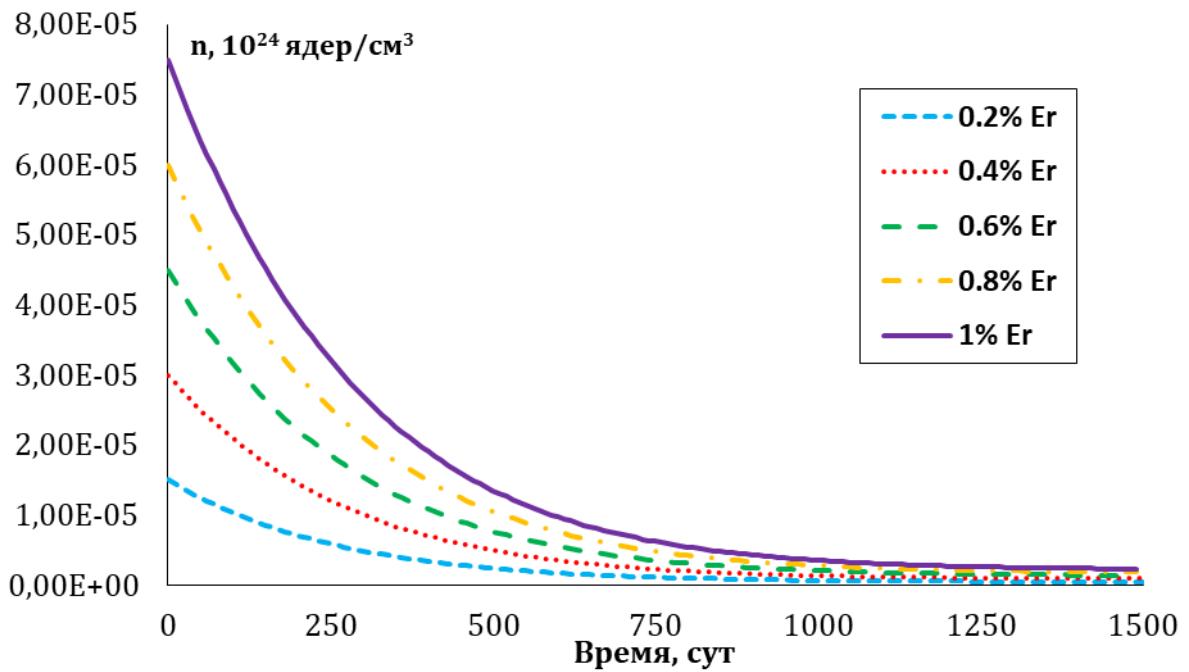


Рисунок 3.2 – Изменение концентрации изотопа ^{167}Er от времени

Для всех вариантов с эрбьевым поглотителем были рассчитаны длительности кампаний. Зависимость $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для всех вариантов представляется линейной зависимостью с максимальным значением в начале кампании (рисунок 3.3). Увеличение концентрации эрбия в твэлах заметно снижает максимальный запас реактивности за кампанию. Тем самым уменьшается значение максимальной концентрации борной кислоты и относительные объемы водообмена в системе жидкостного регулирования. Относительное снижение объемов водообмена прямо пропорционально концентрации эрбия в твэлах (рисунок 3.4). Значения, представленные на рисунке 3.4, взяты по отношению к варианту с числом твэлов 1:18 с концентрацией гадолиния 8 %. Максимальное снижение достигается для варианта с наибольшим содержанием эрбия (Er 1 %), так как в этом случае компенсируется наибольший запас реактивности. Однако выигрыш в водообмене сопровождается проигрышем в выгорании выгружаемого топлива, что показано на рисунке 3.5. Потери в выгорании для вариантов с эрбием, представленные на рисунке 3.5, взяты по отношению к варианту с максимальным весовым содержанием гадолиния 8 % при схеме 1:18. Для варианта с концентрацией эрбия 1% компенсируется почти 40 % начального избыточного запаса реактивности по сравнению с гадолиниевым вариантом. При этом потери в выгорании составили

примерно 10 %. Данное обстоятельство является отрицательной стороной применения эрбия. Таким образом, использование эрбия для целей снижения объемов водообмена является неэффективным, так как в этом случае потребуется большое весовое содержание эрбия, что приведет к большим потерям на выгорание.

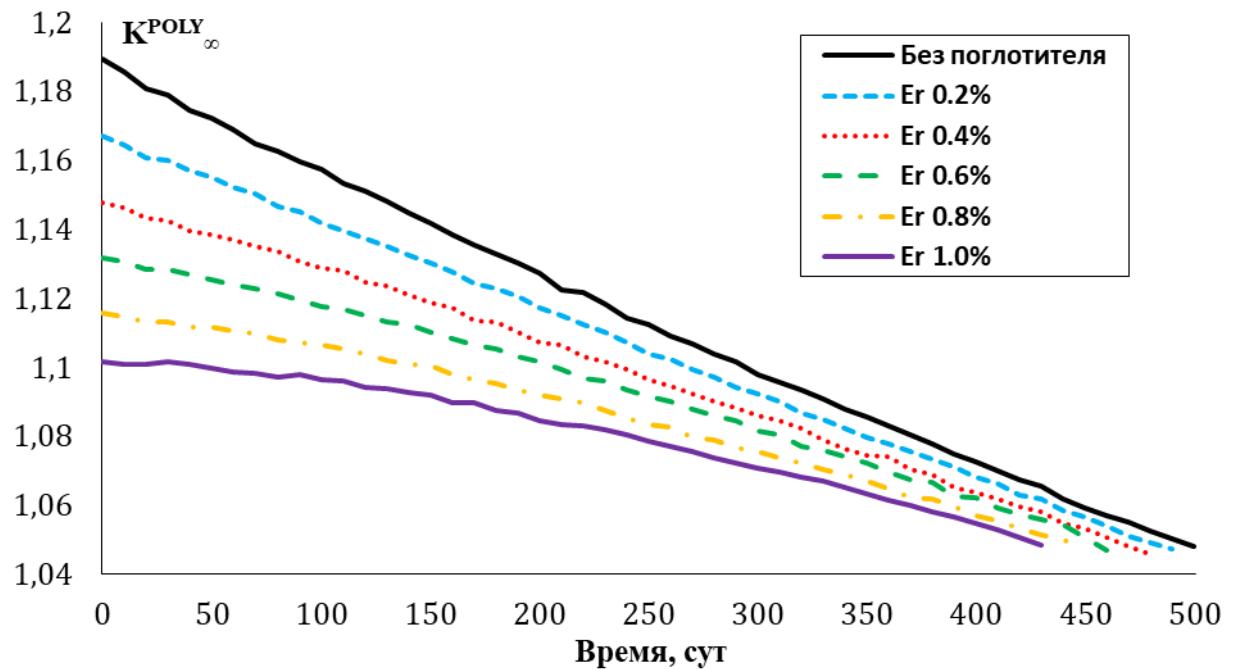


Рисунок 3.3 – Зависимости $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для вариантов с эрбием

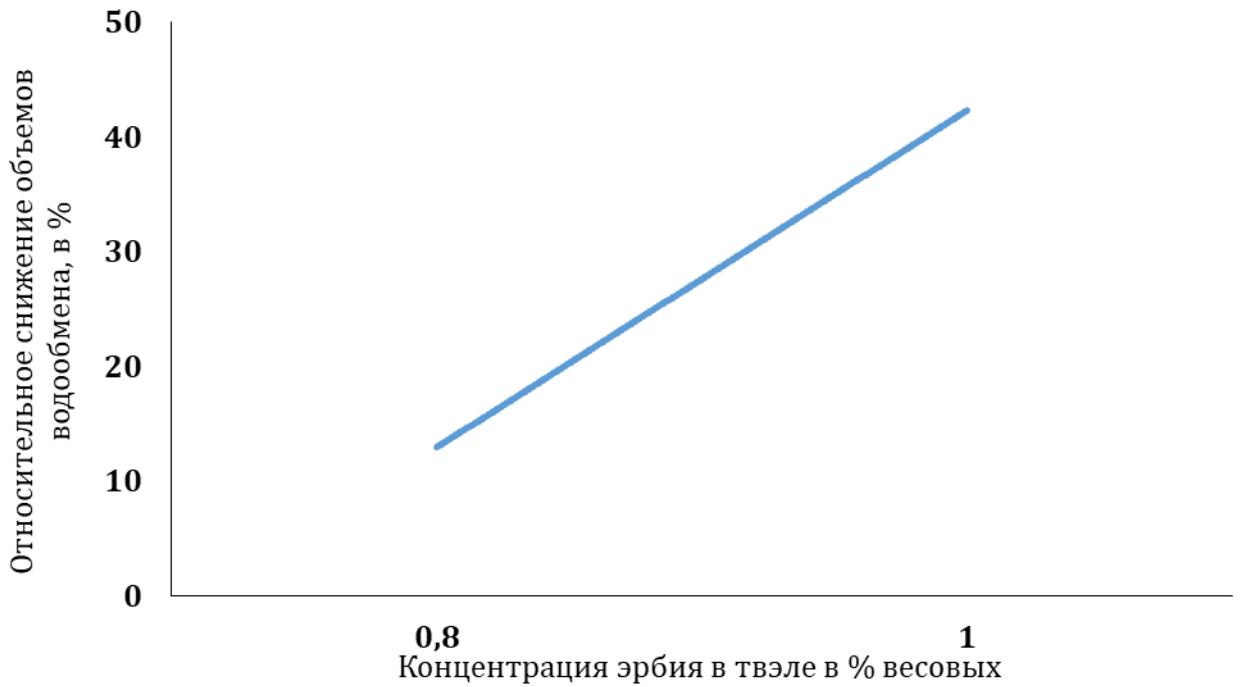


Рисунок 3.4 – Относительное снижение объемов водообмена для вариантов с эрбием

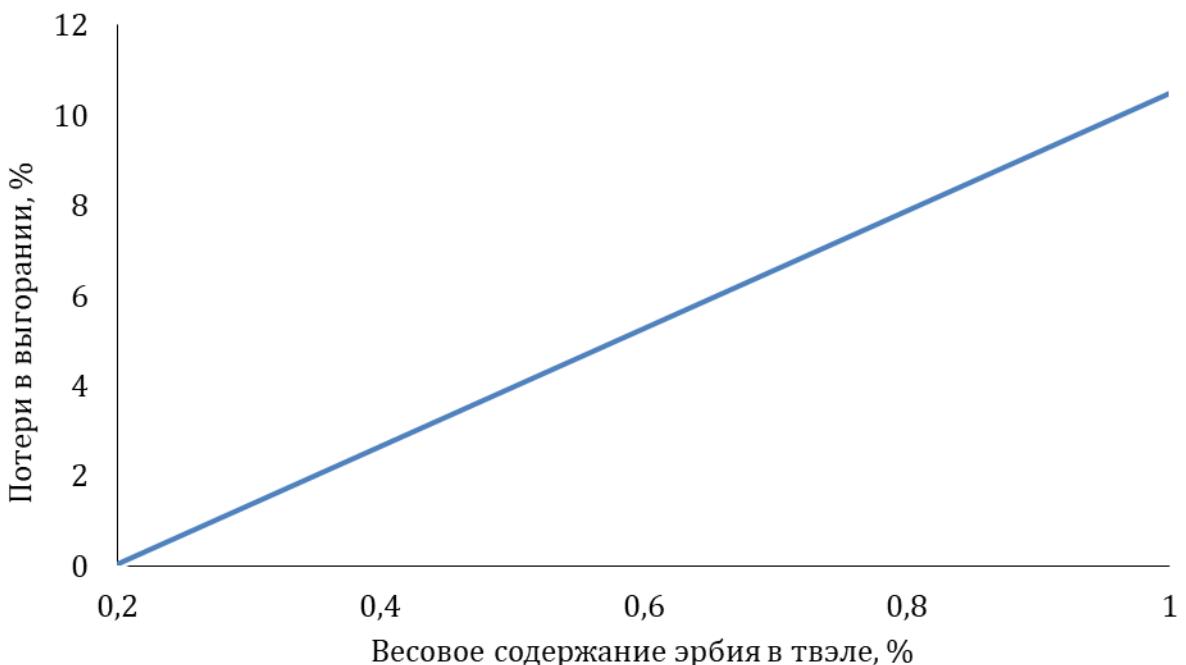


Рисунок 3.5 – Зависимость относительных потерь в выгорании от концентрации эрбия в твэлах

Снижение среднего значения выгорания выгружаемого топлива приводит к сокращению продолжительности топливной кампании. Тем самым в составе выгружаемого топлива остается невыгоревшим определенная доля ^{235}U . На рисунке 3.6 представлены относительные значения остаточного содержания ^{235}U в выгружаемых ТВС. Полученные значения взяты по отношению к варианту с весовым содержанием гадолиния 8 % при схеме расположения 1:18:

$$x = \left(\frac{(\rho_{25}(T))_{\text{Er}}}{(\rho_{25}(T))_{\text{Gd}}} - 1 \right) \cdot 100 \%, \quad (3.1)$$

где $(\rho_{25}(T))_{\text{Er}}$ – концентрация ^{235}U в конце топливной кампании для вариантов эрбия; $(\rho_{25}(T))_{\text{Gd}}$ – концентрация ^{235}U в конце топливной кампании для варианта с весовым содержанием гадолиния 8 % при схеме размещения 1:18. Увеличение весового содержания эрбия в твэлах повышает долю остаточного содержания ^{235}U в выгружаемых ТВС.

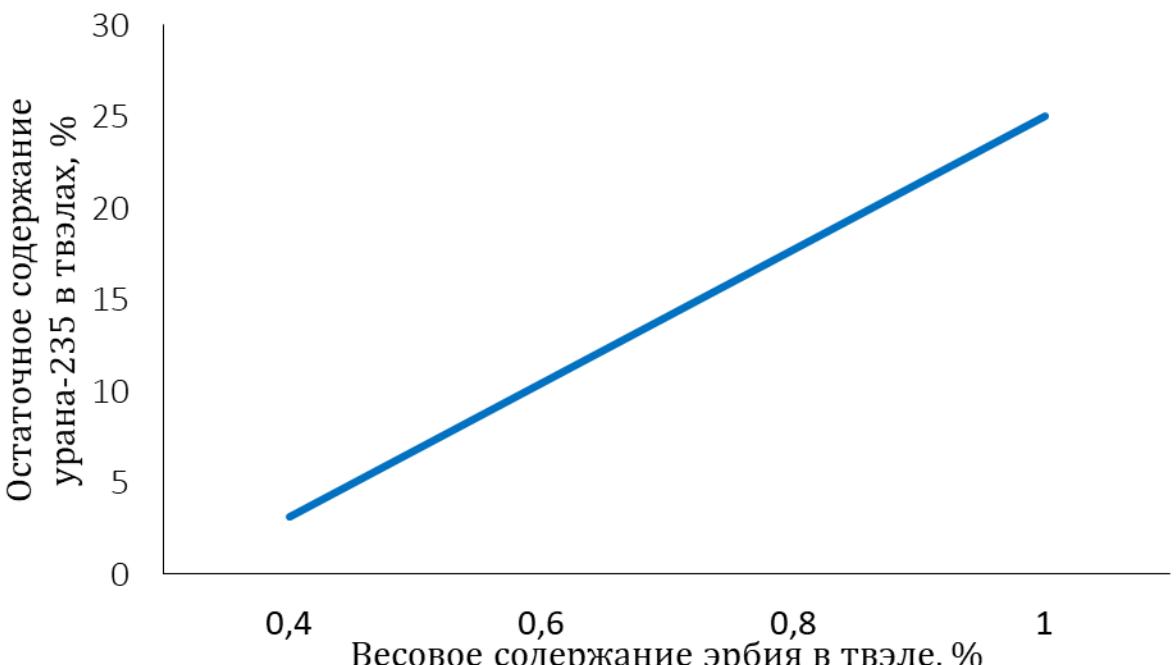


Рисунок 3.6 – Относительная доля остаточного содержания ^{235}U в выгружаемом топливе для различных вариантов с эрбием

Повторное возвращение невыгоревшего урана в топливный цикл путем формирования РЕМИКС-топлива может частично компенсировать потери в выгорании. В этом случае снизится расход природного урана для составления РЕМИКС-загрузки. Важно оценить эффект снижения расхода природного урана от данного процесса.

3.2. Постановка задачи и методика формирования концентраций РЕМИКС-топлива

Повышение концентрации эрбия в твэлах увеличивает компенсируемый запас реактивности. При этом часть эрбия не успевает сгореть за все время облучения в реакторе. Таким образом, снижается выгорание выгружаемого топлива, при этом в отработавшем топливе более высокое остаточное содержание делящегося изотопа ^{235}U , чем в топливе с гадолиниевым поглотителем. Поэтому при переработке отработавшего топлива и при дальнейшем его использования, как это делается в РЕМИКС-топливе, добавочное количество природного урана будет расходоваться меньше. Необходимо сохранить кампании с ОЯТ для каждого поглотителя, и оценить полный расход природного урана. При организации повторного использования невыгоревшая часть ^{235}U вместе с плутониевыми изотопами будет возвращена в цикл. Таким образом, при переходе на повторный

топливный цикл удельный расход природного урана для новой загрузки в случае с эрбьевым поглотителем будет меньше, по сравнению с гадолиниевым поглотителем. Задача формулируется следующим образом: оценить эффект снижения расхода природного урана при повторном использовании отработавшего уран-эрбьевого топлива в реакторе ВВЭР.

