

Министерство образования и науки Украины  
Одесский национальный политехнический университет

На правах рукописи

**ГОНТАРЬ РОМАН ЛЕОНИДОВИЧ**

УДК 621.039.516.4

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА  
АЭС С ВВЭР-1000**

Специальность 05.14.14 – тепловые и ядерные энергоустановки

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –  
Пелых Сергей Николаевич,  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник

Одесса–2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
РАЗДЕЛ 1. Анализ современных методов определения свойств ТВС ВВЭР-1000.....	14
1.1. Описание активной зоны реактора ВВЭР-1000 как объекта управ- ления.....	14
1.2. Анализ известных методов контроля герметичности оболоч- чек.....	15
1.2.1. Метод непрямого измерения утечки реперных радионуклидов из негерметичных ТВЭЛОВ .....	16
1.2.2. Метод акустического контроля герметичности оболочек ТВЭЛОВ	17
1.2.3. Сиппинг-метод контроля герметичности оболочек ТВЭЛОВ.....	18
1.2.4. Метод реконструктивной алгебраической пассивной томогра- фии.....	20
1.3. Безопасность эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 в маневренном ре- жиме.....	23
1.4. Ограничения при проектировании и эксплуатации топливных за- грузок ВВЭР-1000.....	26
1.5. Оценка влияния режима работы реактора на эффективность топ- ливных циклов ВВЭР-1000.....	28
1.5.1. Критерии эффективного использования ядерного топлива.....	29
1.5.2. Экономические аспекты повышения устойчивости нейтронного поля и его влияние на безопасность.....	35
1.6. Существующая материально-информационная схема движения ядерного топлива.....	36
1.7. Влияние изменения температуры теплоносителя на входе в ак- тивную зону реактора на равномерность энерговыделения.....	38
1.8. Управление мощностью реактора ВВЭР-1000.....	40

1.9. Постановка цели и задач диссертационного исследования.....	41
1.10. Выводы по первому разделу.....	42
РАЗДЕЛ 2. Имитационное моделирование свойств ядерного топлива.....	44
2.1. Основные факторы, влияющие на изменение свойств ядерного топлива.....	44
2.1.1. Модель перестановок ТВС в АКЗ.....	46
2.1.2. Модель изменения энерговыделения по высоте твэла.....	47
2.1.3. Модель изменения глубины выгорания ядерного топлива по высоте АКЗ.....	49
2.2. Анализ механического взаимодействия между топливом и оболочкой.....	52
2.3. Анализ известных критериев поврежденности оболочки твэла....	53
2.3.1. Нормативные критерии приемки твэлов прочностной группы...	53
2.3.2. ЭВТП-критерий долговечности оболочки твэла.....	56
2.4. Соотношение для скорости деформации ползучести оболочки....	58
2.5. Замыкающие соотношения для расчета свойств ядерного топлива ВВЭР-1000.....	60
2.6. Входные данные модели расчета поврежденности оболочки.....	60
2.7. Программное средство для анализа развития напряженно-деформированного состояния в оболочке.....	61
2.8. Алгоритм расчета свойств ядерного топлива.....	61
2.9. Выводы по второму разделу.....	63
РАЗДЕЛ 3. Определение эффективности эксплуатации ядерного топлива в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000.....	64
3.1. Модель эффективности управления свойствами твэлов.....	64
3.2. Исследование закономерностей изменения со временем аксиальных профилей поврежденности оболочки и глубины выгорания твэла	65
3.3. Расчет эффективности эксплуатации ядерного топлива в суточном режиме нагружения РУ с ВВЭР-1000.....	69

3.4. Сравнительный анализ изменения аксиальных профилей поврежденности оболочки ТВЭЛ и глубины выгорания ЯТ в различных режимах нагружения РУ с ВВЭР-1000.....	71
3.4.1. Базовый режим эксплуатации РУ с ВВЭР-1000.....	71
3.4.2. Суточный цикл переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000.....	73
3.4.3. Недельный цикл переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000.....	75
3.4.4. Комбинированный цикл переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000.....	76
3.5. Выводы по третьему разделу.....	78
<b>РАЗДЕЛ 4. Разработка основ автоматизированной эксплуатации ядерного топлива в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000.....</b>	<b>81</b>
4.1. Описание автоматизированной системы управления свойствами ядерного топлива.....	81
4.2. Основы автоматизированного управления выгоранием ядерного топлива.....	83
4.3. Передаточные функции системы управления.....	85
4.4. Автоматизированная система управления свойствами ядерного топлива.....	91
4.4.1. Основы автоматизированного управления свойствами ядерного топлива.....	91
4.4.2. Блок формирования задания.....	92
4.4.3. Объект управления.....	93
4.4.4. Структурная схема автоматизированной системы управления свойствами ядерного топлива.....	95
4.4.5. Контроль герметичности оболочек.....	98
4.4.6. Материально-информационная схема движения ядерного топлива.....	100
4.5. Метод идентификации пригодных к эксплуатации ТВС с применением коллиматора детектора.....	103
4.6. Математическая модель коллиматора детектора.....	105

4.7. Идентификация твэлов, попавших под облучение коллиматора детектора.....	106
4.8. Расчёт ослабления $\gamma$ -излучения в твэлах на пути к коллиматору детектора.....	107
4.9. Выводы по четвертому разделу.....	111
<b>ВЫВОДЫ</b> .....	114
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	115
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ. Документы о внедрении</b> .....	127

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АКЗ – активная зона;
- АО – аксиальный офсет;
- АРМ – автоматический регулятор мощности;
- АСУ – автоматизированная система управления;
- ГЦН – главный циркуляционный насос;
- КИУМ – коэффициент использования установленной мощности;
- КРН – коррозионное растрескивание под напряжением;
- МВТО – механическое взаимодействие между топливом и оболочкой;
- МКР – мощностной коэффициент реактивности;
- МКЭ – метод конечных элементов;
- МЭР – мощностной эффект реактивности;
- НФХ – нейтронно-физические характеристики;
- ОР СУЗ – органы регулирования системы управления и защиты;
- ОЭС – объединенная энергетическая система;
- ПГ – парогенератор;
- ПД – продукты деления;
- ПС – программное средство;
- РУ – реакторная установка;
- СБР – система борного регулирования;
- ТАУ – теория автоматического управления;
- ТВС – тепловыделяющая сборка;
- ТКР – температурный коэффициент реактивности;
- ТРБ – технологический регламент безопасности;
- ТЭР – температурный эффект реактивности;
- ЯТ – ядерное топливо;
- ЯЭУ – ядерная энергетическая установка;
- МП – машина перегрузочная;

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы.* В настоящее время на АЭС производится около 50 % от общей генерации электроэнергии в Украине. Согласно оценке развития атомной энергетики Украины на перспективу, реакторные установки (РУ) с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) будут обеспечивать половину производства электроэнергии в стране вплоть до 2050 г. При этом будет необходимо участие АЭС в регулировании объединенной энергосистемы (ОЭС) Украины [1].

Из 15 действующих энергоблоков НАЭК «Энергоатом» 13 энергоблоков созданы на основе реактора типа ВВЭР-1000. В настоящее время РУ с ВВЭР-1000 эксплуатируются в проектном, т.е. базовом режиме – преимущественно на постоянном уровне мощности 100 % от номинала.

Необходимость эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 в маневренном режиме следует из весьма значительной доли выработки электроэнергии реакторами этого типа, а также из необходимости адаптации энергоблоков АЭС к условиям работы в современных и перспективных энергосистемах [2].

Эти условия состоят в том, что если доля выработки электроэнергии на АЭС в ОЭС близка к 50 % и сокращается доля электрогенерирующих установок, работающих в полупиковом режиме, то нарушается баланс между выработкой и потреблением электроэнергии в ОЭС [3].

Согласно регламенту, энергоблок с ВВЭР-1000 допустимо эксплуатировать в маневренном режиме, если это не снижает надежность, безопасность и экономическую эффективность эксплуатации РУ.

Поскольку новые полупиковые генерирующие мощности своевременно не вводятся в эксплуатацию, необходимо участие уже существующих ядерных энергоустановок (ЯЭУ) в регулировании частоты и мощности в ОЭС страны.

Важно отметить, что оборудование первого контура РУ с ВВЭР-1000 (В-320) рассчитано на возможность эксплуатации в режиме регулирования частоты и мощности в ОЭС с допусаемым количеством циклов набора и снижения нагрузки, равным 10000 в пределах регулировочного диапазона 30–100 % от номинальной мощности [4].

Диссертационная работа направлена на решение научной задачи, состоящей в поиске закономерностей влияния постоянного изменения мощности РУ с ВВЭР-1000 на свойства ядерного топлива (ЯТ) при регламентных условиях эксплуатации тепловыделяющих сборок (ТВС).

Изменение параметра поврежденности  $\omega(\tau)$  оболочек твэлов при нормальных условиях эксплуатации реактора ВВЭР-1000 ограничивается Правилами ядерной безопасности РУ АЭС [5].

Однако, на АЭС НАЭК «Энергоатом» не внедрено стандартных методов расчета величины поврежденности  $\omega(\tau)$ , накопленной на текущий момент времени, а также на момент разгерметизации оболочек твэлов, принимая во внимание историю нагружения конкретной ТВС, т.е. точную последовательность совокупностей эксплуатационных параметров, определяющих величину  $\omega(\tau)$  для данной ТВС.

На действующих АЭС с ВВЭР-1000 НАЭК «Энергоатом» не внедрены технологии для локализации разгерметизированных оболочек твэлов в ТВС и локализации аксиальных сегментов (АС) оболочек твэлов, в которых произошла разгерметизация. Как следствие, невозможно учитывать влияние технологических процедур, например, алгоритма перестановок ТВС в активной зоне (АКЗ) на вероятность разгерметизации оболочек твэлов [6].

Поскольку процедуры текущего контроля накопленной деформационной поврежденности оболочек твэлов реактора ВВЭР-1000 не разработаны и не внедрены, в настоящее время на АЭС НАЭК «Энергоатом» с ВВЭР-1000 невозможно гарантировать поддержание свойств ЯТ в регламентных пределах.

С точки зрения системного подхода текущий контроль накопленной деформационной поврежденности оболочек твэлов является составной частью



контроля свойств ЯТ, неразрывно связанного с автоматизированным управлением свойствами ЯТ.

Для создания автоматизированной системы управления (АСУ) свойствами ЯТ ВВЭР-1000 необходимо разработать технологические основы автоматизированного управления свойствами ЯТ, что определяет актуальность диссертационной работы.

**Связь с научными программами.** Диссертационное исследование выполнено в соответствии с заданиями госбюджетных НИР № 645-47 "Изучение цикличности нагружения ВВЭР-1000 с целью определения эффективности управления ресурсом ядерного топлива при поддержании баланса мощности в энергосистеме" (№ ГР 0109U002620), № 649-135 "Изучение возможности нагрузки энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 до 110 % от номинала с целью определения момента граничного состояния защитных барьеров безопасности" (№ ГР 0109U008453).

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является повышение эффективности эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 путем создания технологических основ автоматизированного управления свойствами ядерного топлива, при его эксплуатации в переменном режиме нагружения.

Задачи исследования:

- анализ существующих методов определения свойств ядерного топлива во время регламентной эксплуатации ВВЭР-1000;
- разработка математической модели и метода расчета изменения со временем аксиальных профилей поврежденности оболочек ТВЭлов  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания ЯТ  $B_U(\tau)$  в зависимости от расположения ТВС, в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000;
- исследование закономерностей изменения со временем аксиальных профилей  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  в зависимости от расположения ТВС в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000;

– исследование зависимости достоверности измерения интенсивности  $\gamma$ -излучения облученной ТВС от величины угла облучения коллиматора детектора;

– разработка основ автоматизированного управления свойствами ядерного топлива для обеспечения безопасности и эффективности эксплуатации ВВЭР-1000.

**Объект исследования:** активная зона реактора ВВЭР-1000 в режиме переменной нагрузки.

**Предмет исследования:** модели и методы расчета свойств ядерного топлива реактора ВВЭР-1000 в режиме переменной нагрузки.

**Методы исследования:** энергетический вариант теории ползучести, моделирование изменения поврежденности оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  в зависимости от точной последовательности совокупностей эксплуатационных параметров, определяющих величину  $\omega(\tau)$  для усредненного твэла ТВС – позволили разработать модель и метод расчета изменения со временем аксиальных профилей  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  в зависимости от расположения ТВС в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000; компьютерное моделирование, методы имитационного моделирования и теории автоматического управления – позволили исследовать зависимость достоверности измерения  $\gamma$ -излучения облученной ТВС от величины угла облучения коллиматора детектора и разработать модель АСУ, функционирующей по методу регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе АКЗ ВВЭР-1000.

**Научная новизна результатов:**

– получила дальнейшее развитие распределенная модель изменения свойств АКЗ ВВЭР-1000 во времени, основанная на двухгрупповом диффузионном приближении нейтронного поля, отличающаяся тем, что для определения деформационной поврежденности оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  применяется модель, основанная на энергетическом варианте теории ползучести, что позволило разработать математическую модель и метод расчета изменения со временем аксиальных профилей  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания ЯТ  $B_U(\tau)$  с учетом

истории нагружения ТВС, для определения показателей безопасности и эффективности эксплуатации ЯТ в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000.

– на основе разработанных математической модели и метода расчета изменения со временем аксиальных профилей поврежденности оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания ЯТ  $B_U(\tau)$  с учетом истории нагружения ТВС, исследованы закономерности одновременного изменения  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$ , что позволило в единой расчетной модели определить аксиальные участки ТВС с наибольшими значениями  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000;

– получил дальнейшее развитие метод контроля герметичности оболочек твэлов, основанный на идентификации облученных ТВС с негерметичными оболочками твэлов методом томографии, отличающийся тем, что для выявления группы твэлов с наибольшей поврежденностью оболочек угол облучения коллиматора детектора изменяется, что повышает достоверность гistogramмы отклонений выборок активности топливных стержней твэлов, тем самым повышая достоверность идентификации негерметичных оболочек;

– впервые разработаны технологические основы автоматизированного управления свойствами ЯТ ВВЭР-1000 на базе автоматизированных систем управления выработкой электрической энергии и перегрузкой ЯТ, отличающиеся тем, что процессы эксплуатации и перегрузки ЯТ определяются через поврежденность оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  и глубину выгорания  $B_U(\tau)$  на основе системного подхода, что дает возможность одновременно контролировать характеристики, описывающие как безопасность, так и экономичность эксплуатации ЯТ в любом режиме нормальной эксплуатации ВВЭР-1000.

**Практическая ценность полученных результатов.** Разработанный метод расчета изменения со временем аксиальных профилей деформационной поврежденности оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания ЯТ  $B_U(\tau)$  в зависимости от расположения ТВС, в переменном режиме нагружения реактора ВВЭР-1000, позволил локализовать аксиальные сегменты усредненного по

ТВС твэла с наибольшими значениями  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$ . Разработанные технологические основы автоматизированного управления свойствами ЯТ позволяют внедрить в ГП НАЭК «Энергоатом» на АЭС с ВВЭР-1000 методику компьютерно-интегрированной оценки целесообразности дальнейшей эксплуатации ЯТ на основе одновременного учета величин  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$ , накопленных в результате реализованной последовательности совокупностей условий эксплуатации реактора. Усовершенствованный метод контроля герметичности оболочек (КГО) твэлов позволяет повысить качество идентификации и определения количества поврежденных твэлов облученных ТВС за счет выявления групп твэлов с наибольшей величиной  $\omega(\tau)$ . На основе результатов работы получен 1 патент Украины. Результаты внедрены в ГП НАЭК «Энергоатом» и в учебный процесс ОНПУ в дисциплинах «Идентификация и моделирование», «Теория автоматического управления», «Автоматизация технологических процессов и производств».

**Личный вклад соискателя.** Работа [7] выполнена единолично. В совместных публикациях соискателю принадлежит: [8] – разработка динамической библиотеки для моделирования процесса восстановления гамма-излучения; [9, 15, 16] – технологические основы автоматизированного управления свойствами ЯТ; [11] – определение зависимости достоверности идентификации разгерметизированных твэлов от величины угла облучения коллиматора детектора; [12] – моделирование изменения свойств ЯТ для разных алгоритмов маневрирования мощностью РУ; [10, 13–14] – расчет свойств ЯТ в переменном режиме нагружения РУ, определение аксиальных сегментов ТВС с максимальными значениями  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$ ; [17] – моделирование и расчет изменения свойств ЯТ при различных алгоритмах переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на конференциях и семинарах: «Современные информационные и электронные технологии», ОНПУ, 2010, Одесса; The 3rd International Conference “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy”, 2010, Kyiv, Ukraine; Ежегодная январская

научная конференция ИЯИ НАН Украины по итогам 2010 г., 2011, Киев; 7-я МНТК “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”, ОКБ “Гидропресс”, 2011, Подольск, Россия; Всероссийская НТК “Энергетика XXI века. Техника, экономика и подготовка кадров”, Уральский федеральный университет, 2011, Екатеринбург, Россия.

**Публикации.** По материалам диссертации сделано 12 публикаций, из них 8 статей — в научных изданиях, рекомендованных МОН Украины (2 статьи SCOPUS), 1 патент Украины на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, 49 рисунков, 9 таблиц, выводов, приложения, списка источников из 99 наименований. Объем основного текста диссертации — 114 с.

# РАЗДЕЛ 1

## АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ТВС ВВЭР-1000

### 1.1. Описание активной зоны реактора ВВЭР-1000 как объекта управления

В активной зоне реактора ВВЭР-1000 располагаются 163 тепловыделяющие сборки, каждая из которых размещается в шестигранной ячейке (рис. 1.1).

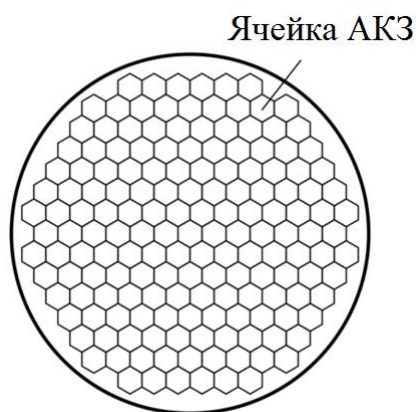


Рисунок 1.1 – Ячейки АКЗ реактора ВВЭР-1000

Тепловая энергия, выделяющаяся в АКЗ в результате деления ядер  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами, отводится за счет циркуляции теплоносителя, в качестве которого используется вода под давлением, в которой растворен концентрат борной кислоты [18, 19].

РУ с ВВЭР-1000 является сложной системой, состоящей из взаимосвязанных элементов, поэтому отклонение любого технологического параметра, описывающего состояние какого-либо элемента, неизбежно влечет изменение (в той или иной степени) других параметров, описывающих функционирование РУ [20, 21]. Особенность АКЗ ВВЭР-1000 как объекта управления

состоит в том, что ядерно-физические процессы, протекающие в АКЗ, взаимосвязаны с процессами в других элементах РУ.

Для АКЗ ВВЭР-1000 возможны внешние возмущения по следующим каналам: температура теплоносителя на входе в реактор, положение регулирующей группы органов регулирования (ОР) системы управления и защиты (СУЗ) реактора, концентрация борной кислоты в теплоносителе [22].

Например, ввод (вывод) регулирующей группы ОР СУЗ в (из) АКЗ приводит соответственно к снижению (увеличению) тепловой мощности реактора и к снижению (увеличению) температуры теплоносителя на выходе АКЗ реактора.

Кроме того, любое движение ОР СУЗ приводит к значительным отклонениям аксиального профиля энерговыделения в ячейках АКЗ, особенно в ячейках, прилегающих к тем ячейкам, в которых перемещаются поглощающие стержни регулирующей группы ОР.