Для проверки этого эффекта рассматривается стандартная ТВС реактора ВВЭР с обогащением топлива подпитки 4,9 %. Рассматривается трехкратная перегрузка без перестановок ТВС. В качестве выгорающих поглотителей берется гадолиний и эрбий. Для гадолиния был выбран вариант, относящийся к реальному, т. е. гексагональная полиячейка с числом твэлов 1:18 и весовым содержанием гадолиния 8 %. В случае с эрбием был выбран вариант с максимальной концентрацией, а именно Er 1%. В начале проводится расчет варианта с гадолинием и определяется запас реактивности, который будет скомпенсирован жидкостной системой. При выбранной схеме расположения гадолиния (1:18) график изменения $K_{\infty}^{POLY}(t)$ будет представляться линейной зависимостью с максимумом в начале кампании. Далее проводится аналогичный расчет для эрбьевого варианта. Поскольку при одинаковом обогащении удельный расход природного урана пропорционален длительности кампании, то отношение этих величин равно отношению длительности кампаний.

На следующем этапе из отработавшей ТВС выделяются изотопы урана и плутония, добавляя уран 20 % обогащения в регенерат, и формируются новые загрузки на основе РЕМИКС-топлива для каждого варианта. При этом важно сохранение длительности кампании, полученной для урановых вариантов. Добавление урана 20 % обогащения в РЕМИКС-топливо аргументируется соблюдением требований МАГАТЭ, согласно которым концентрация в 20 % по ^{235}U является границей между низко- и высокообогащенным ураном [132].

Для формирования состава РЕМИКС-топлива берется некоторая доля регенерированного топлива ϵ и добавляется такое количество урана 20 % обогащения, чтобы выгорание для этого топлива было аналогичным урановому

топливу для обоих вариантов. При создании РЕМИКС-топлива были поставлены два условия.

1. Количество тяжелых ядер в единице объема твэла должно оставаться неизменным (более точно, массы топлива должны сохраняться).
2. Необходимо сохранить длительности кампаний для рассматриваемых вариантов, как и на первом этапе.

Введем следующие нижеприведенные обозначения.

Общая концентрация урановых изотопов в свежем топливе:

$$\rho(0) = \rho_{25}(0) + \rho_{28}(0). \quad (3.2)$$

Суммарная концентрация урановых и плутониевых изотопов в ОТВС:

$$\rho(T) = \rho_{25}(T) + \rho_{28}(T) + \rho_{26}(T) + \rho_{49}(T) + \rho_{40}(T) + \rho_{41}(T) + \rho_{42}(T). \quad (3.3)$$

Суммарная концентрация делящихся изотопов в ОТВС:

$$\rho_f(T) = \rho_{25}(T) + \rho_{49}(T) + \rho_{41}(T). \quad (3.4)$$

Запишем балансовые соотношения для количества тяжелых ядер:

$$\rho(0) = \varepsilon\rho(T) + \rho_{25}(20\%) + \rho_{28}(20\%). \quad (3.5)$$

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

$$X = \frac{A_{25}\rho_{25}(20\%)}{A_{25}\rho_{25}(20\%) + A_{28}\rho_{28}(20\%)}. \quad (3.6)$$

Из соотношения (3.5) выразим $\rho_{28}(20\%)$ и получим выражение:

$$\rho_{28}(20\%) = \frac{A_{25}}{A_{28}} \left(\frac{1-X}{X} \right) \rho_{25}(20\%) = K_X \rho_{25}(20\%). \quad (3.7)$$

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

$$\rho_{25}(0) = \varepsilon\rho_f(T) + \rho_{25}(20\%). \quad (3.8)$$

Из уравнения баланса делящихся изотопов получим:

$$\rho_{25}(20\%) = \rho_{25}(0) - \varepsilon\rho_f(T). \quad (3.9)$$

Найдем общую концентрацию топлива подпитки урана 20%-го обогащения:

$$\rho_{25}(20\%) + \rho_{28}(20\%) = (1 + K_X) \left(\rho_{25}(0) - \varepsilon\rho_f(T) \right). \quad (3.10)$$

Подставим общую концентрацию топлива подпитки в первое уравнение баланса (3.5), и из полученного выражения:

$$\rho(0) = \varepsilon\rho(T) + (1 + K_X)\left(\rho_{25}(0) - \varepsilon\rho_f(T)\right), \quad (3.11)$$

найдем долю регенерата в смеси:

$$\varepsilon = \frac{(\rho(0) - (1 + K_X)\rho_{25}(0))}{(\rho(T) - (1 + K_X)\rho_f(T))}. \quad (3.12)$$

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

$$\rho_{28} = \varepsilon\rho_{28}(T) + \rho_{28}(20\%), \quad (3.13)$$

$$\rho_{25} = \varepsilon\rho_{25}(T) + \rho_{25}(20\%), \quad (3.14)$$

$$\rho_i = \varepsilon\rho_i(T). \quad (3.15)$$

Если не выполняется условие сохранения кампаний, достигнутое на урановом топливе, доля регенерата в составе РЕМИКС-топлива ε подбирается путем изменения в пределах $\pm 5\%$ для достижения заданных значений кампаний.

Получив удельные расходы урана от продолжительности кампании для вариантов с гадолинием и эрбием для урановой загрузки

$$G_{Er} = \frac{M_{Er}}{T_{Er}}, \quad G_{Gd} = \frac{M_{Gd}}{T_{Gd}}, \quad (3.16)$$

определен относительный расход по выражению:

$$n = \frac{G_{Er}}{G_{Gd}}. \quad (3.17)$$

Для РЕМИКС-топлива удельный расход природного урана определяется по величине загрузки добавляемого урана 20%-го обогащения:

$$n(20\%) = n(x) \frac{(\rho_{25}(20\%))_{Er}}{(\rho_{25}(20\%))_{Gd}}, \quad (3.18)$$

где G_{Er}, G_{Gd} – удельный расход природного урана для варианта с эрбием и гадолинием, соответственно; M_{Er}, M_{Gd} – масса природного урана, используемая для создания топливных загрузок для варианта с эрбием и гадолинием, соответственно; T_{Er}, T_{Gd} – продолжительность кампании для варианта с эрбием и гадолинием, соответственно; n – относительный расход природного урана; $n(x)$ – отношение

длительности кампании для варианта с гадолинием к кампании для варианта с эрбием.

3.2.1. Расчетный анализ вариантов с использованием РЕМИКС-топлива

Неполное сгорание эрбия за все время пребывания в реакторе отирает часть полного запаса реактивности за кампанию. Однако его остаточное количество снижает выгорание выгружаемого топлива. При этом чем больше весовое содержание эрбия в твэлах, тем больше потери на выгорание. В расчетах для эрбия берется максимальное весовое содержание в твэлах – 1 %. Для гадолиния при схеме размещения твэлов 1:18 принимается концентрация поглотителя 8 %. Для выбранных вариантов проводятся расчеты изменения коэффициента размножения за кампанию. Ниже на рисунке 3.7 представлены графики зависимости $K_{\infty}^{POLY}(t)$.

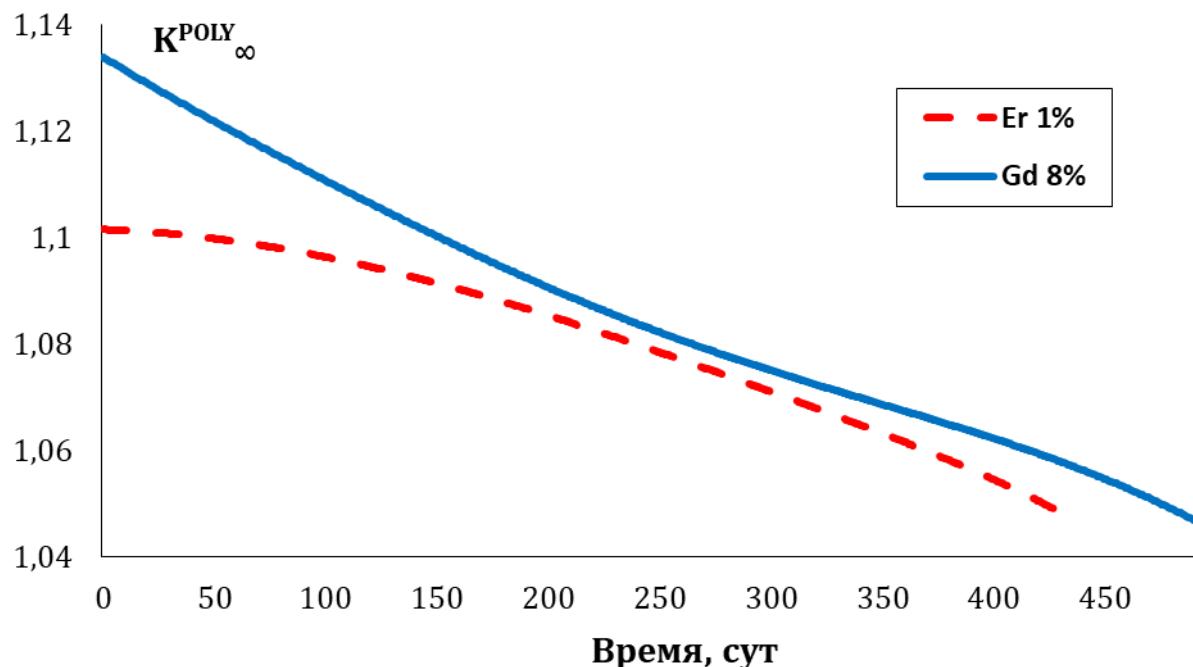


Рисунок 3.7 – Зависимости $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для уранового топлива с гадолиниевым и эрбьевым выгорающим поглотителем

Продолжительность кампании реактора для варианта с эрбьевым поглотителем составила 430 сут., а для гадолиниевого поглотителя 490 сут. Соответственно продолжительности топливных кампаний для этих вариантов составили 1290 и 1470 сут. В таблице 3.1 представлены относительные содержания основных делящихся изотопов в ОТВС выгружаемой из АЗ по истечению топливной кампании для вариантов с гадолиниевым и эрбьевым выгорающим

поглотителем. Представленные значения взяты по отношению к концентрациям для варианта без поглотителя.

Таблица 3.1. Относительные содержания делящихся изотопов в выгружаемой ОТВС

Название топлива	^{235}U	$(^{239}\text{Pu}) + (^{241}\text{Pu})$
Топливо с Er	1,347	0,975
Топливо с Gd	1,072	1,003

Проигрыш в выгорании в варианте с эрбием увеличивает недовыжигание ^{235}U на 27,5 %, по сравнению с гадолиниевым поглотителем. При этом за счет более длительной кампании в ОТВС с уран-гадолиниевым топливом больше содержание плутониевых изотопов. Таким образом, вклад плутониевых изотопов на энерговыделение в случае с уран-гадолиниевым топливом больше.

Таблица 3.2. Относительные расходы природного урана

Название топлива	Свежая загрузка		РЕМИКС-загрузка	
	Кампания (T), сут	Отношение расходов урана	Кампания (T), сут	Отношение расходов урана
Топливо с Er	430	1,13	430	1,03
Топливо с Gd	490		490	

При сравнении относительных расходов природного урана (таблица 3.2), в первом случае с урановым топливом у варианта с эрбиеевым поглотителем расход больше. Но, как и предполагалось, в случае с РЕМИКС-топливом относительный расход урана для эрбьевого варианта уменьшился, снижение составило примерно 10 % по сравнению с урановой загрузкой. Однако по-прежнему расход природного урана в случае с эрбием остается больше по сравнению с гадолинием. Это связано с большим вкладом в энерговыработку плутониевых изотопов в случае с гадолинием, поскольку длительность кампании реактора с гадолинием больше. Необходимо отметить, что стоимость изготовления РЕМИКС-топлива существенно выше, чем на основе низкообогащенного урана.

3.3. Методика выбора оптимального весового содержания эрбия при замене выгорающего поглотителя гадолиния

Проведенный расчетный анализ эффективности использования эрбия для снижения водообмена в действующих реакторах ВВЭР-1000 показал, что при этом уменьшается выгорание выгружаемого топлива и повышается удельный расход природного урана. Повторное использование выгоревшего топлива снижает потери в расходе природного урана, но при этом существенно возрастает стоимость изготовления РЕМИКС-топлива. Поэтому рассмотрим возможность замены гадолиния на эрбий в действующих реакторах типа ВВЭР при удлиненных кампаниях.

Прежде всего, необходимо определить весовую загрузку эрбия в твэлы, при которой обеспечивается компенсация того же самого запаса реактивности, который реализуется при использовании гадолиния. При размещении эрбия во всех твэлах с одинаковым весовым содержанием в ТВС образуется решетка твэлов, так что спектр нейтронов в ТВС будет таким же, как и в отдельной элементарной ячейке.

Для оценки зависимости компенсируемой эрбием реактивности от весового содержания эрбия в твэлах рассмотрим элементарную замкнутую ячейку реактора типа ВВЭР-1000. Размещая в твэлах определенное весовое содержание эрбия, подбираем обогащение уранового топлива, при котором ячейка будет критичной, т. е. $K_{\infty} = 1$. Если удалить из твэлов эрбий, то разность $\Delta = K_{\infty} - 1$ есть тот запас реактивности, который компенсируется данным содержанием эрбия. На рисунке 3.8 представлена искомая зависимость.

Для определения величины компенсируемой реактивности гадолинием, размещенным в твэгах в соотношении с твэлами 1:18, поступим следующим образом. Рассматривается полиячейка 1:18, в которой начальный запас реактивности компенсируется гадолинием, содержание которого в твэгах принято равным 8 % весовых. Извлекая гадолиний из твэгов, получаем запас реактивности при использовании гадолиния. Эта величина оказалось равной $\Delta\rho = 0,18$. Таким образом, для замены максимального весового содержания гадолиния при схеме размещения твэгов 1:18 и, исходя из равного компенсируемого запаса

реактивности, требуемое весовое содержание эрбия в твэлах должно быть в интервале от 0,7% до 0,8 %. При таком весовом содержании потеря в выгорании за счет неполного выгорания эрбия составит примерно 6 %.

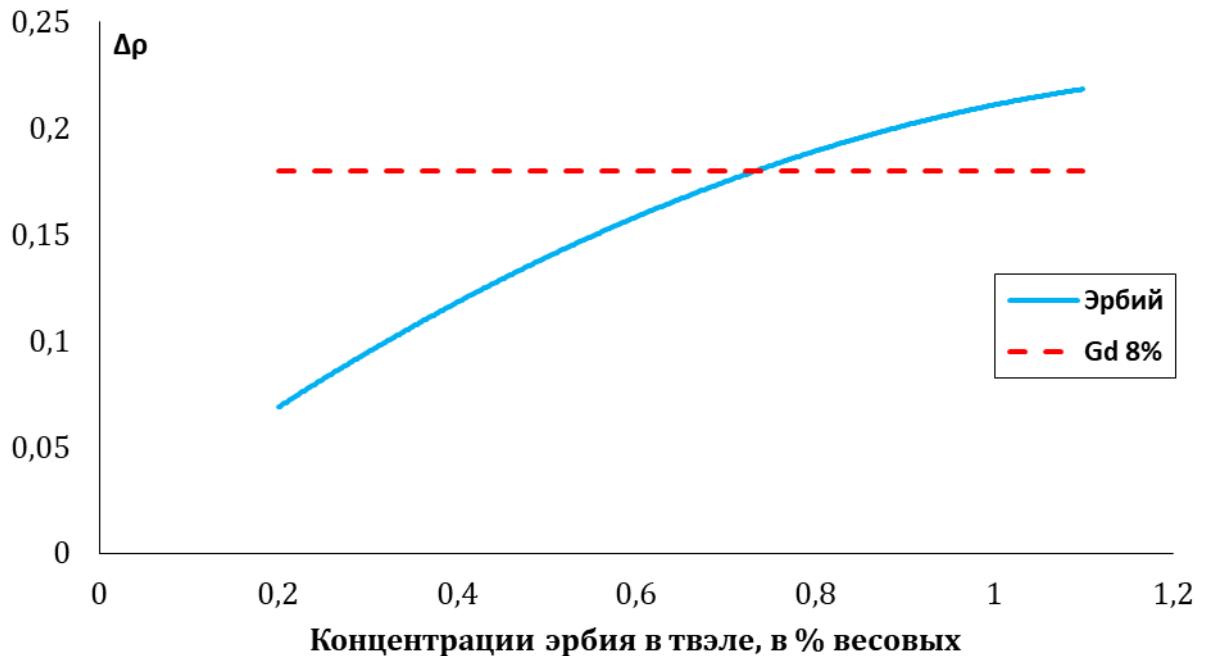


Рисунок 3.8 – Зависимость максимального компенсируемого запаса реактивности от весового содержания эрбия в твэле

Но в реакторе избыточная реактивность компенсируется не только выгорающим поглотителем, но и с помощью борного поглотителя, растворенного в теплоносителе. Поэтому необходимо оценить влияние борного поглотителя на компенсируемый запас реактивности эрбием. Для этого в элементарную ячейку наряду с эрбием будем добавлять заданную концентрацию борного поглотителя в водяной замедлитель. Поступая аналогичным образом, т. е. подбирая обогащение топлива, при котором достигается критичность элементарной ячейки, будем удалять эрбий из твэлов, и по разности коэффициентов размножения определим, какая часть общего запаса реактивности компенсируется эрбием. Результаты расчетов показывают, что наличие борного поглотителя не оказывает заметного влияния на компенсируемый запас реактивности эрбием (рисунок 3.9).