Внешнее воздействие на АКЗ по каналу возмущения концентрации борной кислоты в теплоносителе влияет на основные технологические параметры ВВЭР-1000 аналогично перемещению регулирующей группы ОР СУЗ, но с большей инерционностью и без значительных отклонений линейной мощности в аксиальных сегментах твэлов [9, 15, 19].

## **1.2. Анализ известных методов контроля герметичности оболочек**

Известные методы контроля герметичности оболочек (КГО) твэлов ВВЭР-1000 основаны на расчете интенсивности утечки из негерметичных твэлов реперных радионуклидов I-131, Cs-134, Cs-137, являющихся продуктами деления U-235, на основе измерения после остановки реактора удельной радиоактивности пробы воды, при испытании ТВС в специальном стенде КГО.

Инициирование выхода радионуклидов I-131, Cs-134, Cs-137 в воду стенда КГО осуществляется за счет изменения давления воды, циркулирующей по контуру стенда в процессе выдержки ТВС (настаивания).

Выбор реперных радионуклидов обусловлен их ядерно-физическими характеристиками, позволяющими выявить ТВС с негерметичными твэлами (при КГО по I-131 – не позже 28 суток с момента остановки реактора, при КГО по Cs-134 или Cs-137 – не ранее 28 суток с момента остановки реактора).

### 1.2.1. Метод непрямого измерения утечки реперных радионуклидов из негерметичных твэлов

Испытания бесчехловых ТВС проводятся при циркуляции воды путем выдержки ТВС в течение 20 мин. при давлении 0,1 МПа – до полного перемешивания воды в стенде (рис. 1.2).

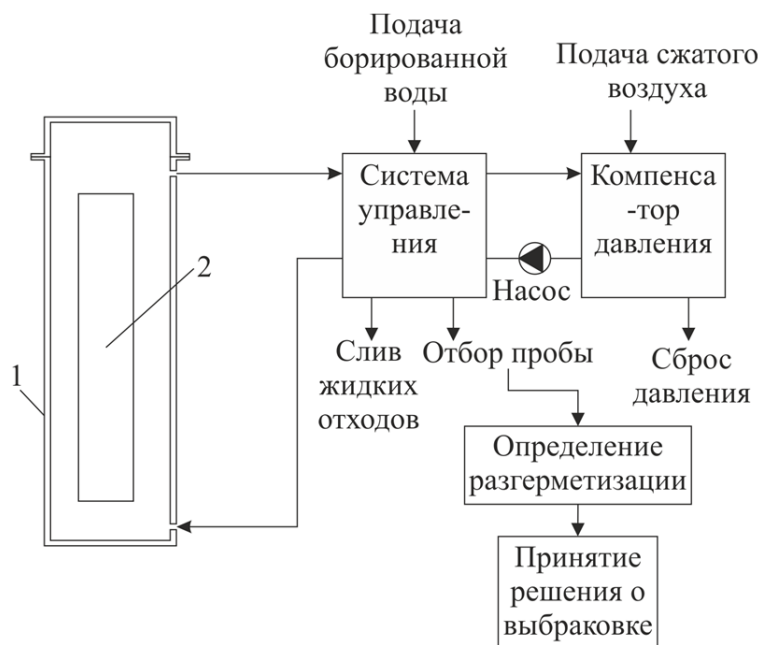


Рисунок 1.2 – Метод непрямого измерения утечки реперных радионуклидов из негерметичных твэлов под давлением:

1 – пенал; 2 – наблюдаемая ТВС



Испытания чехловых ТВС проводятся при циркуляции воды в стенде и состоят из двух этапов:

1) Выдержка ТВС в течение 5 мин. при давлении в контуре стенда 0,4...0,5 МПа;

2) Выдержка ТВС в течение времени, кратного периоду циркуляции воды в контуре стенда, но не менее 4 мин., при давлении 0,1 МПа.

Оценка значений удельной активности реперных радионуклидов выполняется с помощью спектрометрической установки [23].

Использование метода непрямого измерения утечки реперных радионуклидов из негерметичных твэлов при разработке технологических основ автоматизированного управления свойствами ядерного топлива АЭС с ВВЭР-1000 нецелесообразно ввиду таких присущих этому методу недостатков, как длительный простой энергоблока и невозможность точно локализовать места расположения повреждений в ТВС.

### **1.2.2. Метод акустического контроля герметичности оболочек твэлов**

В основу метода акустического контроля герметичности оболочек твэлов положен принцип регистрации и анализа распределения интенсивности звуковых колебаний, генерируемых истекающим теплоносителем, которые распространяются в воздушной среде. Регистрация акустических колебаний в пеналах с контролируемым оборудованием производится при помощи высокотемпературных микрофонов (рис. 1.3).

Определение расхода теплоносителя через течь осуществляется путем сравнения текущей величины звукового давления, генерируемого течью в месте истечения, с расчетно-эмпирической зависимостью, связывающей величину утечки и уровень генерируемого ею звука. Следует отметить легкость адаптации акустической подсистемы к возможным изменениям требований по ее чувствительности [24].

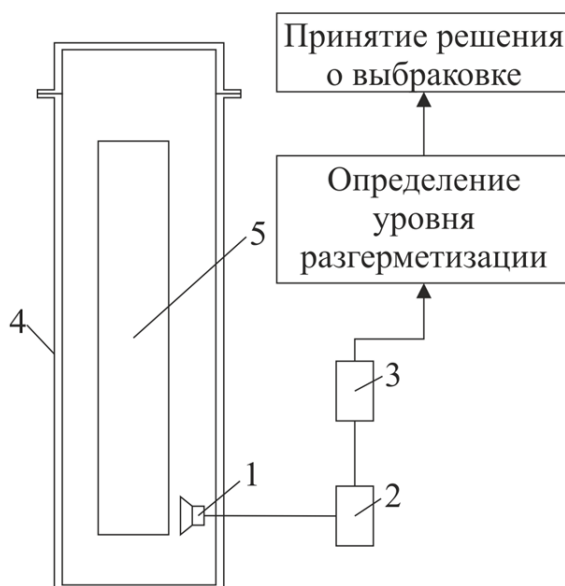


Рисунок 1.3 – Метод акустического КГО:

- 1 – акустический приемник; 2 – предварительный усилитель;  
3 – самописец; 4 – пенал; 5 – наблюдаемая ТВС

Преимуществами метода акустического КГО являются возможность локализации мест наиболее вероятного расположения течей и простота адаптации метода к требованиям по чувствительности.

Вместе с тем, применение метода акустического КГО для автоматизированного управления свойствами ЯТ ВВЭР-1000 нецелесообразно, поскольку данный метод не позволяет локализовать места наиболее вероятного расположения повреждений с достаточной точностью, не позволяет определить количество поврежденных твэлов, а также требует значительных временных затрат.

### 1.2.3. Сиппинг-метод контроля герметичности оболочек твэлов

Сиппинг-контроль осуществляется одновременно с перегрузкой ТВС. В соответствии с сиппинг-методом КГО, негерметичность оболочек твэлов в ТВС определяется при перемещении ТВС из АКЗ, без прерывания транспортно-технологических операций и без статистической обработки результатов измерений концентрации реперных радионуклидов.

Определение разгерметизации оболочек твэлов в ТВС основывается на измерении концентрации газообразных продуктов деления (ПД) Kr-85 и Xe-133, высвобождающихся из-под оболочек твэлов при извлечении ТВС из АКЗ. Газообразные ПД, используемые для оценки целостности оболочек твэлов, отбираются из рабочей штанги перегрузочной машины (рис. 1.4).

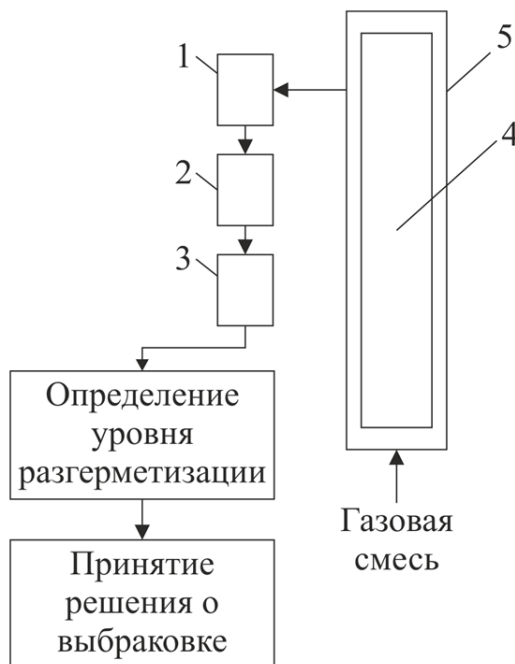


Рисунок 1.4 – Сиппинг-метод КГО твэлов: 1 – анализатор;  
2 – предварительный усилитель; 3 – самописец; 4 – наблюдаемая ТВС;  
5 – перегрузочная машина

При извлечении ТВС, из соответствующей ячейки АКЗ отбирается проба воды, которая направляется в блок дегазации. В блоке дегазации при поступлении пробы воды создается вакуум, который позволяет выделить Kr-85 и Xe-133 из воды. Выделяющиеся газы отводятся на бета-анализатор, измеряющий активность Kr-85 и Xe-133. Измерение проводится с помощью двух бета-радиометров с независимой регистрацией скорости бета-счета по каждому бета-радиометру. Регистрация показаний с помощью двух независимых бета-радиометров обеспечивает представительность измерений при КГО.

Сиппинг-метод КГО характеризуется такими преимуществами, как возможность проведения анализа в процессе перегрузки ТВС, что позволяет значительно сократить время простоя энергоблока.

Тем не менее, использование сиппинг-метода КГО в системе автоматизированного управления свойствами ЯТ ВВЭР-1000 нецелесообразно, поскольку данный метод не позволяет точно определить место расположения повреждений в ТВС, а также предполагает наличие у наблюдаемой ТВС кожуха (чехла). Условие наличия чехла у наблюдаемой ТВС делает данный метод неэффективным в случае бесчехловых ТВС, используемых в реакторе ВВЭР-1000.

#### 1.2.4. Метод реконструктивной алгебраической пассивной томографии

Метод реконструктивной алгебраической пассивной томографии позволяет при перегрузке ТВС оценить целостность оболочки каждого твэла путем измерения интенсивности  $\gamma$ -излучения твэлов при каждом положении детектора (рис. 1.5).

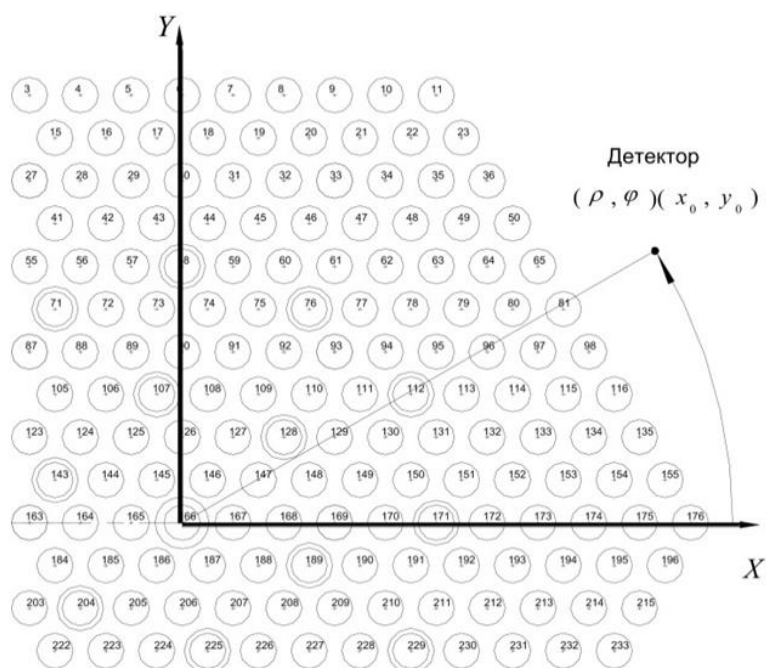


Рисунок 1.5 – Изменение угловой координаты детектора при измерении интенсивности  $\gamma$ -излучения твэлов

Для каждого положения детектора формируется замкнутая система уравнений с 331 неизвестной, количество неизвестных равно сумме числа ТВЭЛОВ (312) и числа каналов ОР СУЗ в ТВС (19).

Неизвестными являются восстанавливаемые значения активности реперного изотопа в ТВЭлах ТВС. Коэффициенты замкнутой системы уравнений определяются на основе интенсивностей  $\gamma$ -излучения, измеренных в 360 точках расположения детектора при неизменном расстоянии от оси ТВС до детектора [8].

Используется блок детектирования, включающий  $n$  детекторов, регистрирующих  $\gamma$ -излучение контролируемой ТВС при ее извлечении из АКЗ, с преобразованием полученных данных в электрический сигнал для последующей его передачи на многоканальный амплитудный анализатор. Амплитудный анализатор осуществляет функции накопления информации, поступающей от детекторов, ее обработки и передачи на ЭВМ в виде амплитудного распределения количества импульсов счета (первичного  $\gamma$ -спектра). В полученных спектрах находятся пики полного поглощения, определяется площадь каждого пика и интенсивность  $\gamma$ -излучения в нем, что позволяет определить глубину выгорания облученного ЯТ контролируемой ТВС [25, 26].

Блок детектирования расположен в непосредственной близости от объекта контроля – ТВС (рис. 1.6).

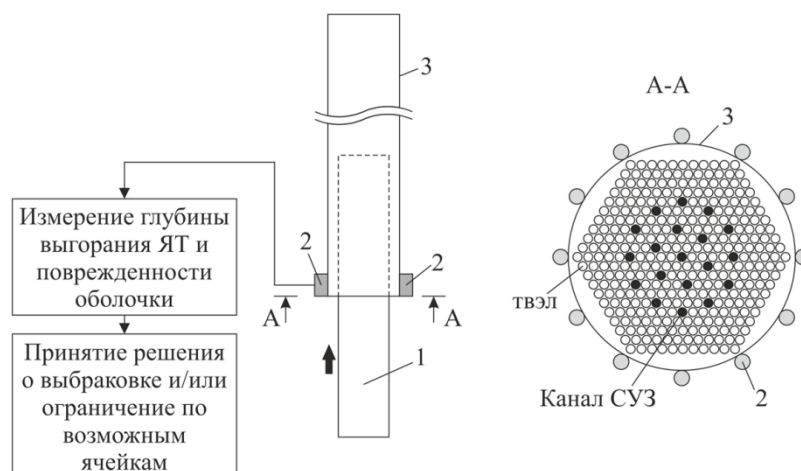


Рисунок 1.6 – Метод реконструктивной алгебраической пассивной томографии: 1 – контролируемая ТВС; 2 – детектор; 3 – перегрузочная машина

Размещение детекторов на рабочей штанге перегрузочной машины показано на рис. 1.7 [25].

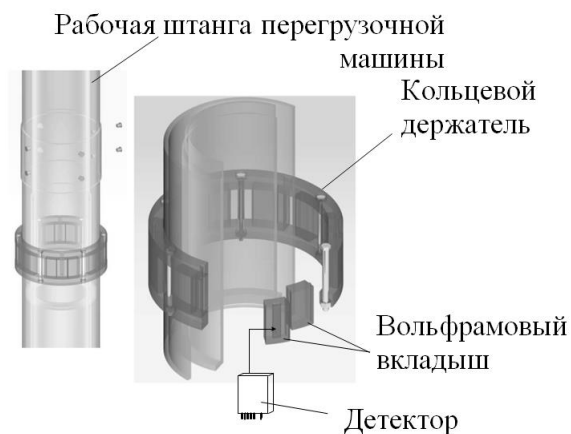


Рисунок 1.7 – Размещение детекторов перегрузочной машины

Структурная схема контроля состояния облученного ЯТ согласно методу пассивной томографии представлена на рис. 1.8 [9].



Рисунок 1.8 – Схема контроля состояния облученного ЯТ

Основным преимуществом метода реконструктивной алгебраической пассивной томографии является возможность контролировать состояние облученного ЯТ в режиме реального времени, а также высокая скорость проведения анализа.

Основной недостаток метода реконструктивной алгебраической пассивной томографии – неточность идентификации поврежденных ТВЭлов, расположенных в центре ТВС ВВЭР-1000, между каналами СУЗ.

Однако, решающим преимуществом данного метода, обуславливающим целесообразность его применения при автоматизированном управлении свойствами ядерного топлива ВВЭР-1000, является возможность:

- применения метода непосредственно при извлечении ТВС из АКЗ;
- идентификации повреждения любого ТВЭла в ТВС;
- локализации повреждения ТВЭла по всей высоте ТВС.

Поэтому метод реконструктивной алгебраической пассивной томографии представляется наиболее подходящим для использования при автоматизированном управлении свойствами ЯТ на этапе проведения КГО при перегрузке ЯТ ВВЭР-1000 [8, 11, 24–26].

### **1.3. Безопасность эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 в маневренном режиме**

В настоящее время концепция обеспечения надежной и безопасной эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 основана на непревышении проектных пределов нормальной эксплуатации РУ, в том числе при эксплуатации РУ в маневренных режимах. Одним из основных показателей, определяющих безопасность эксплуатации ВВЭР-1000, является устойчивость аксиального распределения энерговыделения в АКЗ при любом режиме нормальной эксплуатации РУ [5, 7, 16, 24, 27]. Для поддержания стабильности аксиального распределения

энерговыделения осуществляется контроль величины аксиального оффсета (АО), определяемого как:

$$AO = \frac{N_B - N_H}{N_B + N_H}, \quad (1.1)$$

где  $N_B$ ,  $N_H$  – тепловая мощность верхней и нижней половины АКЗ реактора, соответственно, МВт.

Основные параметры, возмущение величины которых сильно влияет на величину АО реактора ВВЭР-1000, представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Основные возмущающие воздействия на АО

Воздействие	Направление	Результат
Изменение глубины погружения $H$ группы ОР СУЗ в верхней половине АКЗ	$H \uparrow$ (погружение ОР СУЗ в АКЗ)	АО $\downarrow$
	$H \downarrow$ (извлечение ОР СУЗ из АКЗ)	АО $\uparrow$
Изменение тепловой мощности реактора $Q$ (при постоянной температуре теплоносителя на входе АКЗ $t_{\text{вх}} = \text{const}$ и подъеме ОР СУЗ)	$Q \uparrow$	АО $\uparrow$ при извлечении ОР СУЗ, но АО $\downarrow$ из-за $\partial \rho / \partial t < 0$
Изменение $Q$ (при $t_{\text{вх}} = \text{const}$ и погружении ОР СУЗ)	$Q \downarrow$	АО $\downarrow$ при погружении ОР СУЗ, но АО $\uparrow$ из-за $\partial \rho / \partial t < 0$
Изменение глубины погружения $H$ группы ОР СУЗ в верхней половине АКЗ	$H \uparrow$	АО $\downarrow$
	$H \downarrow$	АО $\uparrow$
Изменение расхода теплоносителя (при $t_{\text{вх}} = \text{const}$ и $Q = \text{const}$ )	$G \uparrow$	АО $\uparrow$
	$G \downarrow$	АО $\downarrow$
Изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе (при $t_{\text{вх}} = \text{const}$ и погружении ОР СУЗ)	$C_{\text{H}_3\text{BO}_3} \uparrow$	АО $\downarrow$
Изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе (при $t_{\text{вх}} = \text{const}$ и подъеме ОР СУЗ)	$C_{\text{H}_3\text{BO}_3} \downarrow$	АО $\uparrow$
Изменение температуры теплоносителя на входе АКЗ (при постоянной $Q$ )	$T_{\text{вх}} \uparrow$	АО $\downarrow$
	$T_{\text{вх}} \downarrow$	АО $\uparrow$



В маневренном режиме эксплуатации ВВЭР-1000 значение АО должно поддерживаться в регламентном (рекомендуемом) диапазоне, в зависимости от текущего уровня относительной мощности  $N$  реактора (рис. 1.9).

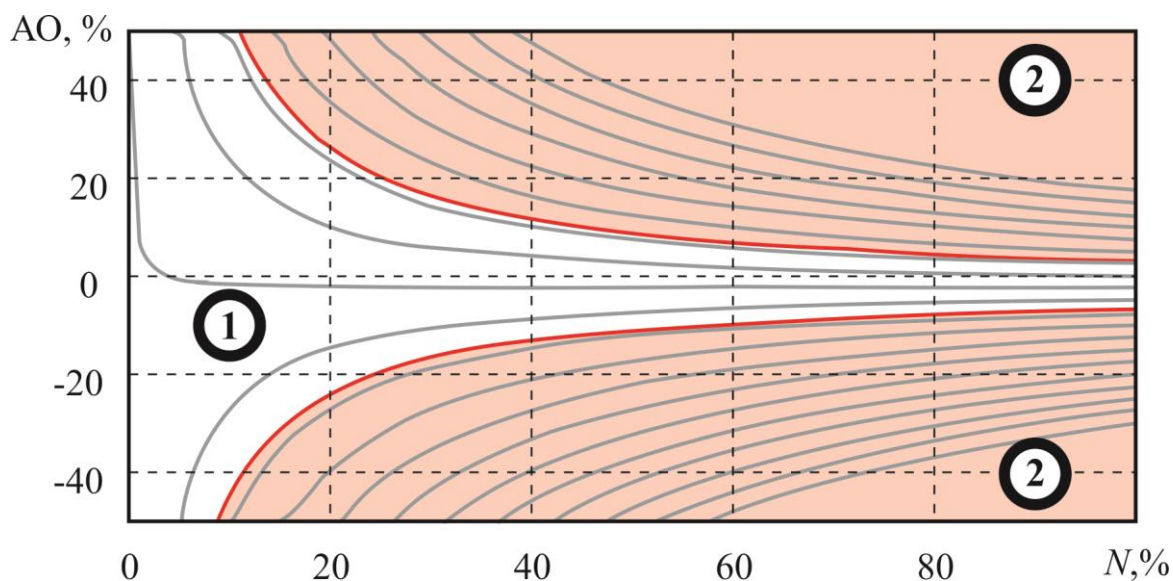


Рисунок 1.9 – Области значений АО: 1 – регламентная область;  
2 – нерекондуемая область

Выход значения АО за пределы рекомендуемой области влечет за собой возникновение аксиальных ксеноновых колебаний, что негативно отразится на работе оборудования 1-го контура, особенно твэлов, и потребует дополнительных усилий по стабилизации распределения энерговыделения в АКЗ.

При определенных условиях нестабильность аксиального распределения энерговыделения в АКЗ может даже привести к аварийным ситуациям [12, 27–29].

Маневрирование мощностью РУ с ВВЭР-1000 осуществляется в соответствии с программой регулирования, которая представляет собой график изменения технологических параметров энергоблока в зависимости от изменения мощности РУ.

Таким образом, чтобы разработать технологические основы автоматизированного управления свойствами ядерного топлива ВВЭР-1000 в маневренном режиме, необходимо определить изменение свойств ЯТ при эксплуатации ВВЭР-1000 по технологически обоснованной программе регулирования

мощности РУ, исходя из условия поддержания АО в регламентных пределах, а также неперевышения других проектных пределов нормальной эксплуатации РУ [30].

#### **1.4. Ограничения при проектировании и эксплуатации топливных загрузок ВВЭР-1000**

Проектом РУ с ВВЭР-1000 предусматриваются ограничения на значения параметров, описывающих состояние всех систем реактора в режиме его нормальной эксплуатации [31, 32].

Для обеспечения конкурентоспособности ядерной энергетики на энергетическом рынке необходимо разрабатывать и внедрять новые топливные циклы, характеризующиеся использованием ЯТ с увеличенной максимальной глубиной выгорания, профилированием обогащения ЯТ, а также возможностью постоянной эксплуатации ЯТ в переменном режиме нагружения энергоблока [0–38].

Ограничения, задающие необходимые и достаточные условия безопасной эксплуатации ядерного топлива ВВЭР-1000, и используемые при разработке топливных циклов, основаны на рекомендациях МАГАТЭ и определяются в таких нормативных документах, как “Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций НП-082-07” (ПБЯ) [5] и “Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97” (ОПБ) [39].

В ПБЯ установлены эксплуатационный предел повреждения твэлов и предел безопасной эксплуатации твэлов [5].

Согласно *эксплуатационному пределу повреждения твэлов*, в АКЗ допускается наличие твэлов с дефектом типа «газовая неплотность» в количестве не более 0,2 % от суммарного числа твэлов, тогда как с дефектом типа «прямой контакт ЯТ с теплоносителем» – не более 0,02 % от числа твэлов в АКЗ.

Согласно *пределу безопасной эксплуатации твэлов*, в АКЗ допускается наличие твэлов с дефектом типа «газовая неплотность» в количестве не более 1 % от суммарного числа твэлов, тогда как с дефектом типа «прямой контакт ЯТ с теплоносителем» – не более 0,1 % от числа твэлов в АКЗ.

Согласно ПБЯ, *максимальный проектный предел повреждения твэлов* задается такими пределами [5]:

- температура оболочек твэлов – не более 1200 °С;
- эквивалентная степень окисления оболочек твэлов – не более предельного значения, устанавливаемого на основе экспериментальных данных;
- доля прореагировавшего циркония в АКЗ – не более 1 % его массы в оболочках твэлов;
- максимальная температура топлива – не выше температуры плавления топлива.

В ПБЯ указано, что эксплуатация твэлов легководного реактора типа ВВЭР считается безопасной, если не превышаются пределы безопасной эксплуатации РУ.

Хотя в ПБЯ ограничивается количество твэлов с дефектом типа газовой неплотности и изменение *параметра поврежденности оболочек твэлов*  $\omega(\tau)$  при нормальных условиях эксплуатации ВВЭР-1000, там не определяется методики расчета  $\omega(\tau)$  в процессе эксплуатации твэлов, учитывающей точную последовательность совокупностей эксплуатационных параметров (историю нагружения), влияющих на величину  $\omega(\tau)$ .

В ПБЯ не регламентируется расчет изменения деформации и поврежденности оболочек твэлов, приводящего к возникновению дефекта типа газовой неплотности при нормальных условиях эксплуатации твэлов. В ПБЯ не сказано, каким образом следует влиять на изменение термомеханического состояния твэлов, чтобы не допустить возникновения дефекта типа газовой неплотности при нормальных условиях их эксплуатации [40].

Важно подчеркнуть, что в рамках существующей системы ограничений при проектировании и эксплуатации топливных загрузок ВВЭР-1000 не ука-

зывается стандартных методов для расчета величины поврежденности  $\omega(\tau)$ , накопленной к моменту начала разгерметизации оболочек твэлов *конкретной* ТВС, учитывающих точную историю нагружения этой ТВС [6].

Как следствие, на АЭС НАЭК «Энергоатом» с реактором ВВЭР-1000 не внедрено технологий и процедур для локализации разгерметизированного твэла в ТВС. Также не внедрено технологий для локализации аксиального сегмента (АС) оболочки твэла, в котором произошла разгерметизация, для учета влияния алгоритма перестановок ТВС на вероятность разгерметизации оболочек твэлов.

На АЭС НАЭК «Энергоатом» не ведется статистики разрушений оболочек твэлов, учитывающей локализацию области разгерметизации оболочки по высоте твэла и последовательность перестановок ТВС, содержащих разрушенные твэлы. Статистические данные по локализации области разгерметизации оболочки и последовательности перестановок ТВС, содержащих разрушенные твэлы, отсутствуют в открытых источниках не только Украины, но и других стран [40].

Можно сделать вывод, что в рамках существующей системы ограничений при проектировании и эксплуатации топливных загрузок ВВЭР-1000 невозможно исключить возникновение дефекта типа газовой неплотности при нормальных условиях эксплуатации твэлов, что делает актуальной разработку технологических основ автоматизированного управления свойствами ЯТ ВВЭР-1000.

### **1.5. Оценка влияния режима работы реактора на эффективность топливных циклов ВВЭР-1000**

Увеличение глубины выгорания топлива, других параметров для повышения экономичности эксплуатации РУ приводит к увеличению риска разгерметизации оболочек твэлов, что приводит к снижению надежности, безопасности и экономичности эксплуатации РУ.

В настоящее время в открытых источниках не опубликовано достоверной информации по удельному вкладу основных физических механизмов разгерметизации оболочек ТВЭЛов в частоту разгерметизации оболочек ТВЭЛов реактора типа ВВЭР-1000.

Согласно данным института EPRI (США), полученным на основе результатов эксплуатации в США реакторов типа PWR в течение 1996-2005 гг., главные факторы разгерметизации оболочек ТВЭЛов PWR следующие [41]:

- фреттинг-износ;
- мусор в теплоносителе;
- неизвестные причины (20 %).

В этой связи в монографии [40] отмечено, что на основе имеющегося знания физический механизм разгерметизации оболочек ТВЭЛов в нормальных условиях эксплуатации легководных реакторов примерно в 20 % случаев неизвестен.

Поскольку основной тенденцией развития ВВЭР является повышение требований к экономической эффективности АЭС с ВВЭР при обеспечении безопасности не ниже требований ПБЯ, при оценке влияния режима работы реактора на эффективность топливных циклов ВВЭР-1000 в качестве ключевого фактора, ограничивающего повышение показателей эффективности эксплуатации ВВЭР-1000, следует рассматривать долговечность оболочек ТВЭЛов [42].

### **1.5.1. Критерии эффективного использования ядерного топлива**

Традиционный подход к повышению экономической эффективности использования ядерного топлива ВВЭР-1000 основан на требовании увеличения средней глубины выгорания ЯТ за счет продления топливной кампании и обеспечения стабильной эксплуатации энергоблока при номинальной мощности РУ (100 %), при этом величина коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) энергоблока должна быть максимальной, что, в

свою очередь, требует минимизации продолжительности планово-перегрузочных работ (ППР) [43–45].

При оценке эффективности эксплуатации ЯТ ВВЭР-1000 применяют множество разнородных показателей эффективности, описывающих различные аспекты эксплуатации РУ, что затрудняет формулировку интегрального критерия эффективности эксплуатации, одновременно учитывающего влияние всех показателей [46, 47].

Например, в работе [20] показано, что регулярное применение режима эксплуатации энергоблока с ВВЭР-1000 с частичным использованием отрицательных эффектов реактивности (ОЭР) позволяет «увеличивать среднегодовую выработку электроэнергии... или, не снижая ее, понижать топливную составляющую себестоимости отпускаемой электроэнергии».

Зачастую повышение эффективности эксплуатации ЯТ ВВЭР-1000 по одному показателю приводит к снижению эффективности по другому показателю. Например, внедрение циклов с пониженной утечкой нейтронов позволяет формировать более широкий спектр топливных загрузок, но при этом длительность топливной кампании уменьшается на 10 % по сравнению с предусмотренной проектом [21].

С точки зрения традиционного подхода, топливные циклы с пониженной утечкой нейтронов уступают проектному циклу по эффективности из-за пропорционального роста постоянной составляющей себестоимости электроэнергии.

Но в цикле с пониженной утечкой нейтронов поток нейтронов на внутренней поверхности корпуса реактора снижается на 25–40 %, что позволяет пропорционально увеличить срок службы реактора и, тем самым, пропорционально снизить постоянную составляющую себестоимости.

Кроме того, такой цикл позволяет получить значительную экономию в топливной составляющей себестоимости и снизить удельное количество ОЯТ на единицу отпущенной энергии, а более частое проведение ППР дополнительно повышает надежность работы систем АЭС в ходе кампаний.

Поэтому в работе [21] отмечено: «...влияние компоновочных решений АКЗ на ресурс корпуса столь велико, что дает возможность фактически управлять им».

Необходимо отметить, что при эксплуатации ВВЭР-1000 средняя мощность реактора в течение кампании всегда ниже номинальной. Это может быть вызвано множеством причин: частичной неисправностью оборудования, при которой требуется снижать мощность, пропускной способностью линий электропередачи, работой на мощностном эффекте реактивности и пр.

При выборе критерия эффективности эксплуатации ЯТ ВВЭР-1000 необходимо учитывать возможность эксплуатации реактора в переменном режиме нагружения по суточному или недельному графику нагрузки [30, 37, 48].

Необходимость обоснования безопасности и экономичности переменного режима эксплуатации энергоблоков с ВВЭР-1000 объясняется не только тем, что рыночная стоимость электроэнергии, выработанной маневренным энергоблоком, больше в 1,5-2 раза, но также и макроэкономической целесообразностью повышения маневренности ОЭС Украины [22, 30].

Принципиальная возможность постоянной эксплуатации ВВЭР-1000 в маневренном режиме основана на том, что расчетные и экспериментальные исследования показали достаточную устойчивость АКЗ ВВЭР-1000 в переходных режимах при адекватном выборе управляющих воздействий [49–55].

Проблема разработки технологических основ автоматизированного управления свойствами ядерного топлива АЭС с ВВЭР-1000, при эксплуатации РУ в переменном режиме нагружения, неразрывно связана с разработкой алгоритмов эффективного управления топливным циклом ВВЭР-1000.

Однако, при определении целевой функции (критерия эффективности) управления необходимо учитывать, что составляющие критерия эффективности в общем случае должны учитывать как аспект безопасности, так и аспект экономичности эксплуатации ЯТ [40].

В числе параметров, определяющих безопасность эксплуатации ЯТ, следует выделить среднюю деформационную поврежденность оболочек твэлов

ВВЭР-1000, которая определяет вероятность разгерметизации оболочек твэлов по механизму накопления деформационной поврежденности оболочек за счет совместного действия ползучести и усталости материала оболочек [56, 57].

Другим важным параметром, определяющим безопасность эксплуатации ЯТ, является аксиальный офсет (АО), стабильность которого прямо влияет на долговечность оболочек твэлов и стабильность пространственного распределения поля энерговыделения в АКЗ ВВЭР-1000 [13, 22, 40, 51, 58].

Эффективное управление АО – не только необходимое условие обеспечения безопасности эксплуатации ЯТ, но и одна из основных составляющих проблемы адаптации энергоблоков ВВЭР-1000 для работы в маневренном режиме [49, 50, 59].

Среди параметров, определяющих экономичность эксплуатации ЯТ, следует выделить среднюю мощность РУ за кампанию, продолжительность топливной кампании, длительность ППР, среднюю глубину выгорания ЯТ и т.д. [19, 60].

Параметры, определяющие безопасность и экономичность эксплуатации ЯТ, как правило, описываются нелинейными зависимостями [30, 34–36, 38, 46].

Например, зависимость деформационной поврежденности оболочки твэла от времени существенно нелинейна и включает три стадии роста поврежденности (стадия неустановившейся ползучести, стадия установившейся ползучести, стадия ускоренной ползучести) [61, 62].

В работе [47] выделены следующие основные составляющие экономического эффекта, получаемого при переводе РУ с ВВЭР-1000 в маневренный режим эксплуатации:

- 1) Эффект от обеспечения возможности работы в маневренном режиме;
- 2) Эффект, связанный с повышением надежности ЯТ;
- 3) Эффект от обеспечения работы в режиме глубоких выгораний.



Первая составляющая определяется тем, что на энергорынке электроэнергия, вырабатываемая энергоблоками, участвующими в регулировании частоты ОЭС, оплачивается по более высокому тарифу, чем электроэнергия, вырабатываемая энергоблоками, обеспечивающими базисную составляющую мощности системы. Этот эффект может быть оценен на уровне 50 % стоимости вырабатываемой на АЭС электроэнергии, с учетом потерь от снижения выработки во время ночных разгрузок, а также с учетом увеличения затрат на усовершенствованное топливо и оборудование, которые будут определяться поставщиками и, по-видимому, могут быть оценены на уровне половины ожидаемого эффекта.

Вторая часть экономического эффекта от перевода РУ с ВВЭР-1000 в маневренный режим существенно меньше чем первая и основана на использовании усовершенствованных алгоритмов управления (У-алгоритмов), позволяющих энергоблоку работать без досрочной выгрузки ТВС (по причине негерметичности оболочек твэлов) и без ежегодного контроля герметичности всех ТВС (в качестве примера приводится ХАЭС-1) [47, 51].

Отмечено, что последняя составляющая экономического эффекта от перевода РУ с ВВЭР-1000 в маневренный режим требует более глубокого изучения [47].

Хотя в работе [47] сказано, что экономический эффект от перевода РУ с ВВЭР-1000 в маневренный режим эксплуатации связан, в том числе, с повышением надежности ЯТ, в этой работе не приводится методики расчета деформационной поврежденности оболочек твэлов в переменном режиме эксплуатации ВВЭР-1000, которая бы учитывала всю историю нагружения конкретной ТВС.

Также не приводится критерия эффективности эксплуатации ЯТ в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000, который бы учитывал одновременно аспекты безопасности и экономичности эксплуатации ЯТ.

В этой связи представляет интерес представленная в цикле работ [6, 22, 40, 56, 57, 63, 64] критериальная модель эффективности управления свой-

ствами твэлов, разработанная для нормальных условий эксплуатации ВВЭР-1000, включая переменные режимы нагружения.

Критериальная модель (КМ) эффективности управления свойствами твэлов ВВЭР построена на основе исходного положения, что «целью управления свойствами твэлов является повышение эффективности нормальной эксплуатации твэлов за счет совместного учета поврежденности оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  и экономико-технологических показателей эффективности эксплуатации РУ» [40].

КМ эффективности управления свойствами твэлов основана на применении ЭВП-метода расчета поврежденности оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  реактора ВВЭР-1000, позволяющего учесть влияние точной истории нагружения конкретной ТВС на величину  $\omega(\tau)$  [6, 22].

Согласно КМ, управление свойствами твэлов осуществляется на основе априорных требований к свойствам твэлов и АКЗ, определения контролируемых параметров и варьируемых детерминирующих факторов (ДФ), определяющих контролируемые параметры. Максимум эффективности *Eff* управления свойствами твэлов ВВЭР определяется по критерию, физический смысл которого заключается в том, что если какой-либо контролируемый параметр выходит за пределы допустимого диапазона, то этот контролируемый параметр вносит негативный вклад в *Eff*. Преимущество одной совокупности ДФ над другой определяется путем суммирования преимуществ, даваемых каждым из контролируемых параметров [40].

Использование ЭВП-метода и КМ для управления свойствами твэлов ВВЭР-1000 позволяет снизить деформационную поврежденность оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  при одновременном повышении равномерности выгорания ЯТ среди ТВС [64].

Подводя итог анализу существующих критериев эффективного использования ЯТ, можно резюмировать:

- 1) В настоящее время продолжительность топливной кампании ВВЭР-1000 задается с учетом таких критериев, как максимум КИУМ,

максимум глубины выгорания ЯТ, своевременное проведение ППР, обеспечение нормативного уровня безопасности и надежности оборудования РУ.

2) При выборе критерия эффективности эксплуатации ЯТ ВВЭР-1000 необходимо учитывать возможность эксплуатации реактора в переменном режиме нагружения.

3) При оценке эффективности эксплуатации ЯТ ВВЭР-1000 применяют множество разнородных показателей эффективности, описывающих различные аспекты эксплуатации РУ, что затрудняет формулировку интегрального критерия эффективности эксплуатации, одновременно учитывающего влияние всех показателей.