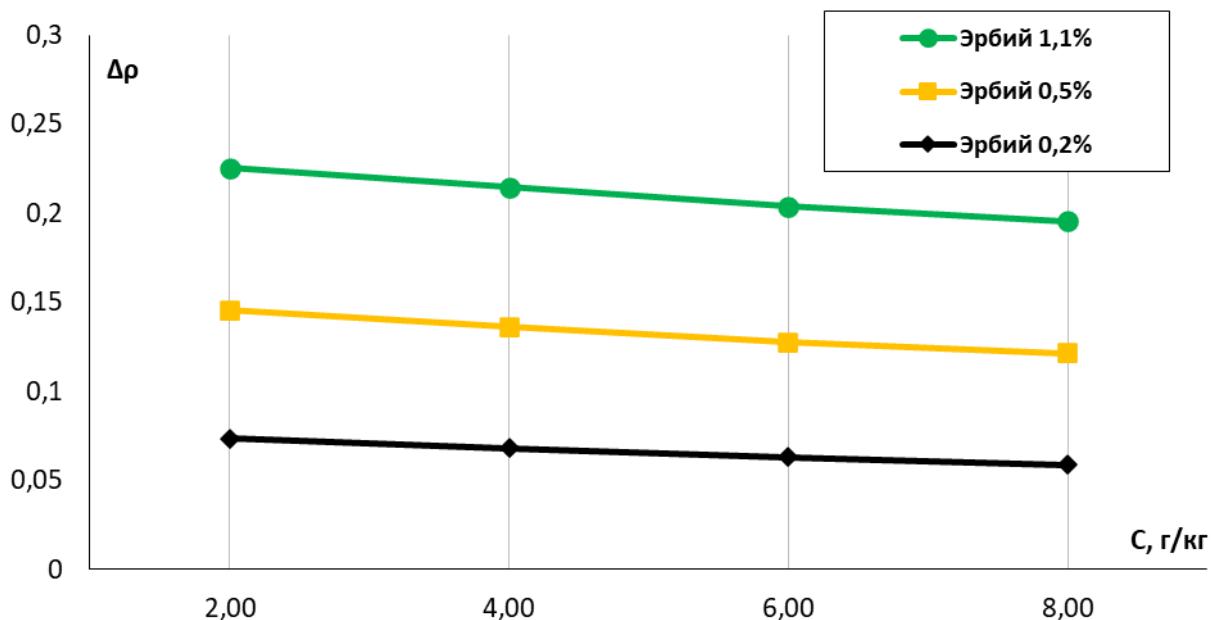


Рисунок 3.9 – Изменение реактивности, компенсируемой эрбием в зависимости от концентрации борной кислоты

3.3.1. Расчет коэффициентов реактивности

для элементарной ячейки и полиячейки

Для полной ясности применения определенного типа поглотителя при удлиненных топливных кампаниях в ректорах типа ВВЭР необходимо сравнить параметры внутренне присущих свойств безопасности, а именно плотностной и полный температурный коэффициенты реактивности по температуре теплоносителя. При этом нужно учитывать влияние содержания борного поглотителя в теплоносителе на указанные коэффициенты реактивности.

В расчетах в качестве реперных приняты значения коэффициентов реактивности, полученные для замкнутой элементарной уран-водной ячейки, моделирующей конец топливной кампании. Так как в конце топливной кампании в выгружаемых ТВС отсутствует поглотитель, а теплоноситель не содержит борной кислоты, то пропадает влияние системы компенсации на значения коэффициентов реактивности.

Для замкнутой ячейки роль $K_{\text{ЭФ}}$ играет K_{∞} . Расчет коэффициентов реактивности осуществляется на критической ячейке, для чего вначале подбирается обогащение топлива для достижения критичности бесконечной

решетки из элементарных ячеек. Для найденного обогащения рассчитываются плотностной коэффициент реактивности:

$$\frac{\delta\rho}{\delta\gamma} = \frac{\Delta\rho}{\Delta\gamma} = \frac{1}{\Delta\gamma} \cdot \frac{(K_\infty(\gamma \pm \Delta\gamma) - 1)}{K_\infty(\gamma \pm \Delta\gamma)}, \quad (3.19)$$

спектральная составляющая полного температурного коэффициента реактивности и полный температурный коэффициент реактивности:

$$\frac{\delta\rho}{\delta T} = \frac{\Delta\rho}{\Delta T} = \frac{1}{\Delta T} \cdot \frac{(K_\infty(T \pm \Delta T) - 1)}{K_\infty(T \pm \Delta T)}, \quad (3.20)$$

$$\frac{d\rho}{dT} = \frac{\delta\rho}{\delta T} + \frac{\delta\rho}{\delta\gamma} \cdot \frac{\delta\gamma}{\delta T}, \quad (3.21)$$

$$K_\infty = \varphi \cdot \theta \cdot \mu \cdot \eta, \quad (3.22)$$

где $\delta\rho/\delta\gamma$ – плотностной коэффициент реактивности; $\delta\rho/\delta T$ – коэффициент реактивности по температуре теплоносителя; $d\rho/dT$ – полный температурный коэффициент реактивности; $\delta\gamma/\delta T$ – теплофизический параметр; $\Delta\rho$ – приращение реактивности; $\Delta\gamma$ – приращение плотности теплоносителя; ΔT – приращение температуры теплоносителя.

Исходя из формулы четырех сомножителей, для коэффициента размножения элементарной ячейки можно ожидать, что на плотностной коэффициент реактивности наибольшее влияние оказывают величины φ и θ . При увеличении плотности теплоносителя φ повышается, а при уменьшении плотности – снижается, т. е. этот фактор действует как положительная обратная связь. Значение θ при росте плотности спадает, а при снижении плотности увеличивается, так что θ оказывает влияние как отрицательная обратная связь.

Присутствие выгорающих поглотителей в составе топлива оказывает наибольшее влияние на величину θ . Наличие гадолиния вызывает неоднородность потока тепловых нейтронов за счет сильного поглощения нейтронов в твэге. В результате происходит блокирование поглощения тепловых нейтронов в топливе, а также уменьшение потока в твэге и ближнем ряду твэлов. Таким образом, увеличение весового содержания гадолиния в твэге приводит к снижению величины θ . Следовательно, возрастает роль борного поглотителя за счет увеличения поглощения в теплоносителе. Важно отметить, что при концентрации

борной кислоты в теплоносителе 1 г/кг, макросечение поглощения ^{10}B в два раза больше, чем макросечение поглощения водорода в теплоносителе.

Применение эрбия не приводит к блокированию поглощения тепловых нейтронов в твэлах. Поэтому отрицательное воздействие повышения поглощения нейтронов растворенном в воде борным поглотителем будет ниже в эрбьевом варианте, чем в гадолиниевом. Следовательно, можно ожидать, что плотностной коэффициент реактивности при использовании в качестве выгорающего поглотителя эрбия будет по амплитуде выше, чем при использовании гадолиния в твэгах.

Помимо этого, применение эрбия улучшает спектральную составляющую полного температурного коэффициента реактивности по температуре теплоносителя. Связано это с наличием резонанса изотопа эрбия ^{167}Er в эпитетовой области энергии (0,47 эВ) с максимальным сечением примерно 10000 б (рисунок 3.10). При повышении температуры теплоносителя спектр тепловых нейтронов будет сдвигаться в сторону более высоких энергий. Наряду с этим возрастет поток нейтронов, приходящихся на резонанс и, следовательно, увеличится поглощение нейтронов. В случае с гадолинием повышение температуры нейтронного газа, усредненное по спектру тепловых нейтронов, снижает микросечение поглощения (рисунок 3.11). Этот фактор будет способствовать отрицательной величине спектральной составляющей для гадолиния. Таким образом, спектральная составляющая полного температурного коэффициента реактивности по температуре теплоносителя для эрбия будет более отрицательной, а по амплитуде выше, чем при использовании твэгов.

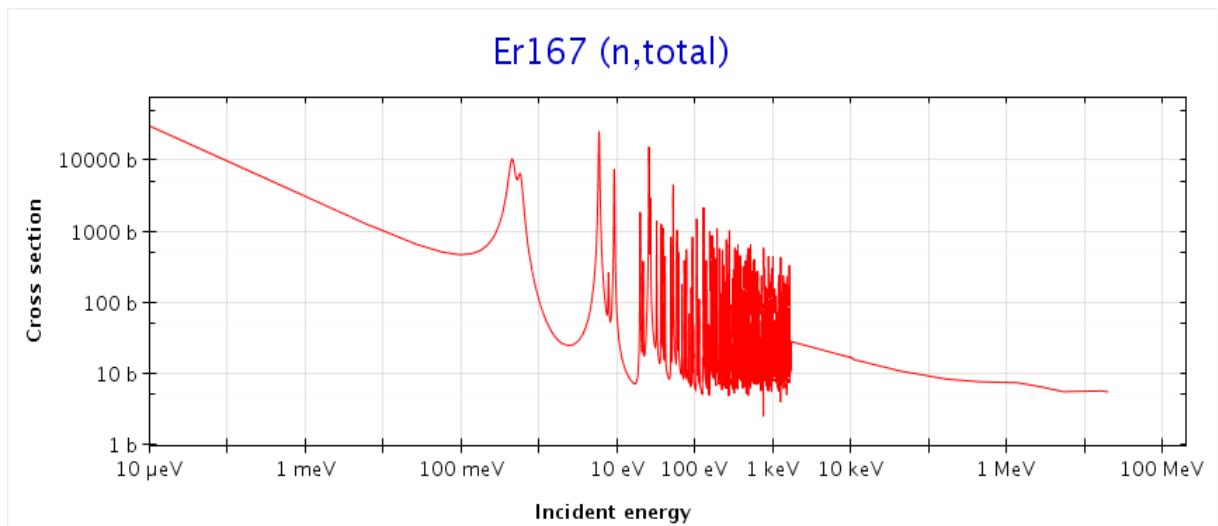


Рисунок 3.10 – Изменение микросечение ^{167}Er в зависимости от энергии нейтрона

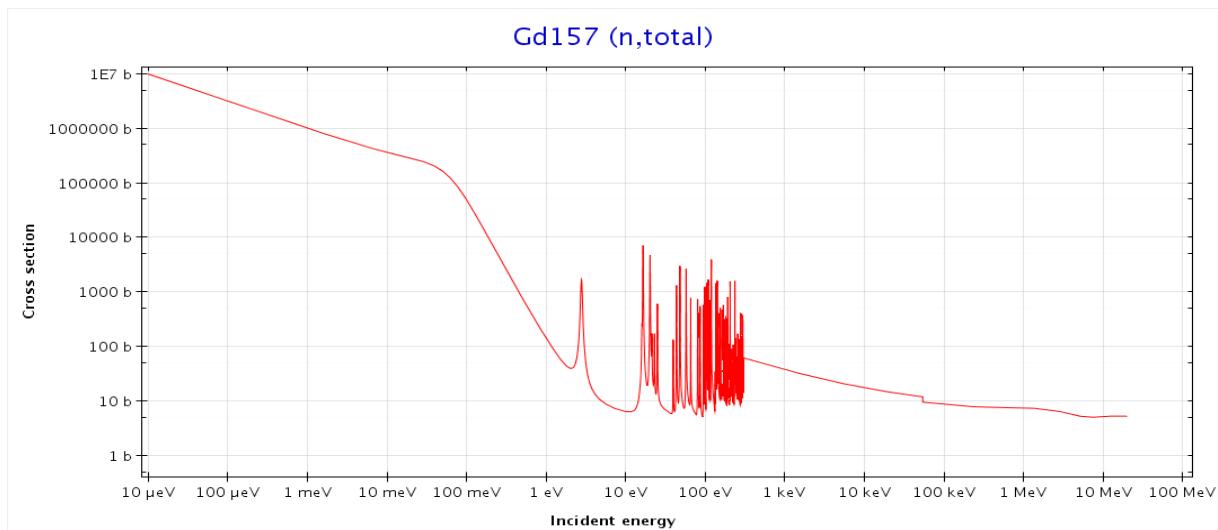


Рисунок 3.11 – Изменение микросечение ^{157}Gd в зависимости от энергии нейтрона

Для варианта с гадолинием принята схема размещения твэлов, моделирующая их расположения в ТВС реактора ВВЭР-1000, а именно, полиячейка, в которой на один твэг приходится 18 твэлов с максимальным весовым содержанием гадолиния в твэге 8 % (см. рисунок 2.4). Гомогенное размещение эрбия во всех твэлах в ТВС позволяет проводить расчеты на элементарной ячейке, представленной на рисунке 2.5. Данное обстоятельство упрощает моделирование, и занимает меньше расчетного времени. Для эрбьевого выгорающего поглотителя были приняты весовые содержания по принципу минимальная, средняя и максимальная, а именно 0,2, 0,5 и 1,1 %, соответственно.

При фиксированном весовом содержании выгорающего поглотителя задаются концентрации борной кислоты в теплоносителе и подбираются такие

обогащения топлива в твэлах и твэгах, чтобы достигалась критичность элементарной ячейки и полиячейки. Далее рассчитываются плотностной и полный температурный коэффициенты реактивности. Концентрации борной кислоты варьировались в интервале от 2 до 8 г/кг с шагом 2 г/кг.

Полученные расчетные значения коэффициентов реактивности представлены на рисунках 3.12 и 3.13. На приведенных графиках иллюстрируются изменения плотностного и полного температурного коэффициентов реактивности по теплоносителю в зависимости от концентрации борного поглотителя при различных весовых содержаниях эрбия в твэлах. Для сравнения представлены зависимости этих коэффициентов реактивности для варианта с гадолинием, весовое содержание которого установлено на уровне 8 %. Представленные значения взяты по отношению к значениям реперного варианта. Приведенные в работе относительные данные имеют меньшую погрешность по сравнению с абсолютными, поскольку источник погрешности один и тот же.

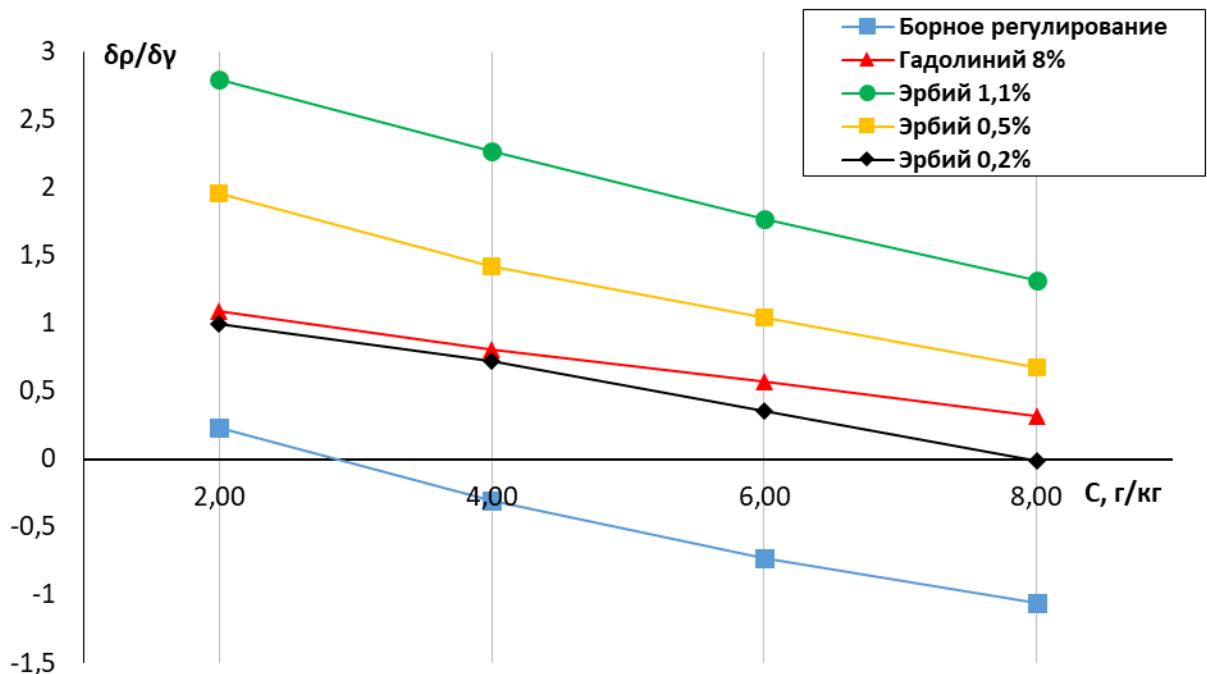


Рисунок 3.12 – Зависимость относительных значений плотностного коэффициента реактивности от концентраций борной кислоты в теплоносителе

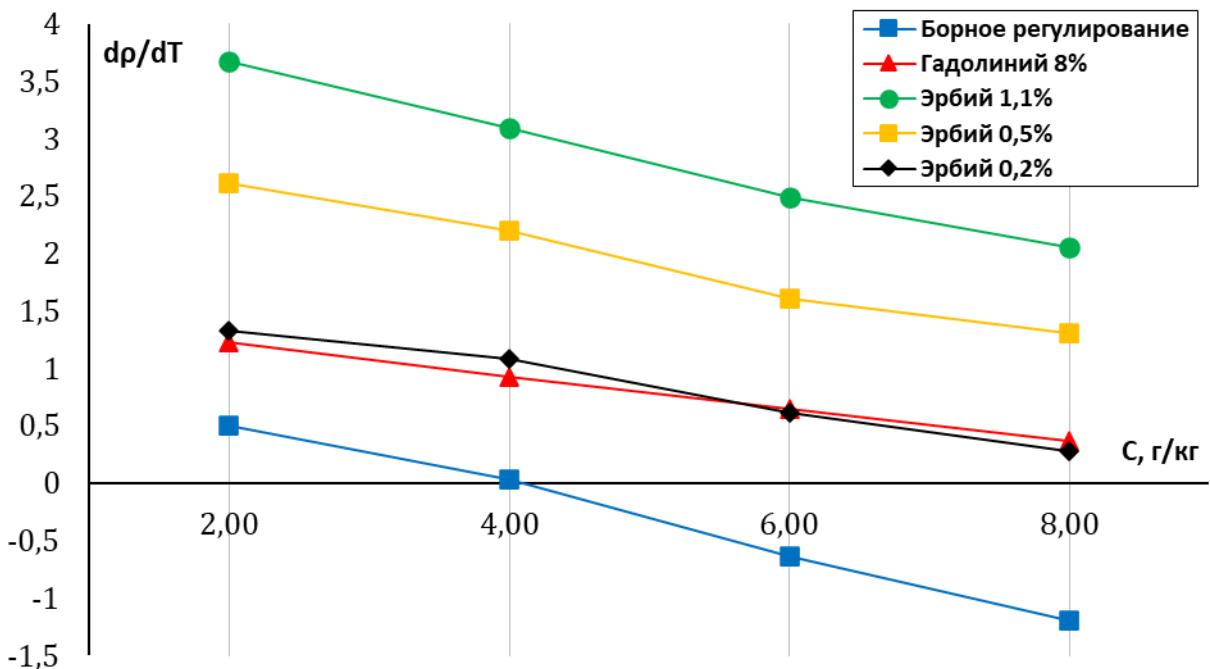


Рисунок 3.13 – Зависимость относительных значений полного температурного коэффициента реактивности от концентраций борной кислоты в теплоносителе

На основе представленных относительных значений можно сформулировать несколько выводов. Прежде всего, для обоих типов выгорающих поглотителей плотностной коэффициент реактивности остается положительным на протяжении всего диапазона изменения содержания борного поглотителя в теплоносителе. Полный температурный коэффициент реактивности по температуре теплоносителя для рассматриваемых вариантов с выгорающими поглотителями имеет отрицательные значения.

Второй момент заключается в том, что для выгорающего поглотителя на основе эрбия, как указывалось ранее, достигнуты более высокие амплитудные значения коэффициентов реактивности, по сравнению с гадолинием, вплоть до минимальной концентрации эрбия 0,2 %, при котором они примерно совпадают. Однако при использовании весового содержания эрбия 0,2 % компенсируется меньший запас реактивности по сравнению с гадолинием (см. рисунок 3.8). Повышение концентрации эрбия в твэлах благоприятно сказывается на параметрах безопасности. Следовательно, анализ коэффициентов реактивности позволяет определить оптимальное содержание эрбия в топливных элементах при замене гадолиниевого выгорающего поглотителя на эрбиевый. Согласно проведенному

исследованию, эта величина составляет примерно 0,5 % весового содержания, что ниже, чем величина, полученная исходя из равенства компенсируемых запасов реактивности. При данной концентрации эрбия достигается компенсация реактивности, сопоставимая с той, что наблюдается при использовании гадолиния. Однако при этом отмечаются более высокие амплитудные значения коэффициентов реактивности.

3.3.2. Расчет коэффициентов реактивности для модели частичных перегрузок

При расчетном моделировании частичных перегрузок рассматривались трехкратная схема без перестановок ТВС. В этом случае АЗ реактора ВВЭР-1000 можно представить как периодическую структуру полиячеек, состоящих из ТВС с различным числом кампаний. Расчет коэффициентов реактивности будем проводить, рассматривая одну полиячейку. Учитывая выражение (2.28), определяется продолжительность кампании реактора для рассматриваемых вариантов поглотителей при трехкратной перегрузке. По известной кампании находим концентрации нуклидов для соответствующих шагов выгорания и далее создаем полиячейку, моделирующую активную зону. Для этого можно воспользоваться опциями программного кода *Serpent* «*set printm*» или «*set inventory*».

Рассматривается схема расположения гадолиния в ТВС, при которой каждый твэг окружен двумя рядами твэлов (1:18), была скомпонована ТВС с 16 твэгами. На рисунке 3.14 представлена ТВС с возможным размещением 16 твэгов. Значения коэффициентов реактивности, полученные для данной ТВС, будут приниматься как для действующих АЭС с реакторами ВВЭР-1000. Для эрбия рассматривалась ТВС с однородным размещением поглотителя во все твэлы.

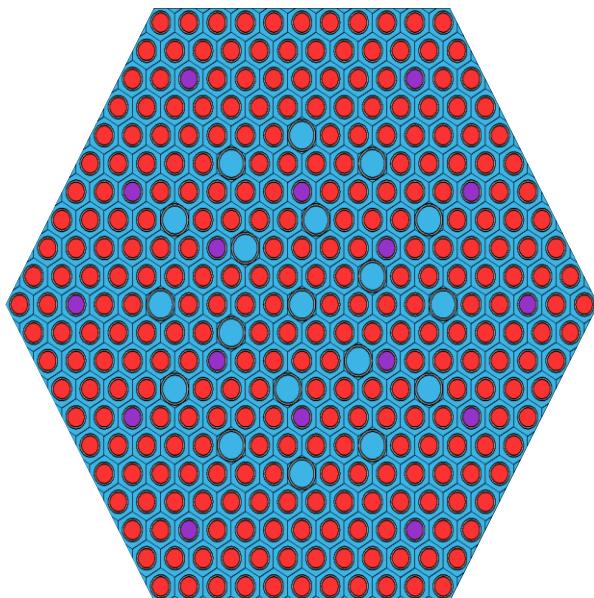


Рисунок 3.14 – ТВС с 16 твэгами, учитывающая схему расположения 1:18

Из полученных ТВС были собраны модели полиячеек для частичных перегрузок для обоих вариантов выгорающих поглотителей. В центре предлагаемой модели располагается свежая топливная загрузка, на рисунке 3.15 обозначена желтым цветом. Свежее топливо окружено топливными сборками с одной (оранжевый цвет) и двумя кампаниями (красный цвет). Далее проводился расчет выгорания во всех ТВС на одну кампанию. В результате получаем полиячейку, состоящую из ТВС с одной (желтая), двумя (оранжевая) и тремя (красная) кампаниями. Свежая ТВС, в комбинации с частично выгоревшими вокруг, образует тройку топливных сборок с различным временем облучения. Представленная схема рассматривается в виде фрагмента картограммы АЗ реактора ВВЭР-1000 при цельнократной перегрузке. Применение данной модели упрощает процесс моделирования АЗ реактора ВВЭР-1000 при проведении численных расчетов коэффициентов реактивности.

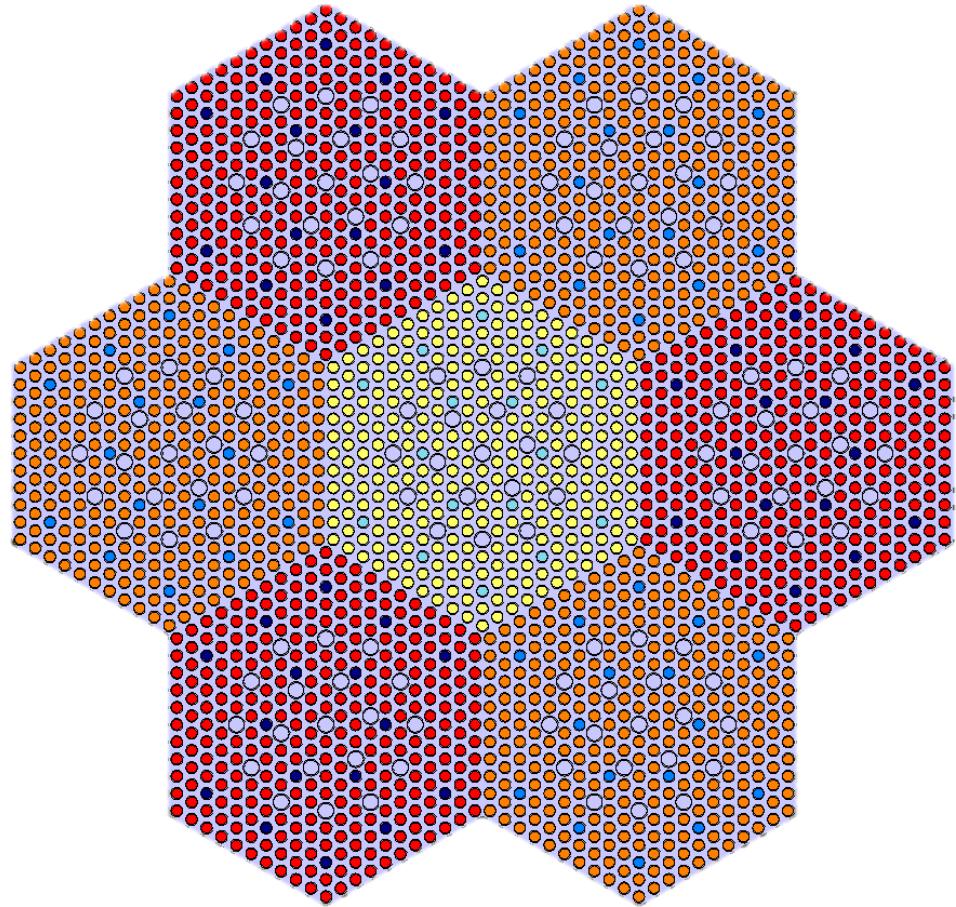


Рисунок 3.15 – Модель АЗ при трехкратной перегрузке

На рисунках 3.16 и 3.17 представлены результаты проверки значений $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для всех вариантов поглотителей. Представленные значения показывают сходимость коэффициентов размножения при одинаковых концентрациях поглотителя для различных моделей. Это доказывает правильность расчета водотопливных соотношений и геометрических размеров модели.

Согласно полученным расчетным данным, для вариантов с весовой долей эрбия 0,5 % и гадолиния 8 % достигается примерно равный максимальный нескомпенсированный запас реактивности на жидкостное регулирование. Полное выгорание гадолиния в твэгах за первую кампанию приводит к его отсутствию в твэгах ТВС на второй и третьей кампании. Указанный фактор учитывается при расчетах коэффициентов реактивности.

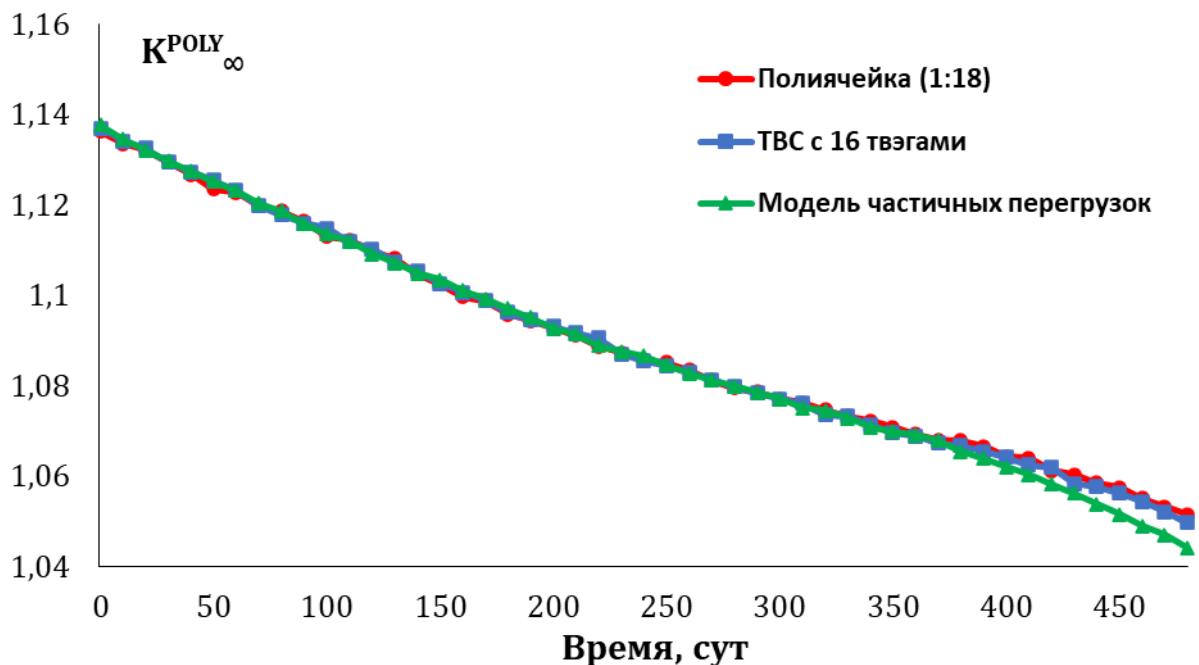


Рисунок 3.16 – Зависимость $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для варианта гадолиний 8 %

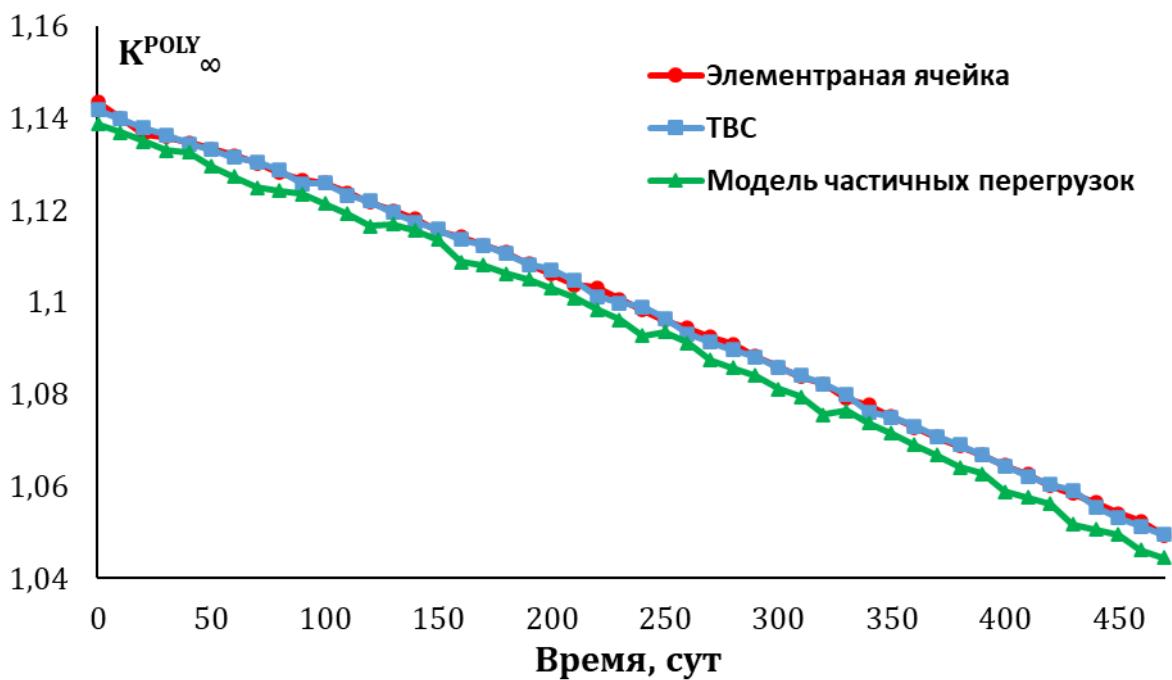


Рисунок 3.17 – Зависимость $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для варианта эрбий 0,5 %

Так как максимальный нескомпенсированный запас реактивности отвечает моменту начала кампании, то расчет коэффициентов реактивности производился для такого состояния реактора. Для этого подбирается концентрация борного поглотителя, при которой начальный запас реактивности будет равен нулю. Данный подход позволяет оценить влияние максимальной концентрации борной кислоты в течение кампании на параметры безопасности. В вариантах эрбий 0,5 % и гадолиний 8 % добавляются одинаковые концентрации борной кислоты, в связи

с равным максимальным запасом реактивности. Это дает возможность проводить оценку изменений параметров безопасности для эрбия и гадолиния при равном воздействии борного поглотителя в теплоносителе. Результаты расчетов коэффициентов реактивности для модели частичных перегрузок представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Относительные значения коэффициентов реактивности с использованием модели частичных перегрузок для всех исследуемых вариантов

№	Вариант	Относительные значения коэффициентов реактивности		
		Плотностной	Полный температурный	Потери в выгорании
1.	Er 1,1%	1,34	1,42	12 %
2.	Er 0,5%	0,78	0,75	2%
3.	Er 0,2%	0,13	0,15	–
4.	Gd 8%	0,56	0,53	–

Представленные в таблице 3.3 относительные значения величин взяты по отношению к значениям реперного варианта. Рост весового содержания эрбия в твэлах снижает начальный избыточный запас реактивности. Тем самым уменьшается максимальная концентрация борной кислоты за кампанию для достижения критичности. При этом, как видно из данных таблицы, в вариантах с эрбьевым поглотителем показатели коэффициентов реактивности демонстрируют благоприятную динамику. А именно, при повышении концентрации эрбия происходит улучшение значений коэффициентов реактивности. В этом случае наибольшие значения достигнуты при максимальной концентрации эрбия 1,1 %. Однако при этом сокращается продолжительность кампании реактора и увеличиваются потери в выгорании выгружаемого топлива.