4) В рамках существующей системы ограничений при проектировании и эксплуатации топливных загрузок ВВЭР-1000 не указывается стандартных методов для расчета величины деформационной поврежденности  $\omega(\tau)$ , накопленной к моменту начала разгерметизации оболочек твэлов конкретной ТВС при нормальных условиях эксплуатации ВВЭР-1000, с учетом точной истории нагружения этой ТВС.

5) КМ эффективности управления свойствами твэлов основана на применении ЭВТП-метода расчета  $\omega(\tau)$ , позволяющего учесть влияние точной истории нагружения конкретной ТВС реактора ВВЭР-1000 на величину  $\omega(\tau)$ .

6) Использование КМ эффективности управления свойствами твэлов и ЭВТП-метода позволяет одновременно повысить безопасность и экономическую эффективность эксплуатации ЯТ ВВЭР-1000.

### **1.5.2. Экономические аспекты повышения устойчивости нейтронного поля и его влияние на безопасность**

Параметры, описывающие ВВЭР-1000, включая интегральную мощность, профиль энергосвечения, эффективность ОР СУЗ, etc. являются функционалами распределения нейтронного потока в АКЗ реактора. Поэтому устойчивость нейтронного поля, прежде всего аксиальная устойчивость, относится

к необходимым условиям обеспечения безопасности эксплуатации реактора ВВЭР-1000.

Проблема обеспечения устойчивости аксиального распределения плотности потока нейтронов в АКЗ ВВЭР-1000 неразрывно связана с ксеноновыми эффектами, определяемыми перераспределением концентрации ксенона в АКЗ, поскольку аксиальное распределение потока нейтронов неустойчиво во время ксеноновых переходных процессов [18, 19, 27, 67, 68].

Свободные ксеноновые колебания в АКЗ ВВЭР-1000 могут быть как расходящимися, так и сходящимися. Это свойство зависит от средней глубины выгорания ЯТ и от суммарного макросечения поглощения у ядер-поглотителей в конструкционных элементах АКЗ [52].

С одной стороны, увеличение средней глубины выгорания ЯТ диктуется необходимостью повышать экономическую эффективность эксплуатации ВВЭР-1000. С другой стороны, с ростом средней глубины выгорания ЯТ устойчивость АКЗ ВВЭР-1000 к ксеноновым колебаниям снижается. В качестве другого примера можно привести влияние использования циркониевого сплава вместо нержавеющей стали в качестве материала дистанционирующей решетки (ДР) в ТВС: запас реактивности повышается, однако устойчивость нейтронного поля снижается [33, 49, 51].

Можно резюмировать, что повышение эффективности использования ЯТ обычно приводит к снижению устойчивости нейтронного поля в АКЗ ВВЭР-1000. В этой связи, чтобы не допустить нарушения требования устойчивости нейтронного поля в АКЗ, разработан усовершенствованный алгоритм управления мощностью АКЗ ВВЭР-1000 [19, 26, 30, 37, 54, 69].

## **1.6. Существующая материально-информационная схема движения ядерного топлива**

Используемая в настоящее время материально-информационная схема движения ЯТ ВВЭР-1000 представлена на рис. 1.10.

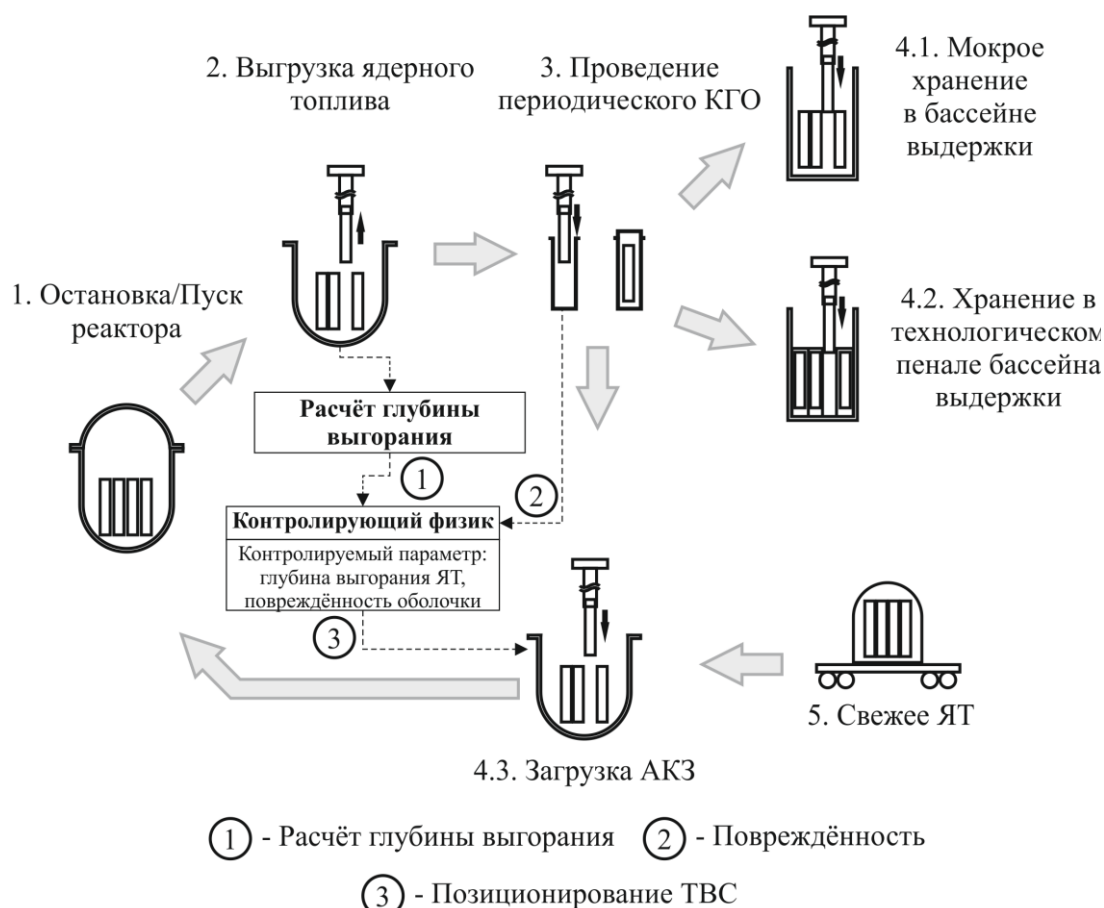


Рис. 1.10. Материально-информационная схема движения ЯТ ВВЭР-1000

Существующая материально-информационная схема движения ЯТ ВВЭР-1000 включает этапы:

- 1) Остановка РУ.
- 2) Выгрузка ТВС из АКЗ и расчёт глубины выгорания ЯТ в ТВС.
- 3) Проведение периодического КГО, на основании которого выносится решение о пригодности/непригодности ТВС к дальнейшей эксплуатации.
- 4) Если ТВС пригодна к дальнейшей эксплуатации, то ТВС размещается в соответствующей ячейке АКЗ, если не пригодна – перемещается в бассейн выдержки или в технологический пенал.
- 5) Размещение в АКЗ новых ТВС вместо отбракованных.
- 6) Пуск РУ.

Существующая материально-информационная схема движения ЯТ ВВЭР-1000 не предусматривает текущего контроля величины деформационной поврежденности  $\omega(\tau)$  оболочек твэлов конкретной ТВС, накопленной к заданному моменту времени, с учетом точной истории нагружения этой ТВС.

Этот недостаток существующей материально-информационной схемы движения ЯТ ВВЭР-1000 является следствием действующей системы ограничений при проектировании и эксплуатации топливных загрузок ВВЭР-1000.

В результате на АЭС НАЭК «Энергоатом» не внедрено технологий для локализации разгерметизированного твэла в ТВС ВВЭР-1000, для локализации АС оболочки твэла, в котором произошла разгерметизация, для учета влияния алгоритма перестановок ТВС на вероятность разгерметизации оболочек твэлов.

Также следствием отсутствия текущего контроля величины  $\omega(\tau)$  оболочек твэлов конкретной ТВС, накопленной к заданному моменту времени с учетом точной истории нагружения этой ТВС, является невозможность исключить возникновение дефекта типа газовой неплотности при нормальных условиях эксплуатации твэлов ВВЭР-1000.

### **1.7. Влияние изменения температуры теплоносителя на входе в активную зону реактора на равномерность энерговыделения**

Отклонение температуры теплоносителя на входе АКЗ ВВЭР-1000 будет вызывать изменение аксиального профиля плотности нейтронного потока и удельного объемного энерговыделения в АКЗ реактора вследствие наличия температурного эффекта реактивности. Поскольку в реакторе ВВЭР-1000 вода служит как теплоносителем, так и замедлителем, при повышении температуры теплоносителя плотность замедлителя снижается. Это приводит к снижению замедляющей способности воды, что приводит к уменьшению плотности потока тепловых нейтронов. т.е. к снижению реактивности. Таким образом, для ВВЭР-1000 характерно наличие отрицательного коэффициента реактивности по температуре теплоносителя [70].

Нестационарное отравление АКЗ реактора вносит положительную обратную связь в любое отклонение нейтронного потока. Поэтому важно учиты-

вать, что вызванное отклонением температуры теплоносителя в АКЗ ВВЭР-1000 изменение плотности потока нейтронов может привести к возникновению ксеноновых колебаний.

В этой связи в монографии [40] отмечено: «...поскольку эффект реактивности по температуре теплоносителя относится к быстрым эффектам, а отравление – к медленным эффектам, совпадающим по знаку с изменением нейтронного потока за счет данного эффекта реактивности и усиливающим его за счет положительной обратной связи, контроль энерговыделения в АКЗ при маневрировании мощностью РУ можно обеспечить выбором такого температурного режима теплоносителя, которому соответствует максимальная аксиальная стабильность поля энерговыделения».

При условии достаточно малых отклонений средней температуры теплоносителя в верхней и нижней половине АКЗ ВВЭР-1000, в работе [66] получен критерий эффективности температурного режима теплоносителя с точки зрения стабильности АО в ходе маневрирования мощностью реактора  $N$ :

$$\min \left| \sum_{i=1}^m (\delta \langle t_b \rangle - \delta \langle t_n \rangle) \right|, \quad (1.2)$$

где  $i$  – номер шага по  $N$  (малого изменения  $N$ );

$m$  – количество шагов по  $N$  в каком-либо направлении при маневре  $N$ .

Использование критерия (1.2) позволяет обоснованно выбрать температурный режим теплоносителя, позволяющий обеспечить максимальную стабильность поля энерговыделения при маневрировании мощностью реактора.

Особый интерес представляет программа регулирования (ПР) мощности ВВЭР-1000  $N$ , подразумевающая при суточном маневре мощностью от 100 до 80 %  $N_{\text{ном}}$  поддержание постоянной входной температуры теплоносителя  $t_{\text{вх}} = \text{const}$ , при сохранении регламентного давления пара 2-го контура  $p_{\text{п}} = [5,8 \dots 6]$  МПа [22].

На примере 2-го энергоблока Хмельницкой АЭС (ХАЭС-2), где используется усовершенствованный алгоритм (У-алгоритм) управления мощностью АКЗ ВВЭР-1000, путем анализа устойчивости АО при маневри-

ровании мощностью РУ с помощью критерия (1.2), показано, что ПР с постоянной входной температурой теплоносителя  $t_{\text{вх}} = \text{const}$  обеспечивает наиболее стабильный АО [66]. Данный вывод в работе [66] был подтвержден расчетом величины максимального расхождения графиков мгновенного и равновесного АО по методу [71].

Поскольку при маневрировании мощностью ВВЭР-1000 по ПР с  $t_{\text{вх}} = \text{const}$  амплитуда перемещения ОР СУЗ в 1,5 раз меньше, чем для ПР с  $\langle t_1 \rangle = \text{const}$  (при прочих равных условиях), это будет существенно увеличивать долговечность оболочек ТВЭлов за счет уменьшения амплитуды скачков линейной мощности  $q_l$  в ТВЭлах, наиболее близко расположенных к ОР [13, 14, 40].

## 1.8. Управление мощностью реактора ВВЭР-1000

Управление мощностью реактора ВВЭР-1000 в основном осуществляется перемещением стержней ОР СУЗ либо изменением концентрации борной кислоты в теплоносителе 1-го контура [19, 33].

Органы регулирования СУЗ ВВЭР-1000 предназначены не только для управления реактивностью и мощностью РУ, но также для управления распределением плотности нейтронного потока в АКЗ [5].

*Преимущества* управления мощностью ВВЭР-1000 с помощью ОР СУЗ:

— быстрое действие и легкость автоматизации.

*Недостатки* управления мощностью ВВЭР-1000 с помощью ОР СУЗ:

— значительное изменение нейтронного поля и поля энерговыделения, а также изменение величины АО, что может послужить причиной развития в АКЗ ВВЭР-1000 ксеноновых колебаний [22];

— значительные напряжения в оболочках ТВЭлов, находящихся вблизи ОР СУЗ, которые обусловлены значительными скачками мощности при извлечении ОР СУЗ из АКЗ [6, 9, 15, 56, 57, 73].



Система борного регулирования ВВЭР-1000 на основе изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе 1-го контура предназначена для компенсации медленных изменений реактивности, а также обеспечения безопасного проведения перегрузки реактора и ремонтных работ [72].

*Преимущества* управления мощностью ВВЭР-1000 с помощью системы борного регулирования:

— не влияет на аксиальный профиль энерговыделения и АО [74].

*Недостатки* управления мощностью ВВЭР-1000 с помощью системы борного регулирования:

— высокая инерционность;

— большое количество жидких радиоактивных отходов [75].

Таким образом, для корректного расчета величины деформационной поврежденности оболочек твэлов, накопленной при эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения, необходимо принять во внимание схему размещения в АКЗ и амплитуду перемещения органов регулирования СУЗ, используемых при маневре мощностью РУ [16, 17, 22, 28, 57, 66].

## **1.9. Постановка цели и задач диссертационного исследования**

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 путем создания технологических основ автоматизированного управления свойствами ядерного топлива, при его эксплуатации в переменном режиме нагружения.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать существующие методы определения свойств ядерного топлива во время регламентной эксплуатации ВВЭР-1000.

2. Разработать математическую модель и метод расчета изменения со временем аксиальных профилей поврежденности оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  и глу-

бины выгорания ЯТ  $B_U(\tau)$  в зависимости от расположения ТВС в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000.

3. Исследовать закономерности изменения со временем аксиальных профилей  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  в зависимости от расположения ТВС в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000.

4. Исследовать зависимость достоверности измерения интенсивности  $\gamma$ -излучения облученной ТВС от величины угла облучения коллиматора детектора.

5. Разработать основы автоматизированного управления свойствами ядерного топлива для обеспечения безопасности и эффективности эксплуатации ВВЭР-1000.

### **1.10. Выводы по первому разделу**

1. В результате анализа существующих методов периодического КГО твэлов реактора типа ВВЭР-1000 установлено, что наилучшим методом, позволяющим локализовать поврежденные твэлы и определить их количество в ТВС, является метод пассивной томографии, который может применяться для ТВС любой конструкции.

2. Показано, что основным недостатком существующей материально-информационной схемы движения ЯТ ВВЭР-1000 является отсутствие оперативного расчетного контроля величины деформационной поврежденности  $\omega(\tau)$  оболочек твэлов конкретной ТВС, накопленной к заданному моменту времени с учетом точной истории нагружения этой ТВС. Следствием этого недостатка является невозможность исключить возникновение дефекта типа газовой неплотности при нормальных условиях эксплуатации твэлов, что делает актуальной разработку технологических основ автоматизированного управления свойствами ЯТ ВВЭР-1000.

3. При моделировании переменного режима эксплуатации ВВЭР-1000 целесообразно использовать режимные параметры АКЗ и РУ, характерные для

программы регулирования мощности АКЗ на основе У-алгоритма при постоянной входной температуре теплоносителя  $t_{\text{вх}} = \text{const}$ , что обеспечивает наиболее стабильный АО и наибольшую долговечность оболочек твэлов.

4. Для повышения эффективности нормальной эксплуатации твэлов ВВЭР-1000 целесообразно осуществлять текущий контроль одновременно поврежденности оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания ЯТ, что позволит рассчитать эффективность управления свойствами ЯТ на основе «Критериальной модели эффективности управления свойствами твэлов ВВЭР». В этой связи, для облегчения принятия решения о допустимости дальнейшей эксплуатации ТВС целесообразно определить корреляцию в распределении максимальных значений глубины выгорания и поврежденности по высоте усредненного по ТВС твэла.

## РАЗДЕЛ 2

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Наличие в АКЗ реактора ВВЭР-1000 многочисленных связанных процессов различной физической природы (нейтронно-физические, теплогидравлические, коррозионные, механико-деформационные, радиационные процессы) не позволяет составить замкнутую систему дифференциальных уравнений (ДУ), корректно описывающую изменение рассматриваемых свойств ЯТ (поврежденность оболочек ТВЭЛов и глубина выгорания ЯТ) в пространстве и времени при эксплуатации ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения [40].

Следовательно, необходимо прибегнуть к методам имитационного моделирования, согласно которому каждому элементу системы ставится в соответствие шаг (совокупность шагов) уникального расчетного алгоритма, соответствующего той или иной задаче [76].

#### **2.1. Основные факторы, влияющие на изменение свойств ядерного топлива**

Принимая У-алгоритм регулирования мощности АКЗ ВВЭР-1000, при выполнении *суточного* маневра мощностью РУ мощность каждой ТВС в заданный момент времени определяется следующими параметрами [22, 51, 70, 77, 78]:

— средней плотностью нейтронного потока в ТВС, зависящей от уровня мощности РУ, от номера ячейки АКЗ, в которой расположена ТВС и от координаты нижнего края 10-й группы ОР СУЗ, используемой при маневре мощностью РУ.

— средней глубиной выгорания ЯТ в ТВС.

В соответствии с У-алгоритмом, при выполнении *недельного* или *комбинированного* маневра мощностью РУ с ВВЭР-1000, для поддержания регламентного уровня АО также возможно применение 9-й группы ОР СУЗ [51].

Перемещения ОР СУЗ приводят к значительным скачкам мощности не только в ТВС, находящейся под регулированием, но и в ТВС, граничащих с находящейся под регулированием – рис. 2.1 и 2.2 [9, 15].