Для модели трехкратной схемы перегрузок значение весового содержания эрбия при равных компенсируемых запасах реактивности с гадолиниевым вариантом равно 0,5 % весовых (рисунок 3.18).

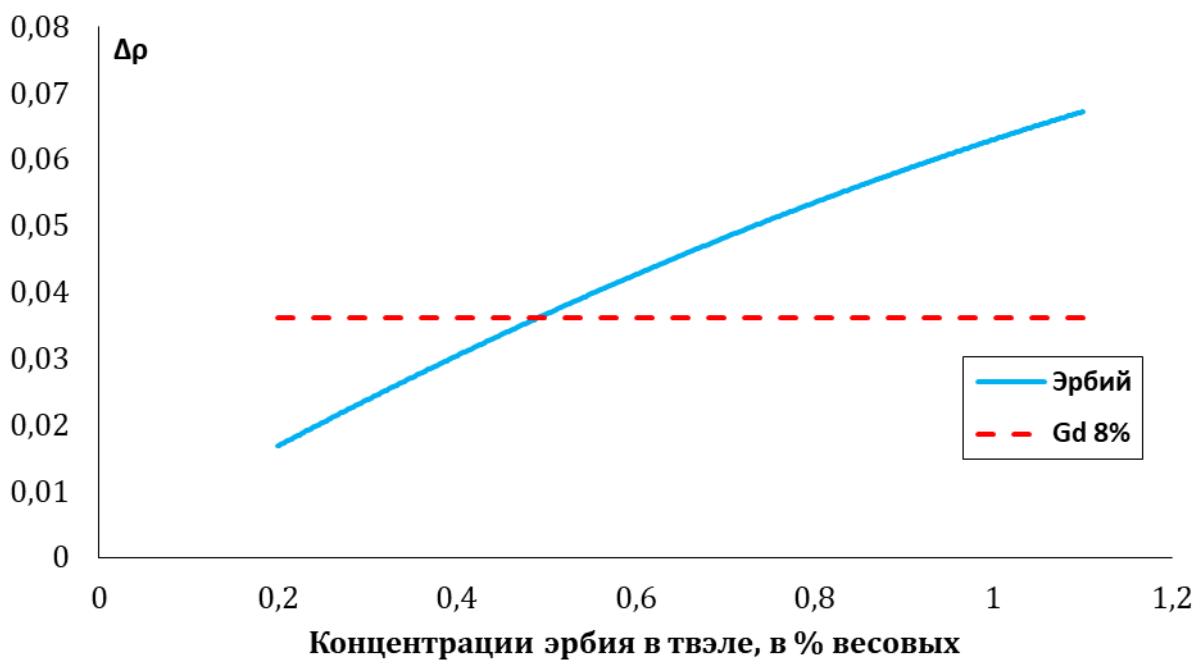


Рисунок 3.18 – Зависимость максимального компенсируемого запаса реактивности от весового содержания эрбия в твэле

При этом значении весового содержания эрбия в твэлах потеря в выгорании составляет не более 2 %, а амплитудные значения коэффициентов реактивности по плотности и температуре теплоносителя заметно выше, чем при использовании гадолиния. Равномерное расположение эрбьевого поглотителя в твэлах не приводит к неравномерности энерговыделения, а наличие резонанса в тепловой области у изотопа ^{167}Er обеспечивает более высокие значения полного температурного коэффициента реактивности. Представленные расчетные значения коэффициентов реактивности, полученные при использовании различных моделей элементарных ячеек, полиячеек и модели частичных перегрузок, демонстрируют хорошее совпадение с теоретическими выводами, изложенными в п. 3.4.

Исходя из полученных результатов оптимальное весовое содержание эрбия будет находиться близко к 0,5 % весовых. Для получения коэффициентов реактивности, равных варианту с использованием гадолиния 8 %, можно брать весовые содержания менее 0,5 %. В этом случае потери в выгорании полностью исчезнут, но повысится начальное содержание борного поглотителя в теплоносителе, и, соответственно, возрастет водообмен. Применение эрбия в твэлах позволит снизить долю поглотителя, и увеличить содержание делящегося

материала в топливе. Таким образом, повысится энерговыработка. Последнее условие важно для перехода на удлиненные кампании. Вышеуказанные факты дают эрбьевому поглотителю дополнительное преимущество как выгорающему поглотителю, используемому в реакторах типа ВВЭР-1000, при переходе на удлиненные топливные кампании.

3.4. Выводы к третьей главе

1. Использование эрбия для снижения водообмена не эффективно, поскольку при этом возрастают потери в выгорании выгружаемого топлива.
2. Повторное использование делящихся изотопов после переработки отработавших ТВС с эрбиевым выгорающим поглотителем в технологии РЕМИКС-топлива существенно снижает удельный расход природного урана, но приводит к возрастанию стоимости топливной загрузки.
3. Предложен подход к выбору оптимального весового содержания эрбия при замене гадолиния без потери в выгорании на основе сопоставления коэффициентов реактивности по плотности и температуре теплоносителя для обоих рассматриваемых вариантов.

ГЛАВА 4. СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫГОРАЮЩИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ

С точки зрения быстрой окупаемости сооружаемых АЭС с реактором типа ВВЭР, рентабельным является применение удлиненных топливных кампаний. Данная стратегия позволяет сократить время простоев и увеличить время работы РУ на мощности. На сегодняшний день в реакторах типа ВВЭР реализована полуторагодичная топливная кампания. В дальнейшем планируется переход на двухгодичную кампанию. Удлинение кампании сопровождается увеличением начального избыточного запаса реактивности, компенсируемого как жидкостным регулированием, так и выгорающими поглотителями. При существующем в реакторах типа ВВЭР-1000 соотношении твэгов и твэлов в ТВС и весового содержания гадолиния в них, дальнейшее увеличение весового содержания гадолиния не приводит к требуемому росту запаса реактивности, компенсируемому твэгами (см. п. 2.4.2), но значительно повышает неравномерность поля энерговыделения в ТВС. Поэтому представляет интерес совместное использование выгорающих поглотителей, а именно гадолиния и эрбия, при загрузке эрбия в твэлы. В этом случае можно повысить компенсируемый выгорающими поглотителями запас реактивности при меньшей весовой загрузке гадолиния. В свою очередь, весовая загрузка эрбия не должна приводить к заметной потере в выгорании выгружаемого топлива. Цель данной работы – повышение компенсируемого выгорающими поглотителями запаса реактивности при ограничениях на весовое содержание гадолиния в твэгах и эрбия в твэлах.

4.1. Изменение запаса реактивности и относительных объемов водообмена при совместном использовании выгорающих поглотителей при соотношении твэлов и твэгов в ТВС 1:18

При данной схеме расположения применяются большие весовые содержания гадолиния. Данное обстоятельство ухудшает теплопроводность твэга (см. п. 1.3). При этом повышение содержания гадолиния в твэге незначительно влияет на компенсацию запаса реактивности (см. таблицу 2.3), но увеличивает неравномерность энерговыделения. На рисунке 4.1 показано изменение компенсируемого запаса реактивности от весового содержания гадолиния в твэге. При росте весового содержания гадолиния в 2 раза компенсируемый запас реактивности увеличивается всего лишь на 10 %.

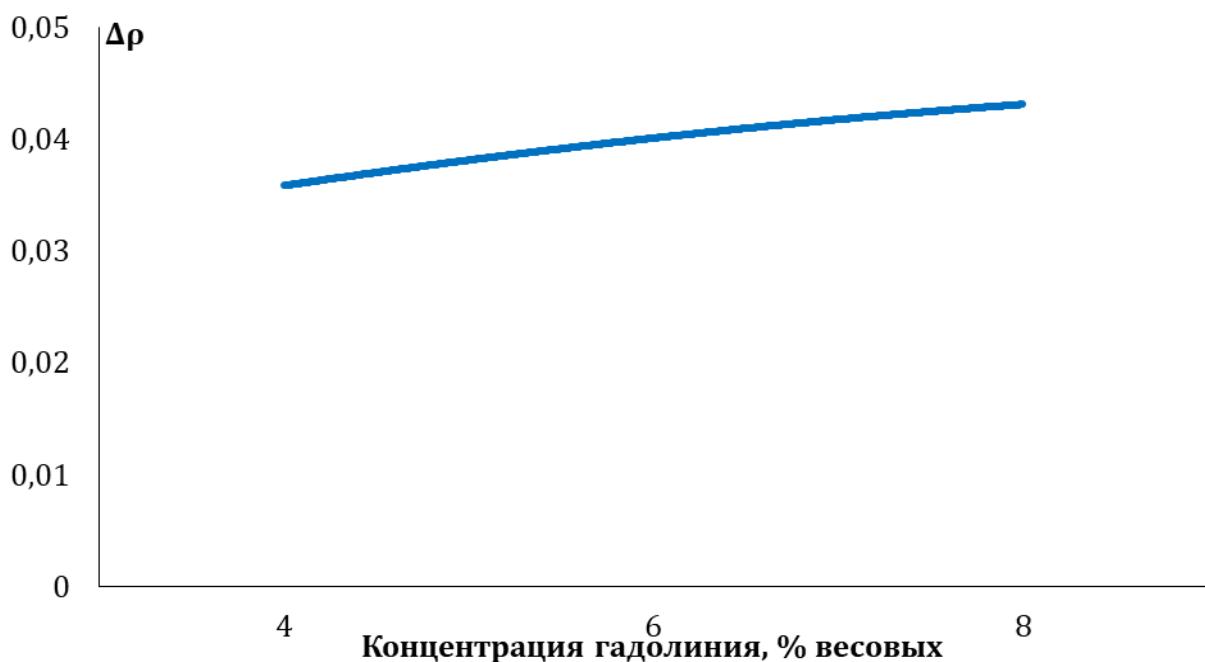


Рисунок 4.1 – Зависимость максимального компенсируемого запаса реактивности от концентрации гадолиния при схеме расположения 1:18

По мере повышения содержания гадолиния уменьшается энерговыделение в твэге в начале кампании. Таким образом, возникает заметная разница в мощностях твэгов и окружающих твэлов. Указанный градиент мощностей приводит к напряженным условиям работы твэгов, что чревато разрушением целостности топливной таблетки и деформацией оболочки. Это, в свою очередь, является нарушением одного из барьеров безопасности. Для частичной компенсации этого эффекта снижается обогащение топлива в твэге. На рисунке 4.2 демонстрируется

изменение средней линейной мощности твэгов по высоте для различных вариантов с гадолинием в начале кампании. Увеличение весового содержания гадолиния блокирует поток тепловых нейтронов в твэге и в ближнем ряду твэлов. Вследствие этого снижается максимальное значение линейной мощности твэгов. Таким образом, происходит спад среднего значения энерговыделения и повышение неравномерности. Для минимизации этого эффекта при совместном использовании необходимо уменьшать концентрацию гадолиния в твэге. По указанным ранее причинам при совместном использовании выгорающих поглотителей концентрации гадолиния были снижены до 6 и 4 %.

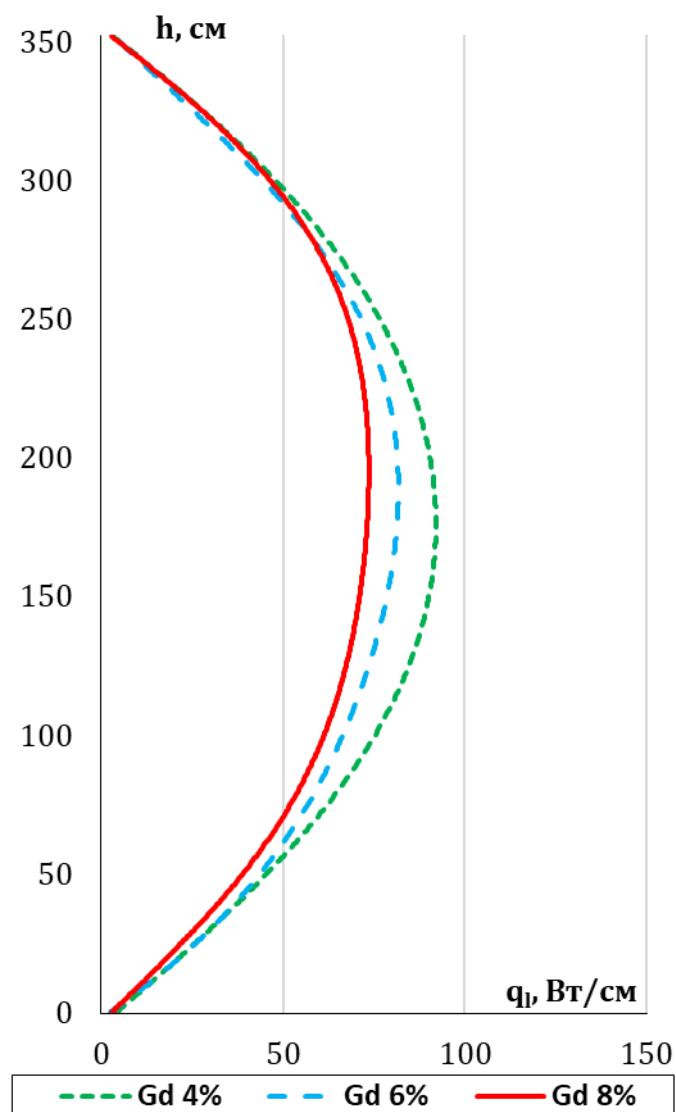


Рисунок 4.2 – Изменение средней линейной нагрузки твэгов от высоты в момент времени $t=0$ для вариантов с гадолинием при схеме расположения 1:18

Основным недостатком эрбия является снижение выгорания выгружаемого топлива по мере увеличения концентрации поглотителя в твэле. По этой причине берутся небольшие весовые содержания данного поглотителя для уменьшения потерь на выгорание. Согласно выводам гл. 3, оптимальное весовое содержание эрбия находится в промежутке от 0,2 до 0,5 %. При выборе концентраций в указанном интервале отсутствуют потери на выгорание, и достигаются более высокие параметры безопасности. В этой связи содержание эрбия в твэлах вокруг твэга варьируется в пределах от 0,2 до 0,6 % с шагом 0,2 %. В расчетном анализе ТВС представлялась полиячейкой (рисунок 4.3).

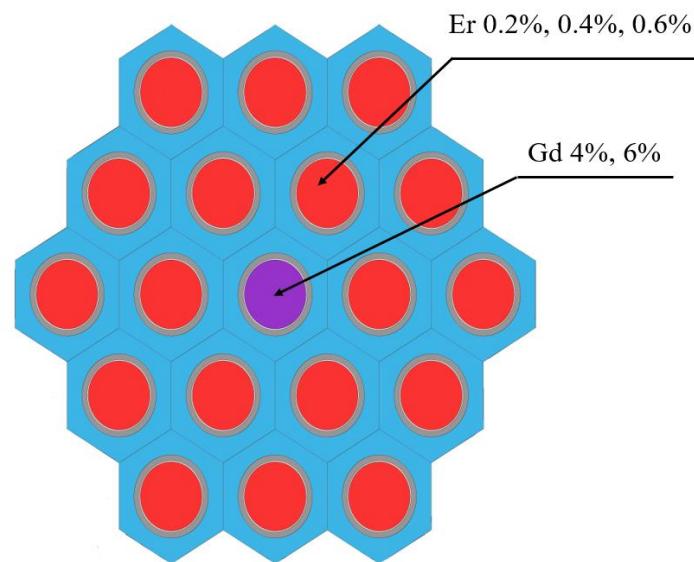


Рисунок 4.3 – Полиячейка для расчета совместного использования выгорающих поглотителей

Продолжительность кампании для рассматриваемых вариантов определяется согласно выражению (2.28). На рисунках 4.4 и 4.5 представлены изменения $K_{\infty}^{POLY}(t)$. Наличие эрбия в твэлах вокруг твэга с фиксированной концентрацией гадолиния снижает начальное значение $K_{\infty}^{POLY}(t)$ по сравнению с чисто гадолиниевыми вариантами. В таблице 4.1 приводятся значения максимального скомпенсированного запаса реактивности за кампанию и относительные потери в выгорании для всех рассматриваемых вариантов.