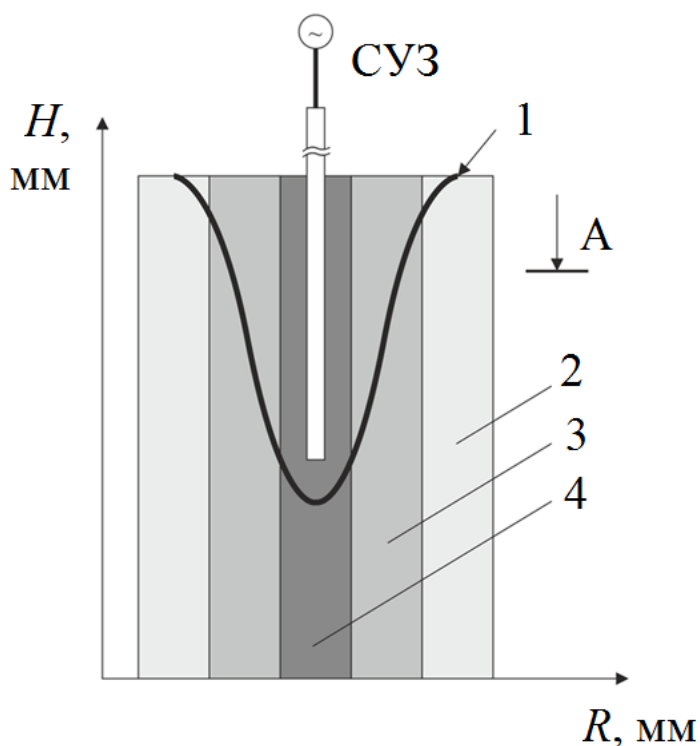


Рисунок 2.1 – Влияние ОР СУЗ на нейтронный поток: 1 – чувствительность нейтронного потока в ТВС к перемещению ОР; 2 – ряд ТВС, расположенный через один относительно ТВС под регулированием; 3 – ряд ТВС, примыкающий к ТВС под регулированием; 4 – ТВС под регулированием

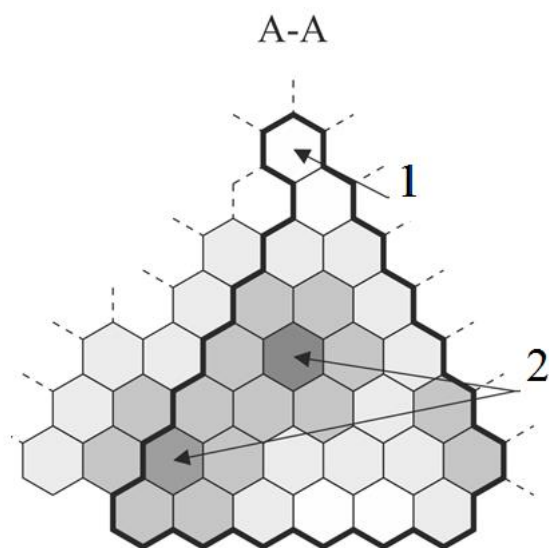


Рисунок 2.2 – Сектор симметрии АКЗ (1/6 часть АКЗ): 1 – центральная ТВС; 2 – регулируемые ТВС

### 2.1.1. Модель перестановок ТВС в АКЗ

Значительная аксиальная неоднородность деформационной поврежденности  $\omega(\tau)$  оболочки и глубины выгорания усредненного по ТВС твэла ВВЭР-1000 определяется наличием аксиального профиля энерговыделения при стационарной эксплуатации РУ, а также изменением положения ОР СУЗ при маневрировании мощностью РУ и перестановками ТВС в АКЗ после каждого года эксплуатации ТВС в ходе четырехлетней кампании [40].

Аналогично подходу работ [6, 22, 40, 63, 64], будем рассматривать несколько альтернативных алгоритмов перестановок ТВС в пределах сектора симметрии АКЗ, показанного на рис. 2.3.

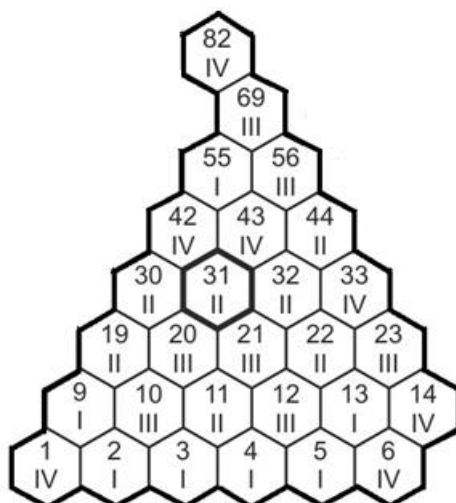


Рисунок 2.3 – Распределение ТВС по ячейкам сектора симметрии АКЗ: (арабская цифра) номер ячейки АКЗ; (римская цифра) ТВС 1, 2, 3 и 4-го года, соответственно

При моделировании перестановок ТВС в пределах сектора симметрии АКЗ будем следовать подходу, согласно которому:

- центральная ячейка АКЗ (№ 82) не рассматривается при моделировании перестановок ТВС;
- для ТВС 1, 2, 3-го года выделяется по 7 ячеек, тогда как для ТВС 4-го года выделяется 6 ячеек [40].

Введем следующее обозначение перестановок ТВС: «5-30-10-43» означает, что в течение 1-го года ТВС находится в ячейке № 5, в течение 2-го года – в ячейке № 30, в течение 3-го года – в ячейке № 10, в течение 4-го года – в ячейке № 43.

Будем рассматривать два алгоритма, содержащих по 7 перестановок ТВС каждый: один алгоритм (алгоритм 3) находился методом выборок Монте-Карло из условия максимума критерия эффективности  $Eff$  управления свойствами твэлов [40], тогда как второй алгоритм перестановок ТВС (алгоритм 18) был практически использован на 5-м энергоблоке ЗАЭС во время кампании 23 – табл. 2.1 [79].

Таблица 2.1– Поврежденность оболочек и выгорание

Алгоритм	3	18
Перестановка ТВС	9-19-21-8	5-30-10-43
	5-41-68-43	9-11-20-1
	55-22-10	3-22-54-29
	13-11-20-6	13-19-21-42
	3-30-54-1	2-31-18
	4-32-18-42	55-41-12-6
	2-31-12-29	4-32-68-8

### 2.1.2. Модель изменения энерговыделения по высоте твэла

Модель расчета аксиального профиля энерговыделения в усредненном по ТВС твэле ВВЭР-1000 основана на двухгрупповом диффузионном приближении [55, 70].

*Входные данные модели:*

- конструкционные параметры твэла и ТВС;
- режимные параметры РУ с ВВЭР-1000;

— программа изменения мощности РУ;  
 — программа изменения координаты расположения ОР СУЗ, размещенных в соответствии с У-алгоритмом.

Согласно регламенту безопасной эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000, при работе РУ на номинальной мощности рабочее положение 10-й регулирующей группы ОР СУЗ находится на высоте 90 % от низа АКЗ реактора [99].

*Выходные данные модели:*

— значения линейной мощности в условно выделенных аксиальных сегментах ТВС, расположенных в пронумерованных ячейках АКЗ.

Принималось допущение, что твэл по высоте делится на  $m=8$  аксиальных сегментов (АС). При этом  $i$ -й (от низа АКЗ) аксиальный сегмент ячейки  $j$  обозначается как расчетная ячейка  $(i, j)$ .

Рассчитывалась средняя линейная мощность  $\langle q_{l,i,j} \rangle$  в ячейке  $(i, j)$  по выражению:

$$\langle q_{l,i,j} \rangle = k_{v,i,j} \cdot \langle q_l \rangle, \quad (2.1)$$

где  $k_{v,i,j}$  – относительная мощность расчетной ячейки  $(i, j)$ ;

$\langle q_l \rangle$  – средняя по АКЗ линейная мощность в твэле (Вт/см),

$\langle q_l \rangle = 168,5$  и  $134,8$  Вт/см при  $N = 100$  и  $80$  %, соответственно.

В соответствии с методикой [60], средняя линейная мощность  $\langle q_{l,i,j} \rangle$  в расчетной ячейке  $(i, j)$  далее представлялась как:

$$\langle q_{l,i,j} \rangle = q_{l,j,\max} \cdot k_{i,j}, \quad (2.2)$$

где  $q_{l,j,\max}$  – максимальная линейная мощность в  $j$ -й ячейке АКЗ;

$k_{i,j}$  – коэффициент относительной мощности ячейки  $(i, j)$ .

Для моделирования распределения нейтронного потока в АКЗ и расчета значений параметра  $k_{v,i,j}$  применена нейтронно-физическая модель, реализованная в программном средстве «Имитатор Реактора» (ИР), которое предназначено для усовершенствования топливных циклов и алгоритмов управления реактора типа ВВЭР-1000 [55].



### 2.1.3. Модель изменения глубины выгорания ядерного топлива по высоте АКЗ

Средняя глубина выгорания ЯТ  $B_{i,j}(\tau)$  в расчетной ячейке  $(i, j)$  в момент времени  $\tau$  определяется выражением:

$$B_{i,j}(\tau) = \int_0^{\tau} \frac{Q_{i,j}(\tau) \cdot d\tau}{m_{i,j}}, \quad (2.3)$$

где  $Q_{i,j}(\tau)$  – тепловая мощность ячейки  $(i, j)$ , МВт;

$m_{i,j}$  – масса ЯТ в ячейке  $(i, j)$ , кг;

Исходные данные, использованные для расчета глубины выгорания ЯТ в АС усредненного по ТВС твэла реактора ВВЭР-1000, с учетом расположения ТВС в назначенной ней  $j$ -й ячейке сектора симметрии АКЗ, представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Исходные данные для расчёта выгорания ЯТ

Параметр, размерность	Значение
Температура теплоносителя на входе в реактор, °С	287
Давление в 1-м контуре, МПа	16
Шаг расчёта, мин.	6
Продолжительность расчёта, сут	365
Продолжительность топливной кампании, сут	1460
Наружный диаметр оболочки твэла, мм	9,1
Внутренний диаметр оболочки твэла, мм	7,73
Толщина оболочки твэла, мм	0,69
Диаметр топливной таблетки, мм	7,57
Диаметр центрального отверстия таблетки, мм	0,24
Начальный зазор между таблеткой и оболочкой, мм	0,08
Есть ли впадины у таблетки	нет

Продолжение таблицы 2.2 – Исходные данные для расчёта выгорания ЯТ

Параметр, размерность	Значение
Диаметр эквивалентного проточного канала твэла, мм	10,6
Общий вес столба ЯТ в твэле, кг	1,385
Высота таблетки, мм	11,8
Шаг твэлов, мм	12,75
Начальное содержание гелия в газовой смеси под оболочкой, %	100
Начальная толщина окисной пленки для каждого АС, мк	0,1
Максимальное расстояние между двумя краями смежных таблеток, мк	20
Разница между температурами газа верхнего компенсационного объема и теплоносителя, °С	25
Начальное давление гелия под оболочкой, МПа	2
Материал топливной таблетки	Двуокись урана
Плотность двуокиси урана, г/см <sup>3</sup>	10,4
Материал оболочки	циркалой-4 SR
Количество АС	8
Длина каждого АС сборки таблеток, см	44,25
Начальный размер зерна таблетки, мк	10
Обогащение ЯТ по U-235, %	4,4
Величина верхнего компенсационного объема, см <sup>3</sup>	0,21
Величина нижнего компенсационного объема, см <sup>3</sup>	0
Форма расположения твэлов в ТВС	Равномерная треугольная
Расход теплоносителя через АКЗ, м <sup>3</sup> /ч	$84 \cdot 10^3$
Средняя плотность потока быстрых нейтронов при $N = N_{\text{ном}}$ , см <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	$1 \cdot 10^{14}$
Скорость теплоносителя, омывающего твэл, м/с	5,64
Алгоритм управления мощностью АКЗ ВВЭР-1000	У-алгоритм
График изменения входной температуры	$t_{\text{вх}} = \text{const}$

Продолжение таблицы 2.2 – Исходные данные для расчёта выгорания ЯТ

Диапазон суточного изменения мощности реактора	$N = 100\text{--}80 \%$
Диапазон изменения давления пара во II контуре	$p_{II} = 58\text{--}60 \text{ б}$
Используемая при маневре мощностью группа ОР СУЗ	10-я
<b>График изменения мощности:</b>	
При снижении $N$ от $N_1=100 \%$ до $N_2=90 \%$ в течение 0,5 ч (параметр критичности – концентрация борной кислоты)	$dN_{1-2}/d\tau = -2 \%/6 \text{ мин}$
При снижении $N$ от $N_2=90 \%$ до $N_3=80 \%$ в течение 2,5 ч (параметр критичности не задается)	$dN_{2-3}/d\tau = -0,4 \%/6 \text{ мин}$
При выдержке РУ на уровне $N_3=80 \%$ в течение 4 ч (параметр критичности – концентрация борной кислоты)	$N_3=80 \%$
При увеличении $N$ от $N_3=80 \%$ до $N_1=100 \%$ в течение 2 ч (параметр критичности – концентрация борной кислоты)	$dN_{3-1}/d\tau = 1,0 \%/6 \text{ мин}$
<b>График изменения положения ОР СУЗ:</b>	
При изменении мощности РУ в диапазоне $N = 100\text{--}80 \%$ изменение положения ОР СУЗ задавалось с учетом амплитуды перемещения ОР $\Delta H^{\max} = 4 \%$	
<b>Суточный цикл нагружения РУ –</b>	
по альтернативному алгоритму [16]: эксплуатация РУ при $N = N_{\text{ном}}$ в течение 15 ч → снижение $N$ от $N_{\text{ном}}$ до $90 \%$ $N_{\text{ном}}$ в течение 0,5 ч вводом раствора борной кислоты → снижение $N$ до $80 \%$ в течение 2,5 ч за счёт отравления → $N = 80 \%$ в течение 4 ч → повышение $N$ до $N_{\text{ном}}$ в течение 2 ч.	
<b>Распределение шлаков в АКЗ:</b>	
для начала 5-й кампании ХАЭС-2	
<b>Моделирование перестановок ТВС в АКЗ:</b>	
— рассматривался сегмент АКЗ, содержащий 1/6 всех ТВС (без учета центральной), а также 1/6 всех ОР, используемых при маневрировании $N$ ;	
— для ТВС 1, 2 и 3-го года выделяется по 7 ячеек АКЗ, для ТВС 4-го года – 6 ячеек;	
— ячейка АКЗ № 82 (центральная) не рассматривается при моделировании перестановок ТВС в пределах сегмента АКЗ.	

На основе значений тепловой мощности  $Q_{i,j}(\tau)$  расчетных ячеек ( $i, j$ ) по выражению (2.3) найдено изменение глубины выгорания ЯТ  $V_{i,j}(\tau)$  для усредненного по ТВС твэла в течение 4-летней кампании, для заданных алгоритмов перестановок ТВС (табл. 2.1), с учетом режимных и конструктивных параметров РУ, АКЗ, ТВС и твэла реактора ВВЭР-1000 (табл. 2.2) [80].

## **2.2. Анализ механического взаимодействия между топливом и оболочкой**

Процесс накопления деформационной поврежденности в оболочках твэлов ВВЭР-1000 определяется главным образом механическим взаимодействием между топливом и оболочкой (МВТО). Для анализа МВТО необходимо рассчитать изменение напряжений и деформаций в оболочке твэла.

Поскольку в общем случае должен рассматриваться переменный режим эксплуатации РУ с глубиной выгорания ЯТ до 50 МВт·сут/кг и более, для расчета эволюции напряженно-деформированного состояния в оболочке твэла целесообразно использовать метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий принять во внимание влияние переменных режимов на поврежденность оболочки твэла с учетом любой последовательности изменений мощности и режимных параметров РУ, при нормальных условиях эксплуатации [60].

Анализ МВТО выполнялся с помощью ПС «Femaxi», верифицированного для нормальных условий эксплуатации реактора типа ВВЭР-1000 [81].

В ходе анализа МВТО для каждого АС усредненного по ТВС твэла рассчитывались следующие параметры:

— деформация топливных таблеток за счет термического расширения, уплотнения, распухания и релокации;

— распределение напряжений в топливной таблетке и оболочке твэла с учетом растрескивания, пластичности и ползучести таблетки;

Уравнения теплопроводности и механической деформации решались совместно путем организации расчетного цикла сходимости, поскольку распределения температуры и деформации влияют друг на друга [7, 15–17, 22].

## 2.3. Анализ известных критериев поврежденности оболочки твэла

Для разработки математической модели и метода расчета изменения со временем аксиального профиля поврежденности оболочки  $\omega(\tau)$  усредненного по ТВС твэла ВВЭР-1000 в зависимости от расположения ТВС в АКЗ, в переменном режиме нагружения РУ, необходимо выбрать критерий поврежденности оболочки твэла, позволяющий максимально корректно учесть влияние последовательности совокупностей эксплуатационных параметров (историю нагружения) реактора ВВЭР-1000, влияющих на величину  $\omega(\tau)$  [16].

Рассмотрим известные критерии поврежденности оболочки твэла реактора типа ВВЭР-1000.

### 2.3.1. Нормативные критерии приемки твэлов прочностной группы

Согласно нормативным требованиям к обоснованию термомеханического поведения твэлов в АКЗ реакторов ВВЭР, при расчете деформационной поврежденности оболочек твэлов реактора ВВЭР-1000 в качестве критериев прочности и работоспособности твэлов должны использоваться следующие предельные состояния [82]:

— предельное значение повреждения металла оболочки твэла за счет циклически повторяющихся нагрузок;

— предельное значение повреждения металла оболочки твэла за счет терморadiационной ползучести;

Практически эти требования учитываются в нормативном критерии приемки твэлов прочностной группы SC4, ограничивающем величину параметра поврежденности  $\omega(\tau)$  материала оболочки твэла вследствие совместного действия процессов усталости и ползучести: [83, 84]:

$$\omega(\tau) = \sum_i \frac{N_{C_i}}{N_{C_i}^{\text{lim}}} + \int_0^{\tau} \frac{d\tau}{\tau^{\text{lim}}} < 1, \quad (2.4)$$

где  $N_{C_i}$  и  $N_{C_i}^{\text{lim}}$  – количество и предельно допустимое количество циклов переменного нагружения  $i$ -го типа, соответственно;

$\tau$  – время, сут;

$\tau^{\text{lim}}$  – предельная длительность эксплуатации оболочки твэла до разгерметизации при стационарных условиях нагружения.

Нормативный коэффициент запаса  $K_{\text{норм}}$  для SC4 равен 10, что в 6–8 раз превышает значения коэффициентов запаса для остальных критериев прочностной группы (

Таблица 2.) [40, 82–84]:

Таблица 2.3 – Группа прочностных критериев приемки твэлов

Критерий	Физический смысл	Запись	$K_{\text{норм}}$
SC1	в проектных режимах исключается зарождение дефекта в гладкой оболочке и страгивание исходного производственного дефекта	$\sigma_{\theta} < \sigma_{\theta}^{\text{lim}}$ , где $\sigma_{\theta}^{\text{lim}} = 250 \text{ МПа}$	1,2
SC2	исключается потеря устойчивости материала оболочки по механизму “пластического шарнира”	$\sigma_e^{\text{max}} < \sigma_0(T, \phi)$	–
SC3	исключается потеря окружной устойчивости материала оболочки под действием избыточного наружного давления теплоносителя	$P < P^{\text{lim}}$	1,5
SC4	исключается разрушение оболочки из-за ее комбинированного повреждения вследствие длительных статических нагрузок и циклической усталости материала	$\omega < 1$ , где $\omega(\tau)$ – по выражению (2.4)	10
SC5	в переходных режимах исключается развитие пластической деформации оболочки	$\varepsilon_{\theta} < \varepsilon_{\theta}^{\text{lim}}$ , где $\varepsilon_{\theta}^{\text{lim}} = 0,5 \%$	1,2

Согласно существующей практике применения нормативных критериев прочностной группы, критерии SC1–SC5 необходимо использовать совместно [83]:

— критерий SC1 ограничивает величину окружных напряжений  $\sigma_{\theta}$  в

оболочке твэла, что не допускает коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) в атмосфере агрессивных продуктов деления;

— критерий SC2 ограничивает максимальное эквивалентное напряжение в оболочке  $\sigma_e^{\max}$  величиной предела текучести  $\sigma_0(T, \phi)$ , что не допускает потери устойчивости материалом оболочки по механизму «пластического шарнира»;

— критерий SC3 ограничивает величину избыточного наружного давления теплоносителя  $P$ , что не допускает потери окружной устойчивости материалом оболочки;

— критерий SC5 ограничивает величину окружной пластической деформации  $\varepsilon_\theta$  оболочки в кратковременных режимах термомеханического нагружения, когда высокие напряжения появляются, например, при контакте топливного сердечника и оболочки.

Однако, использование критерия SC4 совместно с критериями SC1–SC3, SC5 в методике расчета  $\omega(\tau)$ , учитывающей точную историю нагружения ТВС ВВЭР-1000, затруднительно ввиду того, что оценка поврежденности по SC4 характеризуется высокой степенью *неопределенности* ввиду *неполноты* и *неадекватности* модели накопления поврежденности, используемой при построении критерия SC4 [40].