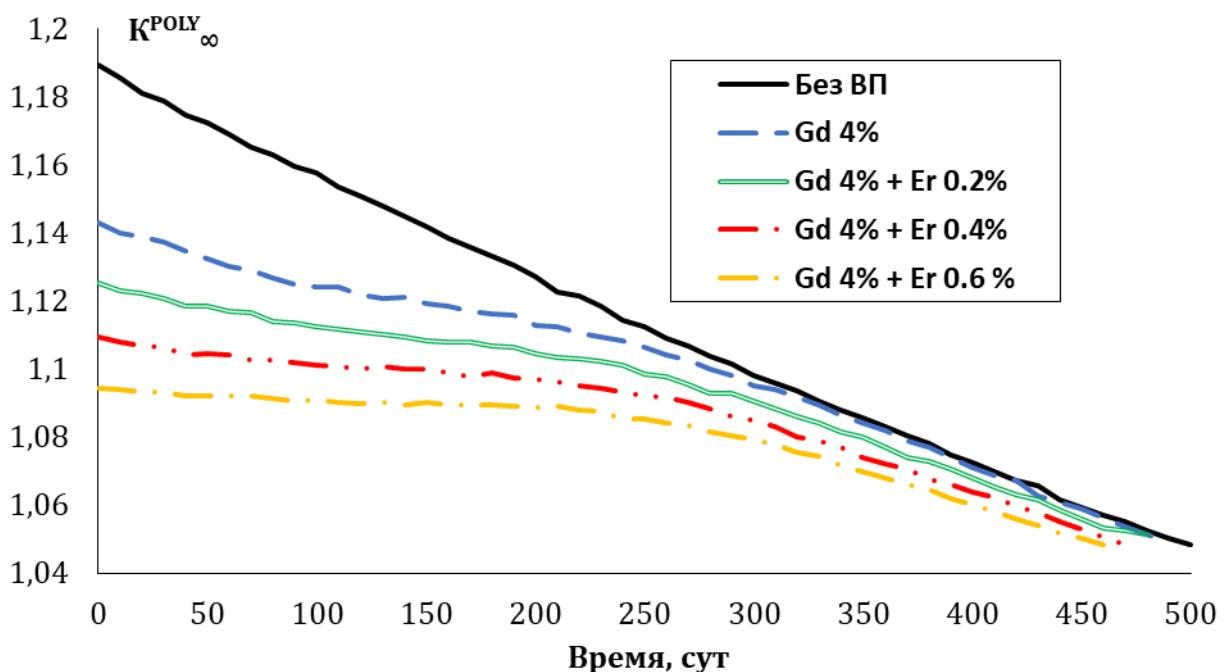


Рисунок 4.4 – Зависимости $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для вариантов смешанного использования поглотителей с концентрацией гадолиния 4 % при схеме расположения 1:18

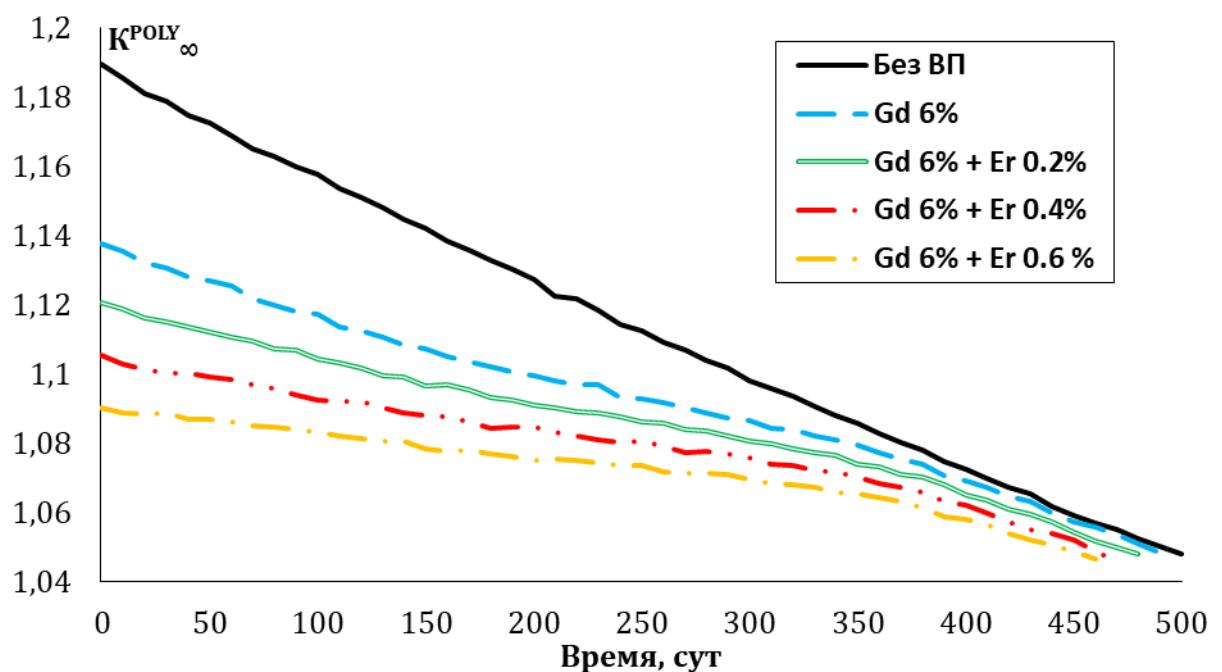


Рисунок 4.5 – Зависимости $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для вариантов смешанного использования поглотителей с концентрацией гадолиния 6 % при схеме расположения 1:18

Таблица 4.1. Максимальный скомпенсированный запас реактивности для рассматриваемых вариантов при схеме расположения 1:18

№	Вариант	K_{∞}^{POLY}	K_{∞}^{CRIT}	$\Delta\rho$	B
1	без поглотителя	1,1894	1,05	—	—
Гадолиний					
2	4 %	1,1429	1,05	0,0359	—
3	6 %	1,1377	1,05	0,0401	—
Эрбий					
4	0,20 %	1,1669	1,05	0,0170	—
5	0,40 %	1,1476	1,05	0,0321	2
6	0,60 %	1,1316	1,05	0,0451	6
Совместное использование					
7	Gd 4 % + Er 0,2 %	1,1250	1,05	0,0505	2
8	Gd 4 % + Er 0,4 %	1,1092	1,05	0,0638	4
9	Gd 4 % + Er 0,6 %	1,0944	1,05	0,0766	6
10	Gd 6 % + Er 0,2 %	1,1207	1,05	0,0541	2
11	Gd 6 % + Er 0,4 %	1,1052	1,05	0,0672	4
12	Gd 6 % + Er 0,6 %	1,0903	1,05	0,0803	6

В вариантах совместного использования увеличивается компенсация начальной избыточной реактивности по сравнению с чисто эрбьевыми вариантами при таких же потерях на выгорание. Изменение концентрации гадолиния в центре при фиксированном значении эрбия вокруг оказывает незаметное влияние на компенсацию запаса реактивности. В вариантах с весовым содержанием эрбия 0,6 % достигаются наибольшие потери в выгорании.

С целью минимизации потерь в выгорании при совместном использовании были дополнительно рассмотрены варианты, в которых варьировались концентрации эрбия в твэлах вокруг твэга (рисунок 4.6). Для этих случаев концентрация гадолиния в твэге была принята за 4 %. В первом варианте концентрация эрбия увеличивается от 0,2 до 0,4 % по мере удаления от твэга. Во втором, наоборот, снижается. Снижения массовой загрузки эрбия в ТВС по сравнению с вариантом Gd 4% + Er 0,4% составили 17 и 33 %, соответственно. На рисунке 4.7 представлены зависимости $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для указанных вариантов. В предложенных вариантах компенсируется запас реактивности, аналогичный варианту Gd 4 % + Er 0,4 %, но при меньших потерях на выгорание.

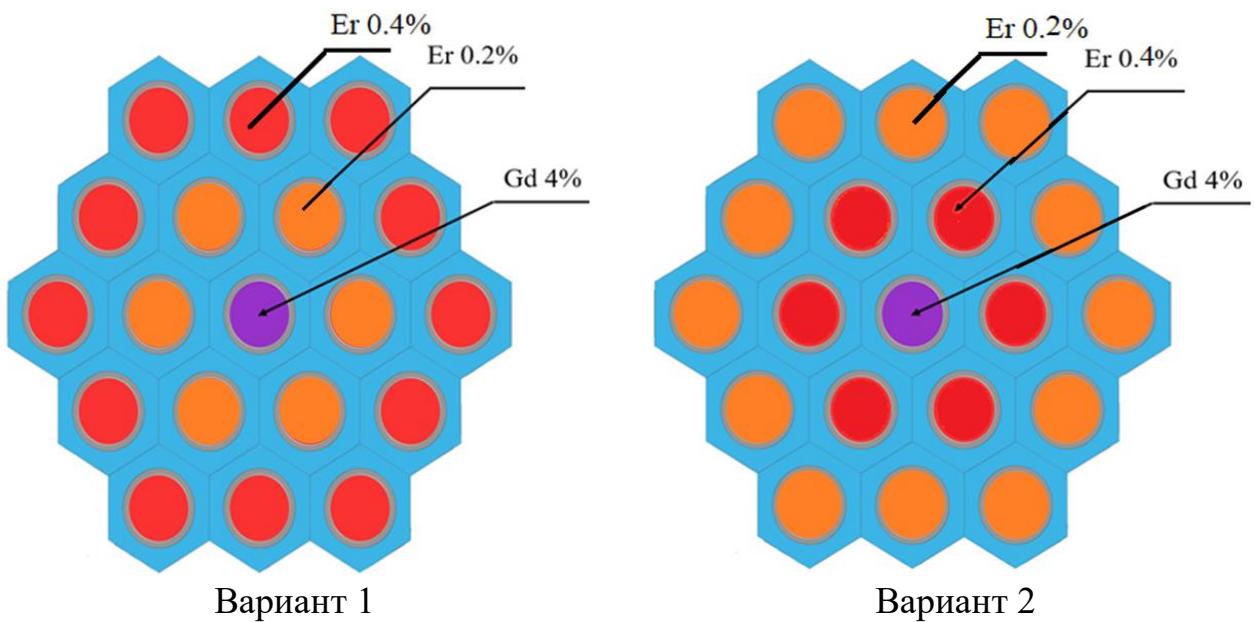


Рисунок 4.6 – Варианты совместного использования выгорающих поглотителей при схеме расположения 1:18

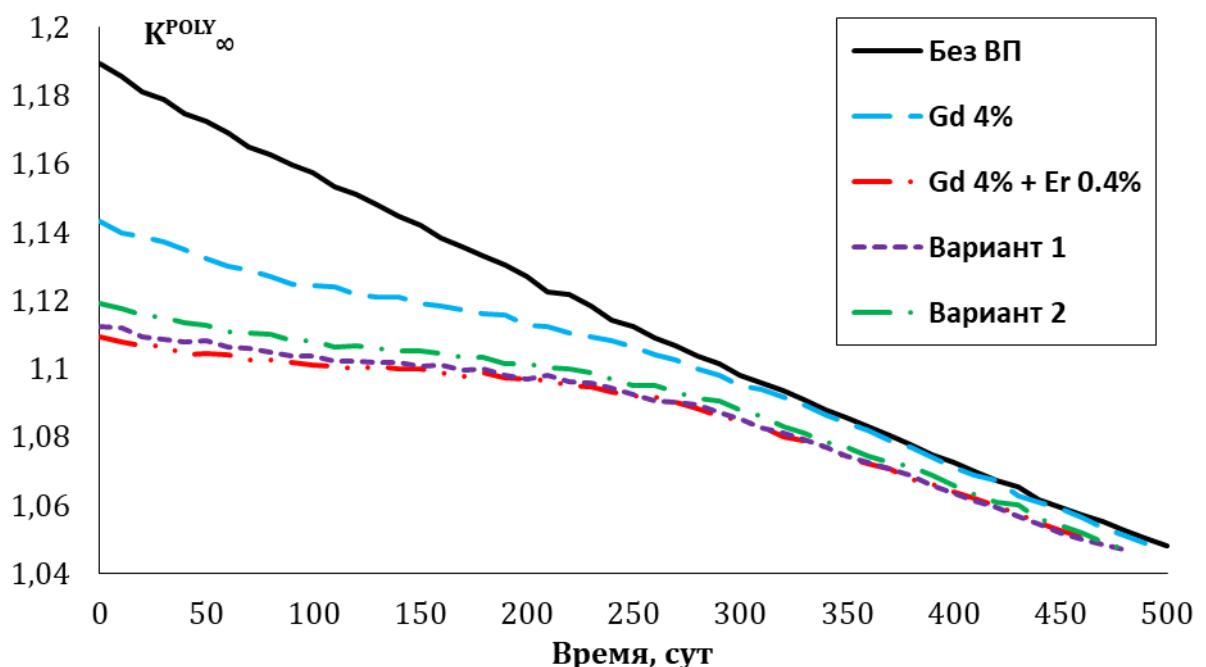


Рисунок 4.7 – Зависимости $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для дополнительных вариантов смешанного использования поглотителей с концентрацией гадолиния 4 % при схеме 1:18

Для полного сравнения представленных вариантов комбинированного использования выгорающих поглотителей рассчитаны относительные снижения объемов водообмена за кампанию для вариантов с максимальным весовым содержанием эрбия. Расчет снижения водообмена для рассматриваемых вариантов осуществляется по формуле для спада реактивности (2.35). Представленные на

рисунке 4.8 относительные снижения объемов водообмена взяты по отношению к значениям реального варианта ($Gd\ 8\%$ при схеме размещения 1:18).

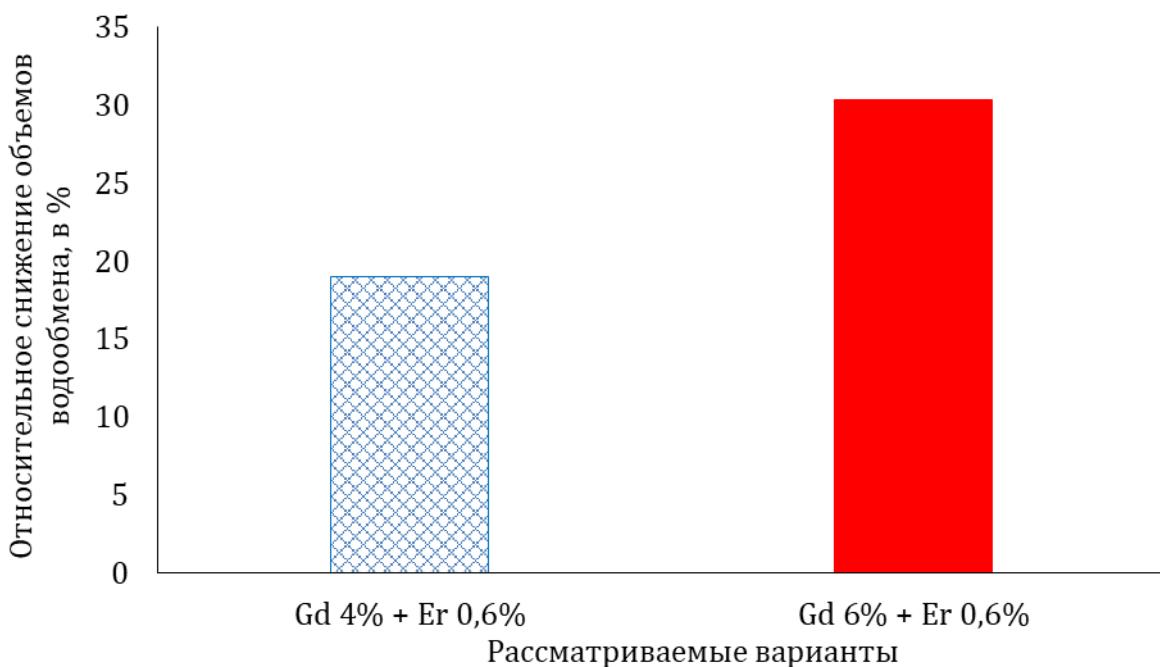


Рисунок 4.8 – Относительные снижения объемов водообмена при совместном использовании выгорающих поглотителей с концентрациями гадолиния 4 и 6 %

Относительные значения, представленные на рисунке 4.8, рассчитаны для вариантов смешанного использования первого типа (без варьирования концентрации эрбия). Повышенные концентрации эрбия в твэлах при смешанном использовании выгорающих поглотителей напрямую влияют на снижение относительных объемов водообмена. Однако при этом увеличиваются потери на выгорание. Так, для вариантов на рисунке 4.8 проигрыш в выгорание относительно реального варианта составил 6 %. Указанный недостаток снижает экономическую рентабельность атомной станции. Альтернативным способом снижения объемов водообмена за кампанию является переход к стратегии увеличения числа твэлов (см. гл. 2).

Преодоления порога 5 % на обогащение при переходе на более длительные топливные кампании потребует использование поглотителя, влияющего на избыточный запас реактивности в течение всей кампании, и улучшения параметров безопасности. В этой связи комбинированное использование топлива на основе гадолиниевого и эрбьевого поглотителей может частично разрешить указанные

вопросы и дополнительно снизить степень неравномерности энерговыделения путем уменьшения концентрации гадолиния в твэге.

4.2. Выводы к четвертой главе

1. Повышение весового содержания гадолиния в твэгах без увеличения числа твэгов в ТВС не приводит к заметному повышению запаса реактивности гадолинием.
2. При совместном применении выгорающих поглотителей гадолиния в твэгах, а эрбия в твэлах происходит существенное повышение компенсируемого выгорающими поглотителями запаса реактивности, что позволяет их использование при удлинении кампании реактора до двух лет.
3. Добавление эрбия при совместном применении приводит к снижению начального запаса реактивности и объемов водообмена за кампанию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено всестороннее исследование применения выгорающих поглотителей для компенсации избыточной реактивности в реакторах типа ВВЭР при удлиненных кампаниях реактора.

Основные результаты диссертационной работы.