В результате при проектировании и обосновании термомеханического поведения твэлов в АКЗ реактора типа ВВЭР-1000 ограничения, накладываемые критерием SC4, не имеют практического значения [84].

Коэффициенты запаса для критериев деформационной, теплофизической и коррозионной групп также в 6–8 раз меньше коэффициента запаса для SC4 [83].

Рассматривая целесообразность применения прочностного критерия SC4 при автоматизированном управлении свойствами ЯТ ВВЭР-1000, необходимо отметить, что высокая неопределенность оценки  $\omega(\tau)$  по SC4 обусловлена следующими причинами:

— несоответствие между экспериментальными условиями, при которых получены ограничивающие члены  $N_{C_i}^{\text{lim}}$  и  $\tau^{\text{lim}}$  для компонентов  $\omega(\tau)$ , и реальными условиями эксплуатации оболочек твэлов ВВЭР-1000 (нет учета точной истории нагружения ТВС) [40];

— необоснованность аддитивного принципа построения критерия SC4, в котором компоненты  $\omega(\tau)$ , обусловленные действием процессов ползучести и усталости, имеют одинаковый весовой коэффициент, что не учитывает *преобладающий* удельный вклад процесса ползучести как физического механизма накопления поврежденности в оболочке твэла при частоте переменного нагружения ВВЭР-1000  $\nu \ll 1$  Гц [61, 85].

Таким образом, ввиду наличия у критерия SC4 системных недостатков, прежде всего ввиду отсутствия учета влияния комплекса реальных условий эксплуатации оболочки на ее деформационную поврежденность, на основе SC4 невозможно корректно определить условия разрушения оболочки твэла, тем самым невозможно создать технологические основы автоматизированного управления свойствами ЯТ путем реализации практического алгоритма управления ресурсом оболочек твэлов на АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000.

### **2.3.2. ЭВП-критерий долговечности оболочки твэла**

Для повышения безопасности и экономичности эксплуатации твэлов ВВЭР-1000 необходимо регламентировать управление процессом накопления деформационной поврежденности  $\omega(\tau)$  оболочек твэлов каждой ТВС в зависимости от истории нагружения данной ТВС [10, 12, 16].

Управление накопленной в нормальных условиях поврежденностью оболочек твэлов подразумевает:

- учет требований экономичности эксплуатации твэлов;
- внедрение мероприятий, обеспечивающих неуклонное снижение удельного веса таких факторов разгерметизации оболочек, как МВТО при



низких глубинах выгорания ЯТ, КРН, а также коррозия оболочек в области глубоких выгораний [40];

— соблюдение нормативных требований по ограничению количества негерметичных твэлов в АКЗ [5];

— исключение необоснованно высокой консервативности оценки  $\omega(\tau)$ , ведущей к снижению конкурентоспособности ВВЭР-1000 [22, 40, 56].

Оценка  $\omega(\tau)$  на основе критерия SC4, имеющего  $K_{\text{норм}} = 10$ , является неопределенной, что делает невозможным использование SC4 при создании технологии автоматизированного управления свойствами ЯТ на АЭС с ВВЭР-1000.

Исходя из этого был разработан ЭВТП-метод расчета поврежденности оболочки твэла, основными *преимуществами* которого являются [22, 87]:

— учет влияния истории нагружения ТВС на накопление  $\omega(\tau)$ ;

— учет ползучести как основного физического процесса накопления  $\omega(\tau)$  при частоте нагружения оболочки  $\nu \ll 1$  Гц, характерной для реальных режимов эксплуатации ВВЭР-1000 [61, 62, 85];

— снижение в 5 раз коэффициента запаса  $K_{\text{норм}}$  для ЭВТП-критерия по сравнению с  $K_{\text{норм}}$  для прочностного критерия SC4 [28, 29, 60].

ЭВТП-критерий разгерметизации оболочки твэла записывается в виде [40]:

$$\begin{cases} \omega(\tau) = \int_0^{\tau} \sigma_e \cdot \dot{p}_e \cdot d\tau / A_0 = 1 ; \\ A_0 : \text{ по условию } \lim(dA/d\tau)^{-1} \rightarrow 0 \text{ при } \tau \rightarrow \tau_0 , \end{cases} \quad (2.5)$$

где  $\omega(\tau)$  – поврежденность оболочки;

$A_0$  – удельная энергия рассеяния  $A(\tau)$  в момент начала разрушения оболочки  $\tau_0$ , МДж/м<sup>3</sup>;

$\sigma_e(\tau)$ ,  $\dot{p}_e(\tau)$  – эквивалентное напряжение (Па) и скорость эквивалентной деформации ползучести (с<sup>-1</sup>), соответственно.

Согласно ЭВТП-критерию,  $A_0$  находится по предельному условию для самого напряженного радиального элемента в анализируемом АС оболочки.

Для циркониевого сплава циркалой-4  $A_0 = 55 \text{ МДж/м}^3$  [40].

Применение ЭВТП-критерия при  $A_0 = 30 \text{ МДж/м}^3$  позволяет снизить в 5 раз коэффициент запаса для оценки деформационной поврежденности  $\omega(\tau)$  оболочки твэла.

Удельная энергия рассеяния  $A_0$  не зависит от истории нагружения оболочки твэла, что обуславливает целесообразность применения ЭВТП-критерия при разработке технологических основ автоматизированного управления свойствами ЯТ ВВЭР-1000 [7, 10, 12, 17, 22, 56, 57].

#### 2.4. Соотношение для скорости деформации ползучести оболочки

Поскольку в открытых источниках нет экспериментально обоснованных зависимостей для определения скорости эквивалентной (двухосевой) деформации ползучести  $\dot{\rho}_e$  в оболочке твэла из сплава Э-110, выбраны зависимости модели MATPRO-A для оболочки твэла, изготовленной из циркониевого сплава циркалой-4, которым присущи следующие свойства:

- учет многоосного напряженного состояния оболочки и радиационных эффектов в АКЗ реактора типа ВВЭР-1000;
- применимость во всех диапазонах изменения эксплуатационных параметров ВВЭР-1000;
- консервативность оценки долговечности оболочки, изготовленной из циркониевого сплава Э-110 [13].

Эмпирическое соотношение для скорости эквивалентной деформации ползучести  $\dot{\rho}_e$  ( $\text{с}^{-1}$ ) в зависимости от времени  $t$  ( $\text{с}$ ) имеет вид [86]:

$$\dot{\rho}_e = K \cdot \Phi(\sigma_e + B \cdot e^{C \cdot \sigma_e}) \exp(-10000/R \cdot T) t^{-1/2}, \quad (2.6)$$

где  $K = 5,129 \cdot 10^{-29}$ ;  $B = 7,252 \cdot 10^2$ ;  $C = 4,967 \cdot 10^{-8}$  (размерность  $K$ ,  $B$ ,  $C$  опущена);

$\Phi$  – плотность потока быстрых ( $E > 1$  МэВ) нейтронов,  $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;

$\sigma_e$  – эквивалентное напряжение, Па;

$R$  – газовая постоянная;

$T$  – температура оболочки, К;

Приняв допущение об изотропности материала оболочки и не учитывая напряжение сдвига, для эквивалентного напряжения  $\sigma_e$  на основе модели тонких цилиндрических оболочек справедливо [60]:

$$\sigma_e = \sqrt{0,5[(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_z^2]}, \quad (2.7)$$

где  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$  – тангенциальная и аксиальная компоненты напряжения, соответственно,

$$\sigma_\theta = [d_{ci}(P_{\text{кон}} + P_\Gamma) - d_{co} \cdot P_{\text{ж}}] / (d_{co} - d_{ci}), \quad (2.8)$$

$$\sigma_z = [d_{ci}^2(P_{\text{кон}} + P_\Gamma) - d_{co}^2 \cdot P_{\text{ж}}] / (d_{co}^2 - d_{ci}^2), \quad (2.9)$$

где  $d_{ci}$  – внутренний диаметр оболочки, см;

$P_{\text{кон}}$  – контактное давление между таблеткой и оболочкой;

$P_\Gamma$  – внутреннее давление, Па;

$d_{co}$  – внешний диаметр оболочки, см;

$P_{\text{ж}}$  – давление охлаждающей воды, Па.

Контактное давление между таблеткой и оболочкой, используемое для определения коэффициента теплопередачи зазора, находилось как:

$$P_{\text{кон}} = E_c \cdot u_c (r_{co} - r_{ci}) / r_{ci}^2, \quad (2.10)$$

где  $r_{ci}$ ,  $r_{co}$  – соответственно внутренний и наружный радиусы оболочки, м;

$u_c$  – радиальный сдвиг оболочки, м;

$E_c$  – модуль Юнга оболочки, Па;

$$u_c = u_f + \delta - \delta_o, \quad (2.11)$$

где  $u_f$  – радиальный сдвиг таблетки, м;

$\delta$ ,  $\delta_o$  – соответственно ширина радиального зазора между таблеткой и оболочкой и начальная величина ширины радиального зазора, м.

## 2.5. Замыкающие соотношения для расчета свойств ядерного топлива ВВЭР-1000

Выражения следующих эмпирических моделей использованы как замыкающие соотношения модели расчета изменения со временем аксиальных профилей поврежденности оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания ЯТ  $B_U$  в зависимости от расположения ТВС в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000 [6–8, 10–14, 22, 29, 60, 63–66, 81]:

1. Модель миграции трещин в топливной таблетке;
2. Модель восстановления жесткости треснувшей топливной таблетки;
3. Модель МВТО;
4. Модель генерации и испускания газообразных ПД в топливной таблетке;
5. Модель ослабления термических напряжений в топливной таблетке;
6. Модель испускания газообразных ПД из периферии топливной таблетки;
7. Модель диффузии и течения газа в зазоре между топливной таблеткой и оболочкой твэла;
8. Модель расчета давления газа под оболочкой твэла.

## 2.6. Входные данные модели расчета поврежденности оболочки

*Входные данные* математической модели расчета распределений температуры, напряжения и деформации в твэле ВВЭР-1000 [60]:

- значения линейной мощности  $\langle q_{l,i,j} \rangle$  в АС твэла;
- конструкционные параметры твэла;
- режимные параметры РУ с ВВЭР-1000;
- характеристики программы изменения мощности РУ.

*Входные данные* математической модели расчета распределений удельной энергии рассеяния и поврежденности в оболочке твэла ВВЭР-1000: значения температуры, напряжения и деформации в АС оболочки [40].

## **2.7. Программное средство для анализа развития напряженно-деформированного состояния в оболочке**

ПС FEMAXI, использованное для расчетного анализа развития напряженно-деформированного состояния в оболочке твэла реактора ВВЭР-1000, верифицировано для легководного реактора типа ВВЭР и доступно через международную базу данных стран-членов ОЭСР NEA Data Bank [60].

Данное ПС имеет такое важное достоинство, как пригодность для анализа изменения свойств твэла вплоть до глубин выгорания ЯТ более 50 МВт·сут/кг-U, не только в стационарных режимах эксплуатации РУ с ВВЭР-1000, но также и в переменных режимах нормальной эксплуатации РУ [81].

## **2.8. Алгоритм расчета свойств ядерного топлива**

Разработанный метод расчета изменения со временем аксиальных профилей поврежденности оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания ЯТ  $B_U$  в зависимости от расположения ТВС, в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000, основан на расчетном алгоритме, представленном на рис. 2.4.

Предложенный метод позволил в единой расчетной модели определить для каждой ячейки АКЗ аксиальные профили  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  на протяжении всего времени эксплуатации ТВС в ходе 4-летней кампании ВВЭР-1000.

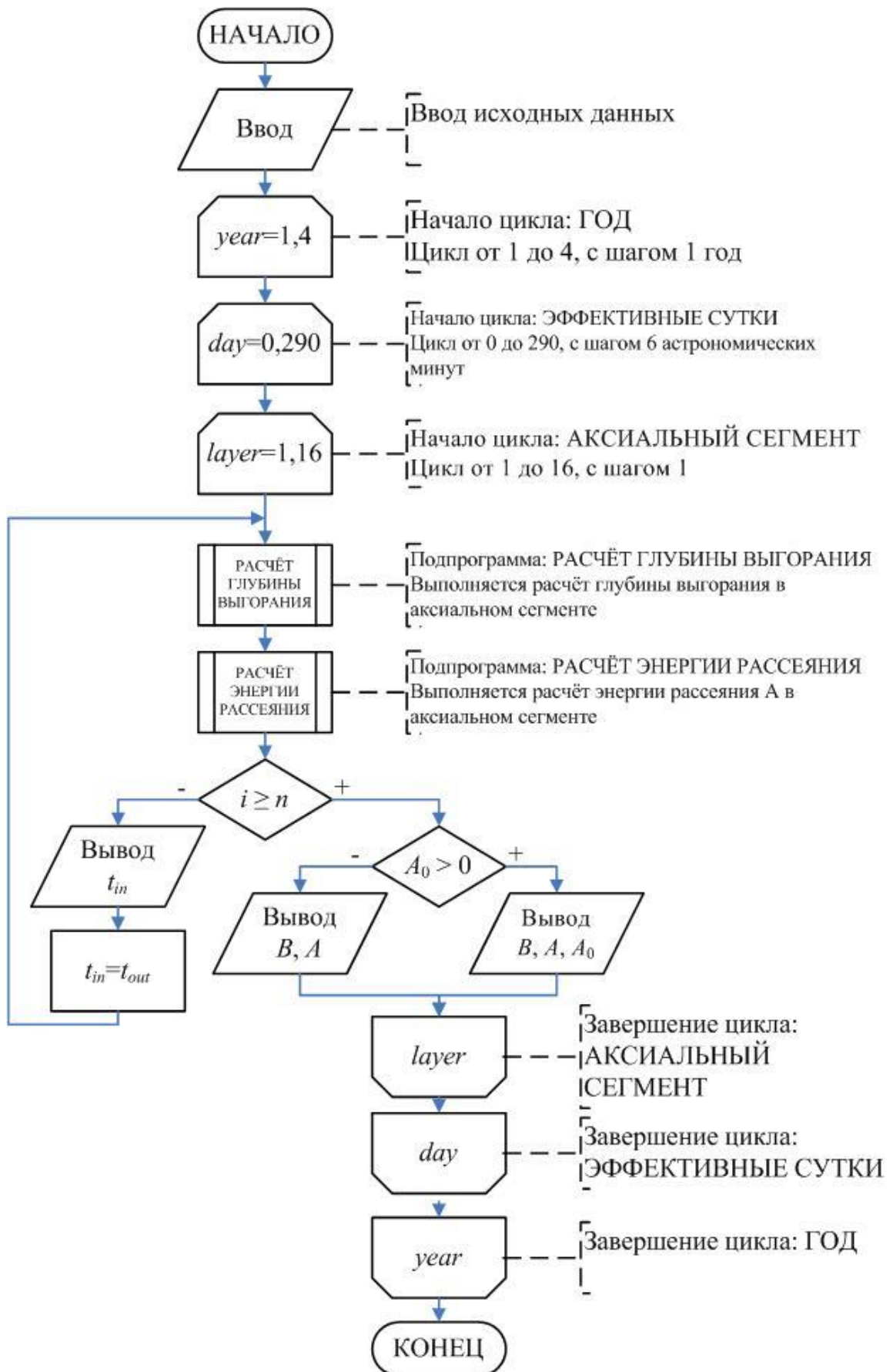


Рисунок 2.4 – Алгоритм расчёта изменения со временем аксиальных профилей  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$

## 2.9. Выводы по второму разделу

1. Разработаны математическая модель и метод расчета изменения со временем аксиальных профилей деформационной поврежденности оболочки  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания ЯТ  $B_U$  усредненного по ТВС твэла ВВЭР-1000 в зависимости от расположения ТВС в АКЗ, в переменном режиме нагружения РУ, что позволит учесть значительную аксиальную неоднородность  $\omega(\tau)$  и  $B_U$  при создании технологических основ автоматизированного управления свойствами ЯТ ВВЭР-1000.

2. В результате выполненного анализа известных критериев долговечности оболочки твэла реактора ВВЭР-1000 в зависимости от величины  $\omega(\tau)$  определено, что при автоматизированном управлении свойствами ЯТ целесообразно применять ЭВТП-метод, имеющий по сравнению с нормативным методом оценки долговечности оболочки твэла такое преимущество, как исключение неопределенности в оценке момента наступления разгерметизации оболочки благодаря учету в ЭВТП-критерии влияния реализованной последовательности совокупностей условий эксплуатации ТВС на накопление  $\omega(\tau)$ , учета ползучести как основного физического процесса накопления  $\omega(\tau)$  при частоте нагружения оболочки, характерной для ВВЭР-1000, а также за счет независимости величины предельного компонента  $A_0$  в ЭВТП-критерии от истории нагружения ТВС.

3. Разработанный метод расчета изменения со временем аксиальных профилей деформационной поврежденности оболочки  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания ЯТ  $B_U(\tau)$  усредненного по ТВС твэла позволит локализовать аксиальные сегменты с наибольшими значениями  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$ , с целью одновременного учета величин  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$ , накопленных в результате реализованной последовательности совокупностей условий эксплуатации ТВС в методике компьютерно-интегрированной оценки целесообразности дальнейшей эксплуатации ЯТ реактора ВВЭР-1000.

### РАЗДЕЛ 3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В ПЕРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ ВВЭР-1000

### 3.1. Модель эффективности управления свойствами твэлов

Следуя методу [6, 22, 63], для определения эффективности эксплуатации ЯТ в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000 будем учитывать ограничения одновременно к безопасности и экономичности эксплуатации твэлов в рамках критериальной модели (КМ) эффективности управления свойствами твэлов. Согласно КМ, целью управления свойствами твэлов ВВЭР-1000 является повышение эффективности нормальной эксплуатации твэлов за счет совместного учета  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  для усредненного по ТВС твэла [40].

Контролируемые параметры: 1)  $\omega(\tau)$  в АС, соответствующем максимуму  $\omega(\tau)$  для усредненного по ТВС твэла; 2)  $B_U(\tau)$  в АС, соответствующем максимуму  $\omega(\tau)$  для усредненного по ТВС твэла.

Изменяемый детерминирующий фактор: алгоритм перестановок ТВС в пределах сектора симметрии АКЗ ВВЭР-1000 (см. табл. 2.1). Исходные данные, принятые для расчета эффективности эксплуатации ЯТ в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000, представлены в табл. 2.2.