1. Для снижения объемов водообмена в реакторах типа ВВЭР при удлиненных кампаниях при текущей системе компенсации избыточной реактивности необходимо увеличивать число твэгов и варьировать весовое содержание поглотителя в них. Указанная идея доказана теоретически и подтверждена расчетным путем.
2. Для оценки эффективности предложенной стратегии увеличения числа твэгов предложена методика расчета относительных объемов водообмена за кампанию для случаев роста и спада реактивности.
3. На основе нейтронно-физических расчетов показана целесообразность использования эрбийевого выгорающего поглотителя при переходе на более длительные кампании. Для частичной компенсации возникающих потерь в выгорании, вызванных применением эрбия, рассмотрено повторное использование уран-эрбийевого топлива путем формирования РЕМИКС-загрузки.
4. Сравнительный анализ коэффициентов реактивности по плотности и температуре теплоносителя позволил определить оптимальное весовое содержание эрбийевого выгорающего поглотителя для замены гадолиния без существенных потерь в выгорании.
5. Показано, что совместное применение выгорающих поглотителей (гадолиния и эрбия) позволяет снизить неравномерность энерговыделения за счет уменьшения содержания гадолиния в твэгах и одновременно увеличить компенсируемый запас реактивности путем добавления эрбия.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЗ	— активная зона.
АЭС	— атомная электростанция.
ВВЭР	— водо-водяной энергетический реактор.
ВВЭР-ТОИ	— водо-водяной энергетический реактор типовой оптимизированный и информатизированный.
ВП	— выгорающий поглотитель.
ЖРО	— жидкие радиоактивные отходы.
КИУМ	— коэффициент использования установленной мощности.
МАГАТЭ	— Международное агентство по атомной энергии.
НАО	— низкоактивные отходы.
ООН	— Организация объединённых наций.
ОЯТ	— облученное ядерное топливо.
пэл	— поглощающие элементы.
РБМК	— реактор большой мощности канальный.
РЕМИКС	— топливо на основе неразделенной смеси изотопов урана и плутония, смешанное с обогащенным ураном.
РУ	— реакторная установка.
ТВС	— тепловыделяющая сборка.
ТВЭГ	— тепловыделяющий элемент с гадолинием.
ТВЭЛ	— тепловыделяющий элемент.
LOCA	— авария с потерей теплоносителя от англ. a loss of coolant accident.
PRIS	— информационная система по энергетическим реакторам от англ. power reactor information system.
PWR	— реакторы с водой под давлением от англ. pressurized water reactors.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность и искреннюю благодарность: научному руководителю Савандеру Владимиру Игоревичу за постановку важных и актуальных задач, которые легли в основу настоящего исследования. Особую благодарность хочется выразить за постоянную поддержку, ценные советы и профессиональное руководство на всех этапах работы над диссертацией. Его глубокие знания и опыт сыграли ключевую роль в объяснении полученных результатов и формировании научной компетенции автора в области физики ядерных реакторов. Благодаря его вниманию к деталям и готовности делиться опытом работа была выполнена на высоком уровне;

ректору Ташкентского государственного технического университета имени И. Каримова, профессору Турабджанову Садритдину Махаматдиновичу, а также профессору Тошеву Жавохиру Буриевичу за оказанное содействие во внедрении нейтронно-физических моделей, разработанных автором, в учебно-исследовательскую программу университета;

членам своей семьи за моральную поддержку и понимание, оказанные на протяжении всей работы над диссертацией. Их вера в успех стало важной опорой в трудные моменты и источником вдохновения для достижения поставленных целей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. World Nuclear Association (WNA). Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources. July 2011, p. 12. Режим доступа: https://world-nuclear.org/images/articles/comparison_of_lifecycle.pdf (дата обращения: 28.10.2024).
2. Mirabile M., Calder J. Clean power for a cool planet Electricity infrastructure plan and the Paris Agreement / M. Mirabile // OECD. - 2018. - P. 40.
3. UN climate change cop 28 [электронный ресурс] <https://www.cop28.com/en/global-renewables-and-energy-efficiency-pledge> (дата обращения: 08.11.2024).
4. Kammen D.M., Pacca S. Assessing the costs of electricity. / D.M. Kammen // Annual review of environment and resources. - 2004. - v. 29: P. 301-344.
5. Stanek W., Czarnowska L., Gazda W., Simla T. Thermo-ecological cost of electricity from renewable energy sources. / W. Stanek // Renewable Energy. - 2018. - v. 115. - P. 87-96.
6. Коптелов М.Б., Гусева А.И. Особенности определения риска в инвестиционных проектах строительства АЭС. / М.Б. Коптелов // Атомная Энергия. - 2013. - т. 115 (3) - С. 170-176.
7. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и её последствиях, подготовленной для МАГАТЭ. // Атомная энергия. -1986. - т. 61(5) - С. 301 - 320.
8. Арутюнян Р.В. и др. Системный анализ причин и последствий аварий на АЭС «Фукусима-1».: монография. / Р.В. Арутюнян // Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. - М.: 2018 г. – С. 408
9. Арон Д.В. и др. Анализ влияния радиационных критериев эвакуации населения на социально-экономические последствия аварии на АЭС в префектуре Фукусима (Япония). / Д.В. Арон // Атомная Энергия. - 2012. - т. 112 (3) - С. 163-168.
10. Андрушечко С.А. Расширение функций информационной поддержки оператора блочного щита управления за счет внедрения систем представления параметров безопасности. / С. А. Андрушечко // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2004. - 4 - С. 12-22.
11. Alekseev P.N., Bobrov E.A., Chibinyaev A.V., Teplov P.S., Dudnikov A.A. Multiple recycle of REMIX fuel at VVER-100 operation in closed fuel cycle. / P.N. Alekseev // Physics of Atomic Nuclei. - 2016. - v. 108: P. 1264-1273.

12. Matveenko A.V., Kharitonov V.V., Pavlov Yu. G., Uliyanin Yu. A. Competitiveness assessment of regenerated uranium plutonium remix fuel in thermal reactors / A.V. Matveenko // Atomic Energy. - 2021. - v. 130: P. 57-62.
13. Fedorov Yu.S., Bibichev B.A., Zilberman B.Y., Kudryavcev E.G. Use of regenerated uranium and plutonium in thermal reactors / Yu.S. Fedorov // Atomic Energy. - 2005. – v. 99: P. 572-576.
14. Макдональд А. Ядерная энергетика: положение дел в мире. Взгляд на производство электроэнергии на АЭС во всем мире и его будущие перспективы. Бюллетень МАГАТЭ 49-2, март 2008.
15. Беркович В.Я., Семченков Ю.М. Актуальные вопросы развития технологии ВВЭР / В.Я. Беркович // Десятая международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» АО «Концерн Росэнергоатом». - Москва. - 2016.
16. Operating experience with Nuclear power Stations in Member States 2024 Edition // IAEA. Vienna. – 2024. P. 1518
17. Асмолов В.Г. и др. Выбор буферного материала ловушки для удержания расплава активной зоны ВВЭР-1000. / В.Г. Асмолов // Атомная Энергия. - 2002. - т. 92 (1) - С. 7-18.
18. Бешта С.В. и др. Формирование ванны расплава активной зоны ядерного реактора в ловушке тигельного типа для АЭС с ВВЭР. / С.В. Бешта // Теплоэнергетика. - 2011. - № 5 - С. 61-65.
19. Шаповаленко В.В. и др. Каким быть ядерному топливу в новых проектах ВВЭР ? / В.В. Шаповаленко // Энергетические установки и технологии. - 2020. – т. 6(1) - С. 40-45.
20. Герасимчук О.Г., Орлов В.И., Украинцев В.Ф. Анализ характеристик топливных циклов повышенной длительности для реакторов ВВЭР / О.Г. Герсимчук // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2002. - № 3. - С. 88-94.
21. Семченков Ю. Использование топлива в реакторах ВВЭР: состояние и перспективы. / Ю. Семченков // РЭА. - 2014. - № 11 - С. 8-13.
22. Асмолов В.Г. Мы накопили огромную базу знаний о технологии ВВЭР и готовы к новому шагу вперед. / В.Г. Асмолов // Вестник Атомпрома. – 2024. - № 5. С. 6-13.
23. Игнатенко Е.И., Пыткин Ю.Н. Борное регулирование ВВЭР при работе с переменными нагрузками. / Е.И. Игнатенко // Атомная энергия. - 1979. - т. 47(6). - С. 393-394.

24. Алексеев Н.Н. Борное регулирование. / Н.Н. Алексеев // 5-й Межд. форум «Интеллектуальные энергосистемы». Томск. - 2017, 9-13 октября. С. 79 - 82.
25. Астахов С.А. и др. Результаты исследования коэффициентов реактивности активной зоны ВВЭР-1000 / С.А. Астахов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. - 1987. - вып. 8. - С. 66-69.
26. Авраменко В.А. и др. Современные технологии в практике обращения с «проблемными» ЖРО в дальневосточном регионе как перспектива для Фукусима-1 / В.А. Авраменко // Современные научноемкие технологии. – 2016. - № 10. - С. 9 – 18.
27. Федотов М.А. и др. Совместная утилизация красных шламов и борсодержащих жидких радиоактивных отходов атомных электростанций / М.А. Федотов // Четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии». Москва. – 2018, 27-30 ноября. - т. 3. - С. 514 - 518.
28. Аvezniazov C.R. и др. Опыт работы по обращению с ЖРО на Кольской АЭС / С.Р. Авениязов // Радиоактивные отходы. - 2018. - № 4(5). - С. 49-54.
29. Freixa J., Reventos F., Pretel C. et.al. SBLOCA with boron dilution in pressurized water reactors. Impact on operation and safety. / J. Freixa // J. Nucl. Engng. Des. – 2009.- v. 239. - P. 749 - 760.
30. Пономаренко В.Б., Пославский А.О., Чернышев В.М. и др. Органы регулирования и СВП ядерных реакторов ВВЭР-1000 и пути их усовершенствования. / В.Б. Пономаренко // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 1994. - вып. 2(62). 3(63). - С. 95-112.
31. Рисованый В.Д. Нервы реактора [электронный ресурс] https://atomicexpert.com/reactor_nerves (дата обращения: 15.11.2024).
32. Мирзаев М.Н., Мамедов Х.Ф. и др. Изучение термофизических свойств облученного ионизирующим изложением карбива бора. / М.Н. Мирзаев // Теплофизика высоких температур. - 2018. - т. 56(3). - С. 390-394.
33. Yilmaz S., Ivanov K., Levine S., Mahgerefteh M. Development of enriched Gd-155 and Gd-157 burnable poison designs for a PWR core. / S. Yilmaz // Ann. Nucl. Energy. - 2006. - v. 33(5). - P. 439-445.
34. Frybortova L. VVER-1000 fuel cycles analysis with different burnable absorbers. / L. Frybortova // Nuclear engineering and design. - 2019. - v. 351. - P. 167-174.

35. Лескин С.Т., Шелегов А.С., Слободчук В.И. Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР - 1000. / С.Т. Лескин // – М.: НИЯУ МИФИ. - 2011. – р. 116.
36. Баранов В.Ю. Изотопы: свойства, получение, применение. / В.Ю. Баранов // М.: ФИЗМАТЛИТ. - Том 2. - 2005. Р. 728.
37. Fedosov A.M. RBMK Uranium-Erbium Fuel / A.M. Fedosov // Atomic Energy. – 2018. - v. 124(4). – P. 221-226.
38. Tsyganov S.V., Kravchenko Yu.Ya, Kraynov Ya. A., Aleshin S.S., Alexeyev N.I., Gusev S.S., Kolokol A.S., Kuznetsov A.N., Lomakin I.G., Semchenkov Yu., M. Shkarovsky D.A. Experimental research and analysis of VVER fuel composition with erbium oxide absorbers / S.V. Tsyganov // Prog. In Nucl. Enegy. - 2022. v. 147. P. 104-117.
39. Leppänen J., Pusa M., Fridman E. Overview of methodology for spatial homogenization in the Serpent 2 Monte Carlo code. / J. Leppänen // Annals of Nuclear Energy. - v. 96. - p. 126-136.
40. Синегрибов С.В., Курындина А.В. Киркин А.М. Результаты расчета эффективного коэффициента размножения нейтронов различных бенчмарк экспериментов в рамках верификации SERPENT. / С.В. Синегрибов // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. -2016. – т.4(6). - с. 23-33.
41. Андрианова Е.А., Цыбульский Е.Ф. Повышение выгорания топлива с ВВЭР / Е.А. Андрианова // Атомная энергия. - 2008. - т. 104(3). - С. 137-141.
42. Кочуров Б.П. Оптимальный вывод реактора в стационарный режим перегрузки горючего. / Б.П. Кочуров // Атомная энергия. - 1974. - т. 37(1). - С. 66-68.
43. Горелов А.И., Лютов М.А. и др. Оптимизация перегрузок топлива реакторов РБМК. / А.И. Горелов // Атомная энергия. - 1990. - т. 68(3). - С. 159-163.
44. Доллежаль Н.А., Емельянов И.Я. Канальный ядерный энергетический реактор. / Н.А. Доллежаль // М.: Атомиздат. - 1980. Р. 208.
45. Семченков Ю., Павловичев А., Чибиняев А. Близость к сценарию. Перспективы эволюционного развития топлива ВВЭР. / Ю. Семченков // РЭА. - 2011. - № 10 - С. 25-29.
46. Семенов Е. Эволюция подходов к оценке экономической эффективности проектов АЭС. / Е. Семенов // Энергетическая политика. - 2024. - № 9(200). - С. 66-81.

47. Харитонов В.В., Боков А.В., Костерин Н.Н. Эффективность и риск инвестиций в ядерную энергетику. / В.В. Харитонов // Атомная энергия. - 2017. - т. 122(6). - С. 339-348.
48. Пресс-центр ГК Росатом. Как новое топливо улучшает эффективность работы АЭС [электронный ресурс] <https://rosatom-centralasia.com/journalist/smi-about-industry/kak-novoe-toplivo-uluchshaet-effektivnost-raboty-aes/> (дата обращения: 21.11.2024).
49. Савандер В.И., Альассаф С.Х. Анализ эффективности применения удлиненных кампаний на зарубежных АЭС с реакторами типа ВВЭР // Ядерная физика и инжиниринг Том 10, № 1, 2019 г. стр.5-8.
50. Rosatom Newsletter № 273, ноябрь 2023. Новое слово реакторной классики [электронный ресурс] <https://rosatomnewsletter.com/ru/2023/11/29/fresh-look-at-reactor-classics/?ysclid=m2mfhvzf25162640065> (дата обращения: 25.11.2024).
51. Горохов А.К., Драгунов Ю.Г., Лунин Г.Л. Обоснование нейтронно-физической и радиационной частей проектов ВВЭР: монография. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 496 с.
52. Алексеев Н.Н. Борное регулирование. — В сб.: 5-й Меж. форум «Интеллектуальные энергосистемы». Томск, 9—13 октября 2017 г. Томск, 2017, с. 79—82.
53. Питык А.В., Морозов А.В. и др. Экспериментальное исследование растворимости борной кислоты в кипящем паре при атмосферном давлении / А.В. Питык // Известия вузов. Ядерная энергетика № 1, 2019 г. стр.30-40.
54. Мерзликин Г.Я. Основы теории ядерных реакторов. *Курс для эксплуатационного персонала АЭС* / Г.Я. Мерзликин // Севастополь.: СИЯЭиП. - 2001. Р. 343.
55. Муратов О.Э., Тихонов М.Н. Радиоэкологические аспекты обращения с РАО и ОЯТ в условиях инновационного развития ядерной энергетики [электронный ресурс] <https://nuclear-submarine-decommissioning.ru/node/755>
56. Богданов К.М. Биофизические закономерности обмена тиритиевой воды в организме. М.: Энергоиздат, 1981. 136 с.
57. Fairlie I. Tritium Hazard Report: Pollution and Radiation Risk from Canadian Nuclear Facilities. Greenpeace. June 2007. 92 p.
58. Ивахнюк Г.К., Пименова М.А., Сай А.Р. Перспективы увеличения глобальной радиационной нагрузки от техногенного трития / Г.К. Ивахнюк // XX Международная научно-практическая конференция по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций «Глобальная и

национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий» Сборник трудов. -М.: МЧС. 2015, С. 549-551.