Критерий эффективности управления свойствами твэлов имеет вид [87]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max\{Eff_j = 1 - \frac{L_j}{L^{\lim}}\}, \\ L_j = \sqrt{(1 - \omega_j^{\max,*})^2 + (1 - \langle \omega \rangle_j^*)^2 + (1 - B_j^{\min,*})^2}; \\ L^{\lim} = \sqrt{(1 - \omega^{\lim,*})^2 + (1 - \langle \omega \rangle^{\lim,*})^2 + (1 - B^{\lim,*})^2} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

где  $\omega^{\lim}$ ,  $\langle \omega \rangle^{\lim}$  и  $B^{\lim}$  приняты в качестве пределов для контролируемых параметров  $\omega(\tau)$  и  $\langle B(\tau) \rangle$ :

$$\omega^{\text{opt}} \leq \omega_j^{\max} \leq \omega^{\lim}; \quad \langle \omega \rangle^{\text{opt}} \leq \langle \omega \rangle_j \leq \langle \omega \rangle^{\lim}; \quad B^{\lim} \leq B_j^{\min} \leq B^{\text{opt}}. \quad (3.2)$$



Отсюда:

$$\omega^{\text{lim}*} \leq \omega_j^{\text{max},*} \leq 1; \langle \omega \rangle^{\text{lim}*} \leq \langle \omega \rangle_j^* \leq 1; B^{\text{lim}*} \leq B_j^{\text{min},*} \leq 1, \quad (3.3)$$

$$\text{где } \omega^{\text{lim}*} = \frac{1 - \omega^{\text{lim}}}{1 - \omega^{\text{opt}}}; \omega_j^{\text{max},*} = \frac{1 - \omega_j^{\text{max}}}{1 - \omega^{\text{opt}}}; \langle \omega \rangle^{\text{lim}*} = \frac{1 - \langle \omega \rangle^{\text{lim}}}{1 - \langle \omega \rangle^{\text{opt}}}; \langle \omega \rangle_j^* = \frac{1 - \langle \omega \rangle_j}{1 - \langle \omega \rangle^{\text{opt}}};$$

$$B^{\text{lim}*} = B^{\text{lim}} / B^{\text{opt}}; B_j^{\text{min},*} = B_j^{\text{min}} / B^{\text{opt}}. \quad (3.4)$$

Аналогично подходу работы [87], введены требования:

$$\omega^{\text{opt}} = \min\{\omega_j^{\text{max}}\}; \langle \omega \rangle^{\text{opt}} = \min\{\langle \omega \rangle_j\}; B^{\text{opt}} = \max\{B_j^{\text{min}}\}. \quad (3.5)$$

Принимая условие равной приоритетности требований безопасности и экономичности эксплуатации твэлов [87]:

$$\omega^{\text{lim}*} = \langle \omega \rangle^{\text{lim}*} = B^{\text{lim}*}. \quad (3.6)$$

Тогда, определив значение  $\omega^{\text{lim}}$ , соответствующие  $\langle \omega \rangle^{\text{lim}}$  и  $B^{\text{lim}}$  равны:

$$\langle \omega \rangle^{\text{lim}} = 1 - \frac{(1 - \omega^{\text{lim}})(1 - \langle \omega \rangle^{\text{opt}})}{1 - \omega^{\text{opt}}}; B^{\text{lim}} = \frac{(1 - \omega^{\text{lim}})B^{\text{opt}}}{1 - \omega^{\text{opt}}}. \quad (3.7)$$

### 3.2. Исследование закономерностей изменения со временем аксиальных профилей поврежденности оболочки и глубины выгорания твэла

Используя ПС FEMAXI, модель коррозии оболочки твэла MATPRO-A [60], ЭВТП-критерий при  $A_0 = 30 \text{ МДж/м}^3$ , рассчитывались  $\omega(1460 \text{ сут})$  и  $B(1460 \text{ сут})$  для суточного цикла нагружения РУ с ВВЭР-1000 по альтернативному алгоритму при следующих условиях [16, 22, 88]: 1) используется У-алгоритм управления мощностью АКЗ; 2) температура теплоносителя на входе АКЗ постоянна; 3) диапазон суточного изменения мощности реактора  $N = 100\text{--}80 \%$ ; 4) график изменения режимных параметров РУ при маневрировании мощностью приведен в табл. 2.2.

Рассчитанные значения  $\omega(\tau)$  и  $B(\tau)$  в АС усредненного по ТВС твэла для перестановок ТВС алгоритмов  $j = 3$  и 18 приведены при  $\tau = 365 \text{ сут (I)}$ , 730 сут (II), 1095 сут (III), 1460 сут (IV) – табл. 3.1, 3.2.

Таблица 3.1 – Поврежденность оболочек и глубина выгорания в АС усредненного по ТВС твэла алгоритма 3

<i>j</i>	Перестановка	АС	$\omega(\tau) = A/A_0,$ %				<i>B</i> , МВт·сут/кг			
			I	II	III	IV	I	II	III	IV
3	9-19-21-8	7	1,125	2,976	5,771	6,099	16,28	33,70	48,66	55,76
		6	1,169	3,941	7,186	7,512	18,55	37,95	54,66	62,49
		5	1,173	3,398	5,991	6,232	19,62	39,86	57,13	65,29
		4	1,120	1,923	4,200	4,383	20,10	40,54	57,85	66,05
		3	1,036	1,118	1,617	1,710	19,97	40,01	56,86	64,86
	5-41-68-43	7	1,244	1,569	2,720	3,979	11,95	29,20	42,34	54,74
		6	1,397	1,931	3,237	4,636	13,72	32,79	46,80	60,47
		5	1,404	1,516	2,149	3,212	14,60	34,23	48,43	62,39
		4	1,357	1,375	1,441	1,657	14,95	34,62	48,56	62,37
		3	0,564	0,636	0,797	0,895	14,84	33,98	47,37	60,76
	55-22-10	7	1,144	3,306	6,112	—	17,29	34,79	49,32	—
		6	1,167	4,115	7,222	—	18,98	38,44	54,67	—
		5	1,169	3,355	5,839	—	19,59	39,86	56,91	—
		4	1,090	1,700	3,936	—	19,51	39,96	57,26	—
		3	0,706	0,995	1,452	—	19,03	39,06	56,07	—
	13-11-20-6	7	1,137	1,577	3,630	3,722	16,22	31,50	46,10	50,42
		6	1,186	2,116	4,644	4,738	18,42	35,70	51,97	56,80
		5	1,179	1,608	4,050	4,139	19,52	37,76	54,65	59,75
		4	0,922	1,126	2,395	2,467	19,96	38,53	55,48	60,61
		3	0,841	0,916	0,921	0,943	19,77	38,01	54,53	59,56
	3-30-54-1	7	1,220	2,140	3,646	3,739	13,63	31,06	44,66	49,25
		6	1,328	2,795	4,525	4,624	15,75	35,16	49,87	55,04
		5	1,315	2,066	3,657	3,746	16,72	36,77	51,81	57,20
		4	1,059	1,262	1,856	1,899	17,24	37,34	52,26	57,68
		3	0,715	0,759	0,815	0,828	17,20	36,82	51,18	56,48
	4-32-18-42	7	1,220	2,168	3,328	4,674	13,54	31,04	43,53	55,92
		6	1,333	2,844	4,283	5,740	15,68	35,18	49,09	62,69
		5	1,324	2,164	3,599	4,937	16,70	36,89	51,48	65,49
		4	1,065	1,275	1,812	2,614	17,17	37,34	52,07	65,96
		3	0,735	0,767	0,835	0,983	17,06	36,68	51,05	64,44
2-31-12-29	7	1,233	1,779	3,671	5,128	12,02	29,28	43,75	56,55	
	6	1,389	2,646	5,036	6,585	13,85	33,70	49,91	63,88	
	5	1,394	2,045	4,462	5,908	14,74	35,35	52,27	66,70	
	4	1,075	1,352	2,632	3,794	15,15	35,81	52,91	67,28	
	3	1,020	1,191	1,261	1,482	15,06	35,23	51,96	65,90	

Таблица 3.2 – Поврежденность оболочек и глубина выгорания в АС  
усредненного по ТВС твэла алгоритма 18

<i>j</i>	Перестановка	АС	$\omega(\tau) = A/A_0,$ %				<i>B</i> , МВт·сут/кг			
			I	II	III	IV	I	II	III	IV
18	5-30-10-43	7	1,243	1,726	3,699	5,033	11,95	29,37	43,90	56,31
		6	1,396	2,238	4,696	6,128	13,72	33,14	49,37	63,04
		5	1,402	1,565	4,021	5,313	14,60	34,66	51,70	65,66
		4	1,026	1,356	2,311	3,236	14,95	35,05	52,36	66,17
		3	0,952	1,223	1,263	1,308	14,84	34,47	51,47	64,85
	9-11-20-1	7	1,126	1,603	3,657	3,760	16,28	31,55	46,16	50,75
		6	1,170	2,183	4,707	4,810	18,55	35,83	52,10	57,26
		5	1,174	1,657	4,110	4,207	19,62	37,86	54,76	60,14
		4	0,932	1,122	2,447	2,527	20,10	38,67	55,62	61,04
		3	0,807	0,901	0,941	0,973	19,97	38,21	54,73	60,04
	3-22-54-29	7	1,219	2,222	3,733	5,143	13,63	31,13	44,73	57,54
		6	1,328	2,879	4,613	6,143	15,75	35,20	49,91	63,89
		5	1,315	2,312	3,932	5,382	16,72	36,99	52,03	66,46
		4	1,185	1,269	2,107	3,108	17,24	37,69	52,60	66,97
		3	0,834	0,941	1,011	1,158	17,20	37,23	51,58	65,52
	13-19-21-42	7	1,137	2,942	5,718	7,405	16,22	33,64	48,60	61,00
		6	1,186	3,871	7,075	8,840	18,42	37,82	54,53	68,13
		5	1,179	3,353	5,946	7,246	19,52	39,76	57,03	71,04
		4	1,126	1,860	4,128	5,187	19,96	40,41	57,71	71,61
		3	0,722	1,041	1,572	2,162	19,77	39,81	56,65	70,05
	2-31-18	7	1,233	1,779	2,881	—	12,02	29,28	41,76	—
		6	1,389	2,646	4,031	—	13,85	33,70	47,61	—
		5	1,394	2,045	3,405	—	14,74	35,35	49,94	—
		4	1,070	1,351	1,710	—	15,15	35,81	50,54	—
		3	0,734	0,857	0,960	—	15,06	35,23	49,61	—
	55-41-12-6	7	1,144	2,979	5,516	5,660	17,29	34,54	49,01	53,33
		6	1,167	3,632	6,386	6,516	18,98	38,05	54,26	59,10
		5	1,169	2,679	5,099	5,190	19,59	39,22	56,14	61,24
		4	1,090	1,219	3,121	3,199	19,51	39,18	56,28	61,41
		3	0,808	0,995	1,088	1,117	19,03	38,17	54,90	59,93
	4-32-68-8	7	1,220	2,168	3,481	3,718	13,54	31,04	44,18	51,28
		6	1,333	2,844	4,313	4,559	15,68	35,18	49,19	57,02
		5	1,324	2,164	3,402	3,606	16,70	36,89	51,09	59,26
		4	1,065	1,275	1,661	1,751	17,17	37,34	51,29	59,48
		3	0,689	0,767	0,813	0,862	17,06	36,68	50,08	58,08

Результаты расчета изменения аксиальных профилей  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  в зависимости от времени и истории нагружения ТВС для суточного цикла переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000, с учетом последовательности перестановок ТВС в АКЗ, показали, что существуют следующие закономерности:

— аксиальное распределение величины поврежденности оболочки  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания ЯТ  $B_U(\tau)$  для усредненного по ТВС твэла характеризуется существенной неоднородностью как для  $\omega(\tau)$ , так и для  $B_U(\tau)$ ;

— для *алгоритма 3* интервал разброса значений *поврежденности* оболочки среднего твэла, по пяти АС с наибольшей величиной  $\omega(\tau)$ , составил:  $\omega_3(\tau) = [0,828 \% ; 7,512 \%]$ , со среднеарифметическим  $\langle \omega_3(\tau) \rangle \approx 3,93 \%$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma \approx 1,944 \%$ ;

— для *алгоритма 18* интервал разброса значений *поврежденности* оболочки среднего твэла, по пяти АС с наибольшей величиной  $\omega(\tau)$ , составил:  $\omega_{18}(\tau) = [0,862 \% ; 8,84 \%]$ , со среднеарифметическим  $\langle \omega_{18}(\tau) \rangle \approx 3,95 \%$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma \approx 2,066 \%$ ;

— для *алгоритма 3* интервал разброса значений *глубины выгорания* среднего твэла, по пяти АС с наибольшей величиной  $\omega(\tau)$ , составил:

$B_{U3}(\tau) = [49,25 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U} ; 67,28 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}]$ , со среднеарифметическим  $\langle B_{U3}(\tau) \rangle \approx 59,63 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_3 \approx 5,028 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}$ ;

— для *алгоритма 18* интервал разброса значений *глубины выгорания* среднего твэла, по пяти АС с наибольшей величиной  $\omega(\tau)$ , составил:

$B_{U18}(\tau) = [41,76 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U} ; 71,61 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}]$ , со среднеарифметическим  $\langle B_{U18}(\tau) \rangle \approx 59,63 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{18} \approx 7,062 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}$ ;

— для *алгоритмов 3 и 18* максимум величины  $\omega(\tau)$  всегда приходится на 6-й АС;

— для алгоритмов 3 и 18 максимум величины  $B_U(\tau)$  для 13 из 14 перестановок ТВС приходится на 4-й АС, тогда как для одной перестановки – на 4-й и 5-й АС.

### 3.3. Расчет эффективности эксплуатации ядерного топлива в суточном режиме нагружения РУ с ВВЭР-1000

В отличие от метода работ [6, 22, 87], где в качестве контролируемых параметров использовались поврежденность оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  и глубина выгорания ЯТ  $B_U(\tau)$  в АС, соответствующем максимуму  $\omega(\tau)$  для усредненного по ТВС твэла, для определения эффективности эксплуатации ЯТ в суточном режиме нагружения РУ с ВВЭР-1000 будем учитывать изменение аксиального профиля  $B_U(\tau)$  в зависимости от времени и истории нагружения ТВС, с учетом последовательности перестановок ТВС в АКЗ.

В качестве контролируемых параметров целесообразно выбрать:

- 1) Максимальное значение  $\omega(\tau)$  среди всех АС усредненных по ТВС твэлов рассматриваемого алгоритма перестановок ТВС;
- 2) Минимальное значение  $\langle B(\tau) \rangle$  в пяти АС, имеющих максимальные  $\omega(\tau)$  для усредненных по ТВС твэлов рассматриваемого алгоритма перестановок.

Принимая  $\omega^{\text{lim}} = 13\%$ , на основе выражения (3.1) с учетом отмеченной модификации контролируемых параметров, для алгоритмов 3 и 18 была рассчитана величина критерия эффективности  $Eff$  эксплуатации ЯТ.

Согласно выражению (3.5):

$$\omega^{\text{opt}} = 7,512\% ; \langle \omega \rangle^{\text{opt}} = 3,93\% ; B^{\text{opt}} = 49,25 \text{ МВт}\cdot\text{сут}/\text{кг}\cdot\text{У}. \quad (3.8)$$

На основе соотношения (3.7):

$$\langle \omega \rangle^{\text{lim}} = 1 - \frac{(1 - 0,13)(1 - 0,0393)}{1 - 0,07512} \approx 0,096; \quad (3.9)$$

$$B^{\text{lim}} = \frac{(1-0,13) \cdot 49,25}{1-0,07512} \approx 46,33 \text{ (Вт}\cdot\text{сут/кг}\cdot\text{У)} \quad (3.10)$$

На основе соотношения (3.2):

$$0,07512 \leq \omega_j^{\text{max}} \leq 0,13 \quad (3.11)$$

$$0,0393 \leq \langle \omega \rangle_j \leq 0,096 \quad (3.12)$$

$$46,33 \leq B_j^{\text{min}} \leq 49,25 \quad (3.13)$$

Из выражений (3.11)–(3.13), с учетом соотношений (3.3), (3.4):

$$\omega^{\text{lim},*} = \frac{1 - \omega^{\text{lim}}}{1 - \omega^{\text{opt}}} = \frac{1 - 0,13}{1 - 0,07512} \approx 0,941 \quad (3.14)$$

$$\langle \omega \rangle^{\text{lim},*} = \frac{1 - \langle \omega \rangle^{\text{lim}}}{1 - \langle \omega \rangle^{\text{opt}}} \approx \frac{1 - 0,096}{1 - 0,0393} \approx 0,941 \quad (3.15)$$

$$B^{\text{lim},*} = B^{\text{lim}} / B^{\text{opt}} \approx 46,33 / 49,25 \approx 0,941 \quad (3.16)$$

Тогда для приведенных параметров справедливо:

$$0,941 \leq \omega_j^{\text{max},*} \leq 1; 0,941 \leq \langle \omega \rangle_j^* \leq 1; 0,941 \leq B_j^{\text{min},*} \leq 1, \quad (3.17)$$

где  $\omega_3^{\text{max},*} = \frac{1 - \omega_3^{\text{max}}}{1 - \omega^{\text{opt}}} = \frac{1 - 0,07512}{1 - 0,07512} = 1; \omega_{18}^{\text{max},*} = \frac{1 - \omega_{18}^{\text{max}}}{1 - \omega^{\text{opt}}} = \frac{1 - 0,0884}{1 - 0,07512} \approx 0,986;$

$$\langle \omega \rangle_3^* = \frac{1 - \langle \omega \rangle_3}{1 - \langle \omega \rangle^{\text{opt}}} \approx \frac{1 - 0,0393}{1 - 0,0393} = 1; \langle \omega \rangle_{18}^* = \frac{1 - \langle \omega \rangle_{18}}{1 - \langle \omega \rangle^{\text{opt}}} \approx \frac{1 - 0,0395}{1 - 0,0393} \approx 1;$$

$$B_3^{\text{min},*} = B_3^{\text{min}} / B^{\text{opt}} = 49,25 / 49,25 = 1; B_{18}^{\text{min},*} = B_{18}^{\text{min}} / B^{\text{opt}} = 41,76 / 49,25 \approx 0,848;$$

Используя выражение (3.1), рассчитана эффективность эксплуатации ЯТ.

$$L^{\text{lim}} \approx 0,102; L_3 = 0; L_{18} \approx 0,153;$$

$$Eff_3 = 1 - \frac{L_3}{L^{\text{lim}}} = 1 - \frac{0}{0,102} = 1; Eff_{18} = 1 - \frac{L_{18}}{L^{\text{lim}}} = 1 - \frac{0,153}{0,102} = -0,5 \text{ (табл. 3.3).}$$

Таблица 3.3 – Эффективность эксплуатации ЯТ

$j$	$\omega_j^{\text{max}}, \%$	$\langle \omega \rangle_j, \%$	$B_j^{\text{min}}, \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг}$	$Eff_j$
3	7,512	3,93	49,25	1
18	8,840	3,95	41,76	-0,5

Таким образом, в результате расчета эффективности эксплуатации ЯТ на основе определения изменения со временем аксиальных профилей поврежденности оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания ЯТ  $B_U$  в зависимости от расположения ТВС, в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000, определено, что алгоритм 3 имеет преимущество перед алгоритмом 18.

Основная физическая причина того, что  $Eff_{18} < 0$ , состоит в том, что  $B_{18}^{\min} = 41,76$  МВт·сут/кг, т.е. значительно меньше принятого минимально допустимого значения для глубины выгорания ЯТ  $B^{\lim} \approx 46,33$  МВт·сут/кг.

В то же время,  $B_3^{\min} = 49,25$  МВт·сут/кг, что значительно превышает  $B^{\lim}$ .

### **3.4. Сравнительный анализ изменения аксиальных профилей поврежденности оболочки твэла и глубины выгорания ЯТ в различных режимах нагружения РУ с ВВЭР-1000**

#### **3.4.1. Базовый режим эксплуатации РУ с ВВЭР-1000**

Базовый режим эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 предполагает поддержание неизменного уровня мощности РУ  $N=100$  % в течение всей четырёхлетней топливной кампании [19]. Расчетное изменение АО при моделировании эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 на протяжении четырёхлетнего периода в базовом режиме оставалось в допустимом интервале изменения АО [54].

Изменение со временем аксиальных профилей поврежденности оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания ЯТ  $B_U(\tau)$  в базовом режиме нагружения ВВЭР-1000 представлено на рис. 3.1 (для твэла, усредненного по всем ТВС АКЗ, продолжительность каждого года составила 290 эффективных суток).

В результате моделирования эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 в базовом режиме нагружения получено, что максимум  $\omega(\tau)$  для усредненной по алгоритму 3 перестановки ТВС приходится на 6-й АС, а максимум  $B_U(\tau)$  – на 4-й АС (рис. 3.2).