59. Малютин А.В. Проблемы безопасности и надежности в процессе коммуникации человека и ядерной энергетической установки (на примере водоочистки первого контура атомного реактора АЭС) / А.В. Малютин // Первая Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы социальной коммуникации» Сборник трудов. Нижний Новгород. - НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010, с. 269-270.
60. Hafez N., Shahbunder H., Amin E. and et. al. Study on criticality and reactivity coefficients of VVER-1200 reactor / N. Hafez // Prog. In Nucl. Energy. - 2021. v. 131. P. 1-16.
61. Faghihi F., Fadaie A.H., Sayareh R. Reactivity coefficients simulation of the Iranian VVER-1000 nuclear reactor using WIMS and CITATION codes / F. Faghihi // Prog. In Nucl. Energy. - 2007. v. 49. P. 68-78.
62. Зимин В.Г., Выговский С.Б., Семёнов А.А. и др. Расчетный анализ экспериментов по определению коэффициентов реактивности на ВВЭР-1000 3-го блока Калининской АЭС с помощью программного комплекса ПРОСТОР. / В.Г. Зимин // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. - 2013. - вып. 4. - С. 34-45.
63. Асхадуллин С.Р., Милинчук В.К., Эпштейн Н.Б. Влияние борной кислоты на генерацию водорода гидрогетерогенными композициями с алюминием. / В.Г. Зимин // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы. - 2023. - вып. 2. - С. 166-172.
64. Семченков Ю. Использование топлива в реакторах ВВЭР: состояние и перспективы / журнал РЭА. – 2014. №11. -с.8 -13.
65. Джарум Б., Соловьев Д.А., Семенов А.А. и др. Разработка эвристики для повышения скорости алгоритма минимизации водообмена при управлении мощностью реактора ВВЭР-1200. / Б. Джарум, // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2020, вып. 3, с. 54—62.
66. Djaroum B., Solovyov D.A., Semyonov A.A. e. a. Water exchange amount reduction algorithm for power control of VVER-1200 reactor operating in load following mode. / B. Djaroum // J. Phys.: Conf. Ser., 2020, v. 1689, p. 1—13.
67. Джарум Б., Соловьев Д.А. Семенов А.А. и др. Применение эвристического алгоритма для решения задачи минимизации водообмена при управлении мощностью реактора ВВЭР-1000. / Б. Джарум // В сб.: 8-я Межд. конф. «Современные проблемы физики и технологий». Москва, 15—20 апреля 2019 г. М., НИЯУ МИФИ, 2019, с. 116—117.

68. Fiorini G., Gautier G., Bergamaschi Y. Feasibility studies of a soluble boron-free 900-MW (electric) PWR, safety systems: consequences of the partial or total elimination of soluble boron on plant safety and plant systems architecture. / G. Fiorini // Nucl. Techn., 1999, № 127, p. 239—258.
69. Thomet P. Feasibility studies of a soluble boron-free 900-MW (electric) PWR, Core Physics-I: Motivations Assembly Design, and Core Control / P. Thomet // Nucl. Techn., 1999, № 127(3), p. 259—266.
70. Galperin A., Segev M., Radkowsky A. Substitution of the soluble boron reactivity control system of a pressurized water reactor by gadolinium burnable poison / A. Galperin // Nucl. Techn., 1986, v. 75, p. 127—133.
71. Hwanyeal Y., Mohd-Syukri Y., Yonghee K. A reduced-boron OPR1000 core based on the BigT burnable absorber / Y. Hwanyeal // Nucl. Engng. Techn., 2016, v. 48, p. 318—329.
72. Khalefih H., Kim Y. Feasibility study of a two-batch soluble boron free APR 1400 reactor / H. Khaleif // Transactions of the Korean nuclear society virtual spring meeting. 2021 13-14 may. p.1-5.
73. Daing A.T., Kim M.H. Feasibility of reduced-boron concentration operation in pressurized reactor plants / A.T. Kim // Nucl. Techn., 2011, 176(1), p. 40—56.
74. Kim J.Ch., Kim M.H. et. al. Nuclear design feasibility of soluble boron free PWR core/ J.Ch. Kim // Nucl. Engng. Techn., 1998, 30(4), p. 342—352.
75. Багерман М.Р. Онуфриенко С.В. и др. Решения по минимизации образования, организации сбора и переработке жидких радиоактивных сред в проекте АЭС нового поколения с ВВЭР-640 / М.Р. Багерман // Теплоэнергетика, 1995, №12, с. 28-31.
76. Адамов Е.О. и др. Машиностроение. Энциклопедия. М.: Машиностроение, 2005. 960 с.
77. Забродская С. и др. Энциклопедия нейтронных данных. РОСФОНД. ФГУП ГНЦ РФ ФЭИ. Обнинск, 2006. 300 с.
78. Khrais R.A., Tikhomirov G.V., Saldikov I.S. and Smirnov A.D. Neutronic analysis of VVER-1000 fuel assembly with different types of burnable absorbers using Monte-Carlo code Serpent. / R.A. Khrais // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1189 (2019). – P. 1-14.
79. Khoshaval F., Foroutan Sh. Sh., Zolfaghari A., Minuchehr H. Evaluation of burnable absorber rods effect on neutronic performance in fuel assembly of WWER-1000 reactor. / F. Khoshval // Annals of nuclear Energy. – 2016. – Volume 87. – P.648-658.

80. Демин, В.М. Влияние выгорающих поглотителей (GD и EU) на нейтронно физические характеристики ТВС реакторов ВВЭР-1000/ В.М. Демин // Ростовский научный журнал. – 2019. – № 3. – С. 262 – 272.
81. Абу Сондос М.А., Демин В.М., Савандер В.И. Сравнение влияния выгорающих поглотителей (Gd и Eu) на нейтронно-физические характеристики ТВС реакторов ВВЭР-1000 / М.А. Абу Сондос // Вестник НИЯУ МИФИ. – 2019. – №3. – с. 199 – 205.
82. Ермолин В.С., Окунев В.С. О размещении гадолиния в центральном отверстии ТВЭЛОВ водо-водяных реакторов / В.С. Ермолин // М.: МИФИ, Научная сессия МИФИ-2008. т. 1, стр. 101- 102.
83. Абу Сондос, М.А., Демин В.М., Савандер В.И. Снижение объема борного регулирования запаса реактивности при использовании выгорающего поглотителя на основе (GD₂O₃) в топливе реактора ВВЭР-1200 / М.А. Абу Сондос // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 3(32). – С. 56.
84. Tran H. Hoang H., Liem P.H. Feasibility of using Gd₂O₃ particles in VVER-1000 fuel assembly for controlling excess reactivity // Energy Procedia. 2017. Vol. 131. P. 29-36.
85. Balestieri D.A. Study of UO₂/Gd₂O₃ Composite fuel. IAEA-TECDOC-1036. Vienna (Austria). 1998. P. 63-72.
86. Быстриков А.А., Егоров А.К., и др. Опыт использования уран-эрбьевого топлива на энергоблоках с РБМК-1000 / А.А. Быстриков // Атомная энергия. - 2006. - т. 100(3). - С. 165-170.
87. Frybortova L. Recommended strategy and limitations of burnable absorbers used in VVER fuel assemblies / L. Frybortova // Nucl. Sci. tech. 2019. Vol. 30. Issue 129. P.1-14
88. Pavlovichev A., Kosourov E., Shcherenko A., Saprykin V. Lazarenko A., Aleshin S. Use of erbium as burnable poison for VVER reactors / A. Pavlovichev // Kerntechnik. 2013. Vol. 78. Issue 4.
89. Jeong E., Shin H.Ch. et. al. Impact of erbia in long cycle operation of PWR / E. Jeong // Transactions of the Korean nuclear society virtual spring meeting. 2016 27-28 October. p.1-3.
90. Franceschini F., Petrovic B. Fuel with advanced burnable absorbers design for the IRIS reactor core: combined erbia and IFBA / F. Franceschini // Annals of nuclear energy. 2009. v.36. p. 1201-1207.
91. Альассаф, С.Х. Использование эрбия в качестве выгорающего поглотителя в реакторах типа ВВЭР при работе на удлиненных кампаниях / С. Х. Альассаф

// Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2020. – № 3. – С. 62-71.

92. Chadwick M.B., Herman M., Oblozinsky P. et. al. ENDF/B-VII.1 Nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data / M.B. Chadwick // Nuclear data sheets. 2011. v.112(12). – P. 2887 - 2996.
93. Refeat R. Optimum erbium isotopes composition and distribution for power flattening an advanced PWR fuel assembly / R. Refeat // Journal of material science and engineering. 2015. v.6. p.85-93.
94. Федосов А.М. Уран-эрбиеевое топливо РБМК / А.М. Федосов // Атомная энергия. - 2018. - т. 124(4). - С. 193-197.
95. Reda S.M., Mustafa S.S., Elkhawas N.A. Investigating the performance and safety features of pressurized water reactors using the burnable poisons / S.M. Reda // Annals of nuclear energy. 2020. v.141. p.1-10.
96. Alekseev P.N., Bobrov E.A., Chibinyaev A.V., Teplov P.S., Dudnikov A.A. Multiple recycle of REMIX fuel at VVER-100 operation in closed fuel cycle / P.N. Alekseev // Physics of Atomic Nuclei. 2016. № 78. p.1264-1273.
97. Papi Z., Khoshval F., Pour-Imani R. Advanced fuel and burnable absorbers designed for long-cycle operation of BNPP / Z. Papi // Radiation physics and chemistry. 2023. v.206. p.2-11.
98. Mustafa S.S. Neutronic investigation of enriched gadolinium, natural gadolinium and zirconium-erbium as burnable poisons in the advanced PWR assemblies by MCNPX code / S.S. Mustafa // Radiation physics and chemistry. 2023. v.212. p.2-20.
99. Nabila U.M. et. al. An approach to minimize reactivity penalty of Gd_2O_3 burnable absorber at the early stage of fuel burnup in Pressurized Water Reactor / M.N. Umme // Nuclear engineering and technology. 2022. v.54, issue 9. p.3516-3525.
100. Пономаренко В.Б., Посговаров И.О., Ряховских В.И. и др. Органы регулирования ядерных реакторов с двухцелевыми пэлами на основе кобальта, оксида европия или композиции. $\text{Co}+\text{Eu}_2\text{O}_3$ // Третья Межотраслевая конференция по реакторному материаловедению. Димитровград, 27-30 октября 1992г.: Сборник докладов. Димитровград: НИИАР, 1994. Т.2. С. 166-182.
101. Galahom A.A. Investigation of different burnable absorbers effects on the neutronic characteristics of PWR assembly / A.A. Galahom // Annals of nuclear energy. 2016. v.94. p.22-31.

102. Пономаренко В.Б. и др. Органы регулирования и СВП ядерных реакторов ВВЭР-1000 и пути их усовершенствования / В.Б. Пономаренко // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 1994. вып. 2(62) С. 95 – 113.
103. Пономаренко В.Б. и др. Комбинированные поглощающие элементы реакторов типа ВВЭР-1000, БПБР, ВВЭР-500 (600) с повышенным сроком службы / В.Б. Пономаренко // Третья Межотраслевая конференция по реакторному материаловедению. (Димитровград, 27-30 октябрь 1992 г.) / НИИАР. – Димитровград, 1994. Т2. С. 157 – 166.
104. Zakharov A.V. et. al. Irradiation behavior of boron carbide in reactors WWER-1000 / A.V. Zakharov // IAEA technical committee meeting on “Control assembly materials for water reactors: experience, performance and perspectives”. Vienna, Austria, 12 th to 15 th October, 1998. p. 167-174.
105. Котельников Ю.Т. Современное состояние проблем поглощающих материалов для ядерных реакторов различного назначения / Ю.Т. Котельников // Третья Межотраслевая конференция по реакторному материаловедению. (Димитровград, 27-30 октябрь 1992 г.) Сборник докладов. Димитровград, НИИАР, 1994. Т.1. С. 12 – 25.
106. Ряховских В.И. и др. Современное состояние разработки и производства органов регулирования ядерных реакторов ВВЭР-1000 / В.Б. Пономаренко // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 1997. вып. 1(65) С. 110 – 118.
107. Кузнецов С.А., Пономаренко В.Б., Меламед В.Е. и др. Радиационная стойкость поглощающих материалов для регулирующих органов системы управления и защиты ядерных реакторов АЭС / С.А. Кузнецов // Радиационное материаловедение (Труды Международной конференции по радиационному материаловедению, Алушта, 22-25 мая 1990г.). Харьков: ХФТИ, 1991. Т.3. С.189-198.
108. Конотоп, Ю. Ф. Современное состояние проблемы поглощающих нейтроны материалов и изделий на их основе для реакторов типа ВВЭР-1000: Аналитический обзор / Ю. Ф. Конотоп, Н. П. Одайчук, В. С. Красноруцкий.– Харьков : ННЦ ХФТИ, 1998. – 68 с.
109. Рисованый В.Д. Кому нужен изотоп 10B? [электронный ресурс] <https://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=801>
110. Рисованый В.Д. Нервы реактора. Атомный эксперт [электронный ресурс] https://atomicexpert.com/reactor_nerves?ysclid=m3029h7aqc858090917

111. Рисованый В.Д. и др. Поглощающие материалы и органы регулирования ядерных реакторов / В.Д. Рисованый // Монография. Издательский дом «МЭИ». 2012. 392 с.
112. Risovaniy V.D., Zakharov A.V., Klochkov E.P. et al. Dysprosium and hafnium based absorbers for advanced WWER control rods/ V.D. Risovaniy / IAEA technical committee meeting on “Control assembly materials for water reactors: experience, performance and perspectives”. Vienna, Austria, 12 th to 15 th October, 1998. p. 167-174.
113. Элазака А.И., Тихомиров Г.В. Потенциал спектрального регулирования ВВЭР с учетом выгорания топлива / А.И. Элазака // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2020. №2. с. 27-38.
114. Элазака А.И. и др. Сравнительная оценка диапазона спектрального регулирования запаса реактивности в реакторах с водой под давлением с помощью циркониевых вытеснителей для уранового и ториевого топливных циклов / А.И. Элазака // Глобальная ядерная безопасность. 2021. №2. с. 58-67.
115. Белоусов Н.И. и др. Расчетно-теоретический анализ эффективности применения спектрального регулирования запаса реактивности в реакторах типа ВВЭР / Н.И. Белоусов // Ядерная физика и инжиниринг. 2012. Т.3. №1, с.67-73.
116. Leppänen J. et al. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013 / J. Leppänen // Ann. Nucl. Energy. 2015. Vol. 82. P. 142–150.
117. Chersola D. et. al. Application of Serpent 2 and MCNP6 to study different criticality configurations of a VVER-1000 mock-up / D. Chersola // Ann. Nucl. Energy. 2014. v. 94. P. 109-122.
118. Строганов А.А. и др. Результаты верификации программного средства PSG2/Serpent для расчета эффективного коэффициента размножения уран-водных систем / А.А. Строганов // Ядерная и радиационная безопасность. № 4(66). 2012. с.1-5.
119. Синегрибов С.В. и др. Результаты расчета эффективного коэффициента размножения нейtronов различных бенчмарк-экспериментов в рамках верификации SERPENT / С.В. Синегрибов // Технология обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. № 4(6). 2016. с.23-33.
120. Ilkovych V.V. VVER-1000 reactor model using the Serpent 2 code for core power distribution calculation. Nuclear physics and atomic energy. 2023. 24(4). p. 344-350.

121. Thilagam L. et al. A VVER-1000 LEU and MOX assembly computational benchmark analysis using the lattice burnup code EXCEL / L. Thilagam // Ann. Nucl. Energy. Elsevier Ltd, 2009. Vol. 36, № 4. P. 505–519.
122. Энергия роста материалы АО «ТВЭЛ» [электронный ресурс] [3ff2896a9172663b99d2a71ff5a57d3e.pdf](https://www.tvel.ru/_api/files/3ff2896a9172663b99d2a71ff5a57d3e.pdf) (дата обращения: 15.12.2024).
123. Hossain I. et al. Neutronics and burnup analysis of VVER-1000 LEU and MOX assembly computational benchmark using OpenMC code / I. Hossain // Nuclear Energy and Technology. 2022. Vol. 8, № 1. P. 1–11.
124. Белоусов Н.И., Пряничников А.В., Бычков С.А. Использование метода вероятностей первых столкновений для расчета ячеек реакторов со сложной геометрией. / Н.И. Белоусов // Инженерная физика, 2002, вып. 4. С.15-18.
125. Савандер В.И. и др. Оценка эффективности спектрального регулирования запаса реактивности реактора типа ВВЭР-1000 при работе в замкнутом топливном цикле / В.И. Савандер // Вестник НИЯУ МИФИ. т.2. № 3. 2013. с.371-375.
126. Курындин А.В. Информационная система поддержки принятия регулирующих решений при транспортировании ОЯТ реакторов типа ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и РБМК-1000.: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14.03: защищена 19.03.2014 / Антон Владимирович Курындин – М.: 2013. 109 с.
127. Мантуров Г.Н. и др. Требования к точности расчета нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов-размножителей и пути их удовлетворения / Г.Н. Мантуров // Атомная энергия. т.67. вып. 3. 1989. с.181-186.
128. Межуев В.А. и др. Некоторые аспекты конструкции и технологии изготовления ТВС энергетических реакторов с увеличенным ресурсом и повышенной надежностью / В.А. Межуев // Атомная энергия. т.84. вып. 2. 1998. с.123-131.
129. Цены на редкоземельные металлы. Институт редкоземельных элементов и стратегических металлов. (цены представлены на 2020 г.) [электронный ресурс] <https://web.archive.org/web/20200204143305/https://en.institut-selene-erden.de/rare-earth-prices-in-february-2020/> (дата обращения: 10.01.2025).
130. Махова В.А. и др. Использование редкоземельных элементов в качестве выгорающих поглотителей для реакторов PWR во Франции / В.А. Махова // Атомная техника за рубежом. № 11. 1997. с.3-7.
131. Скотт-Кравчик Б. Служба топлива и его обслуживание в Соединенных Штатах / Б. Скотт-Кравчик // Атомная техника за рубежом. № 9. 1995. с.20-25.

132. Brown A., Glaser A. On the origins and significance of the limit demarcating low-enriched uranium from highly enriched uranium / A. Brown // Science and global security. 2016. V.24. № 2. p. 131-137.