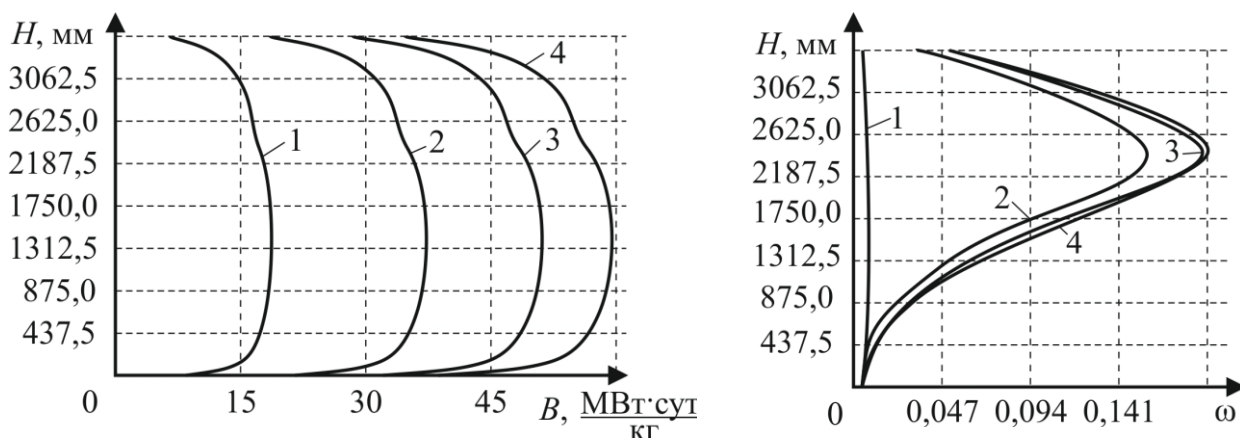


Рисунок 3.1 – Изменение со временем аксиальных профилей  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  в базовом режиме нагружения ВВЭР-1000: 1, 2, 3, 4 – 1-й, 2-й, 3-й и 4-й год эксплуатации ЯТ, соответственно

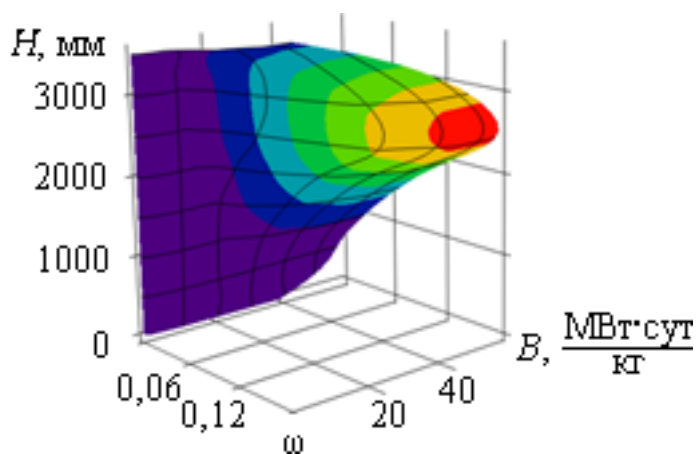


Рисунок 3.2 – Локализация максимумов поврежденности оболочки твэла и глубины выгорания ЯТ в базовом режиме нагружения ВВЭР-1000

Полученные данные по локализации АС с максимальной поврежденностью и максимальным выгоранием ЯТ в базовом режиме нагружения ВВЭР-1000 для твэла, усредненного по всем ТВС АКЗ, подтвердили результаты расчета изменения аксиальных профилей  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  в зависимости от времени и истории нагружения ТВС ВВЭР-1000 с учетом последовательности перестановок ТВС в АКЗ для суточного цикла переменного нагружения РУ.



### 3.4.2. Суточный цикл переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000

В соответствии с суточным циклом переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000, моделировалось ежедневное снижение мощности РУ  $N$  от 100 до 80 % (Рисунок 3.).

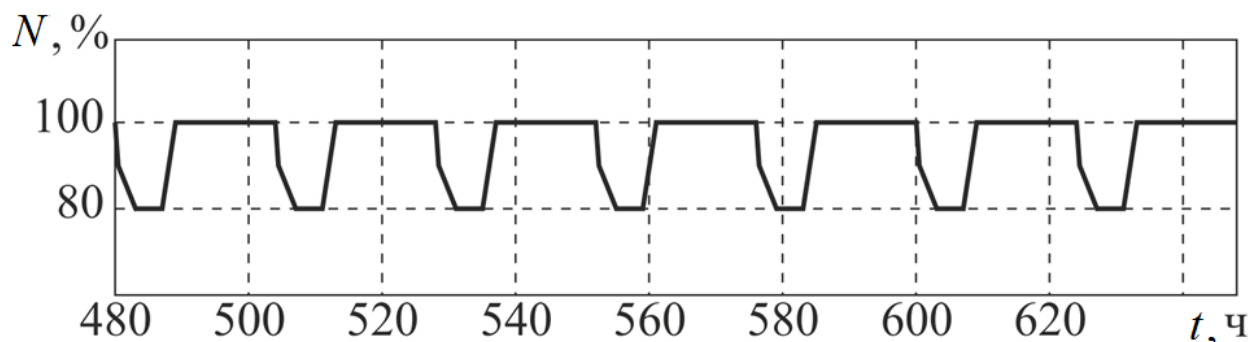


Рисунок 3.3 – Изменение уровня мощности РУ при эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 по суточному циклу переменного нагружения

Суточный цикл переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000 предполагает следующий алгоритм изменения  $N$  [7, 10, 12–17]:

- снижение  $N$  от 100 до 90 % в течение 0,5 ч путем введения борной кислоты, температура теплоносителя на входе АКЗ  $T_{вх}$  постоянна;
- снижение  $N$  от 90 до 80 % в течение 2,5 ч за счет отравления АКЗ, вводом рабочей группы ОР СУЗ величина АО поддерживалась в регламентных пределах (Рисунок 3.).

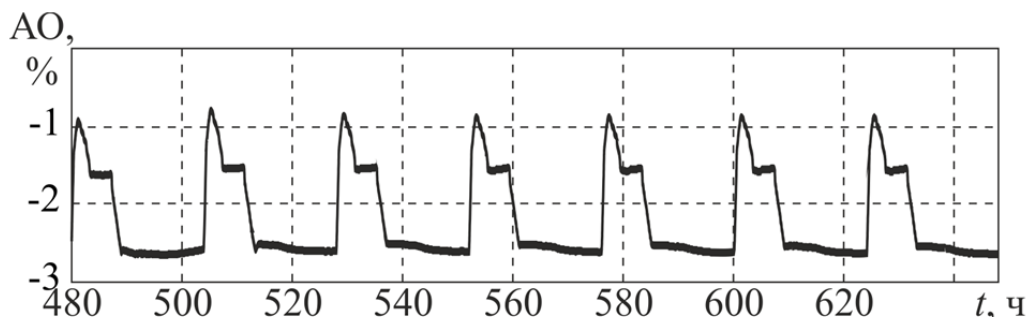


Рисунок 3.4 – Изменение величины АО при эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 по суточному циклу переменного нагружения

- эксплуатация реактора в течение 4 ч на уровне мощности 80 %;
- возвращение РУ на номинальный уровень мощности введением «чистого дистиллята», а также изъятием рабочей группы ОР СУЗ из АКЗ для поддержания АО в заданных пределах [51, 55, 71].

В результате модельного эксперимента для суточного цикла переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000 также было установлено, что максимум  $\omega(\tau)$  для усредненной по алгоритму 3 перестановки ТВС приходится на 6-й АС, а максимум глубины выгорания ЯТ – на 4-й АС (рис. 3.5, 3.6).

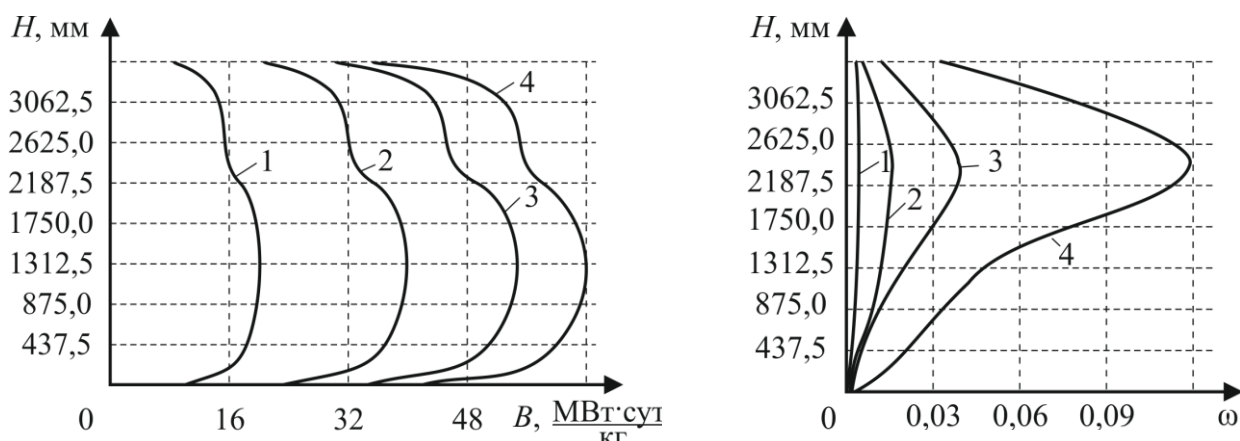


Рисунок 3.5 – Изменение со временем аксиальных профилей  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  для суточного цикла переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000:  
1, 2, 3, 4 – 1-й, 2-й, 3-й и 4-й год эксплуатации ЯТ, соответственно

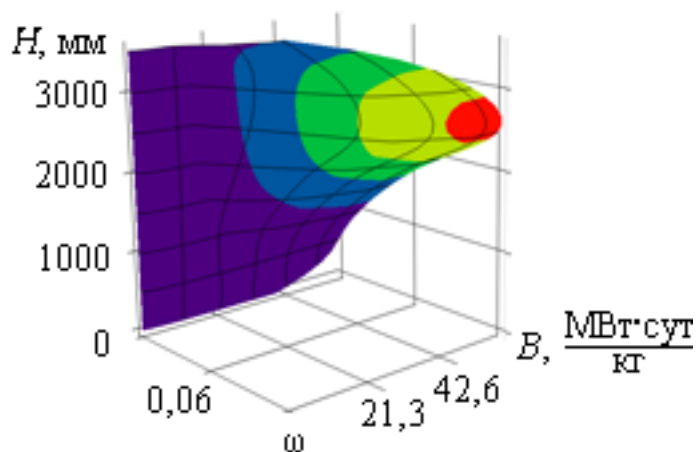


Рисунок 3.6 – Локализация максимумов  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  для суточного цикла переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000

### 3.4.3. Недельный цикл переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000

Недельный цикл переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000 предполагает следующий алгоритм изменения уровня мощности РУ  $N$  [7, 10, 12–17]:

- $N=N_{\text{ном}}$  в течение 5 сут;
- в течение следующих 5 ч  $N$  понижалась до 50 %;
- эксплуатация РУ при  $N = 50\%$  на протяжении 40 часов;
- повышение  $N$  от 50 до 100 % в течение 3 ч (Рисунок 3.7).

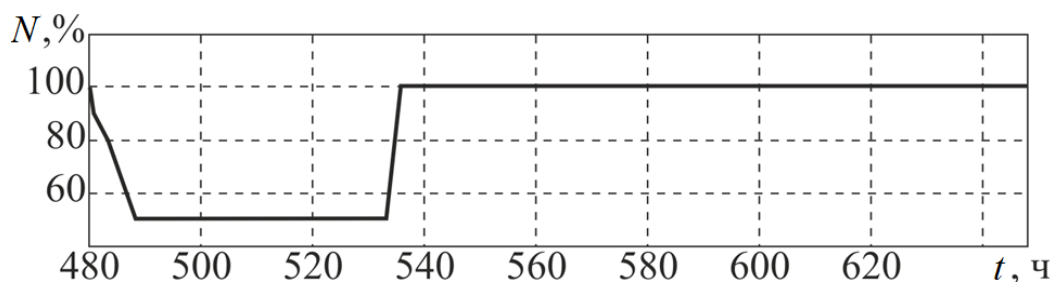


Рисунок 3.7 – Изменение уровня мощности РУ с ВВЭР-1000 при эксплуатации по недельному циклу переменного нагружения

За счет ввода в АКЗ 10-й группы ОР СУЗ, а также, если положение 10-й группы достигло 86 %, и 9-й группы ОР СУЗ, величина АО поддерживалась в регламентных пределах (рис. 3.8).

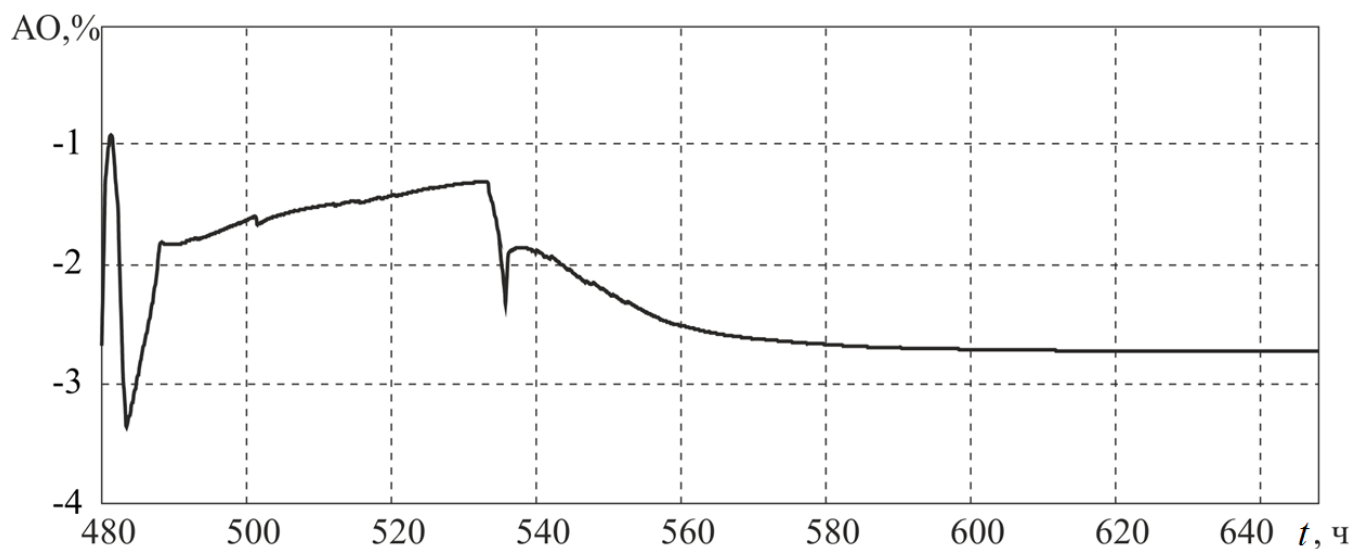


Рисунок 3.8 – Изменение величины АО при эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 по недельному циклу переменного нагружения

В результате модельного эксперимента для недельного цикла переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000 установлено, что максимум  $\omega(\tau)$  для усредненной по алгоритму 3 перестановки ТВС приходится на 6-й АС, а максимум глубины выгорания ЯТ – на 4-й АС (рис. 3.9, 3.10).

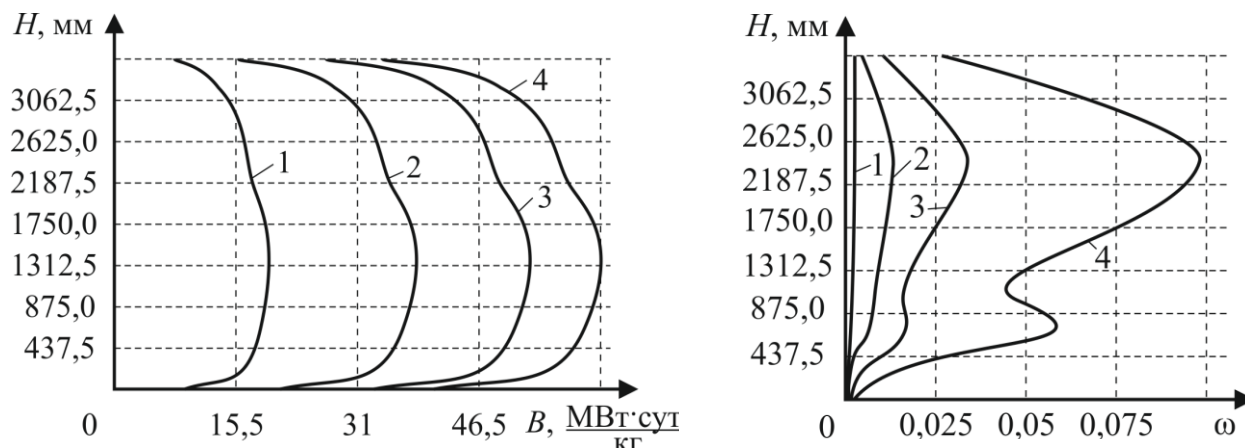


Рисунок 3.9 – Изменение со временем аксиальных профилей  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  для недельного цикла переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000: 1, 2, 3, 4 – 1-й, 2-й, 3-й и 4-й год эксплуатации ЯТ, соответственно

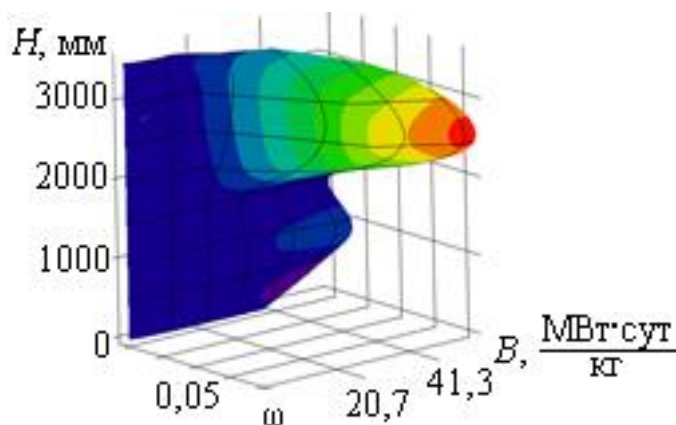


Рисунок 3.10 – Локализация максимумов  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  для недельного цикла переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000

#### 3.4.4. Комбинированный цикл переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000

Согласно комбинированному циклу переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000, РУ эксплуатируется по суточному циклу переменного нагру-

жения в течение 4 сут, после чего  $N$  понижается до 50 % в соответствии с недельным циклом переменного нагружения – Рисунок 3.1 [7, 10, 12–17].

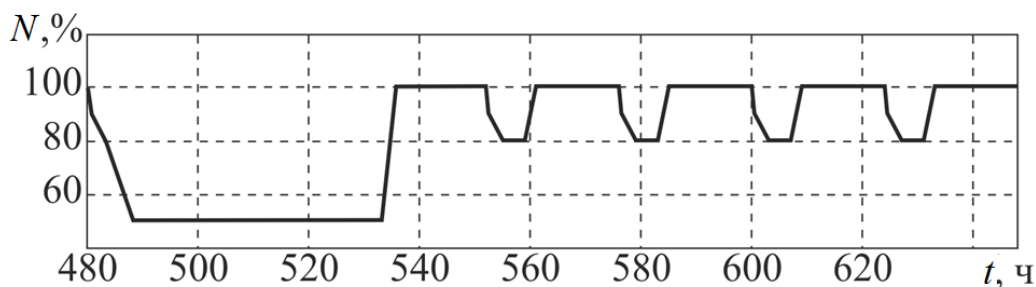


Рисунок 3.11 – Изменение уровня мощности РУ с ВВЭР-1000 при эксплуатации по комбинированному циклу переменного нагружения

График изменения АО при моделировании комбинированного цикла переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000 представлен на рис. 3.12.

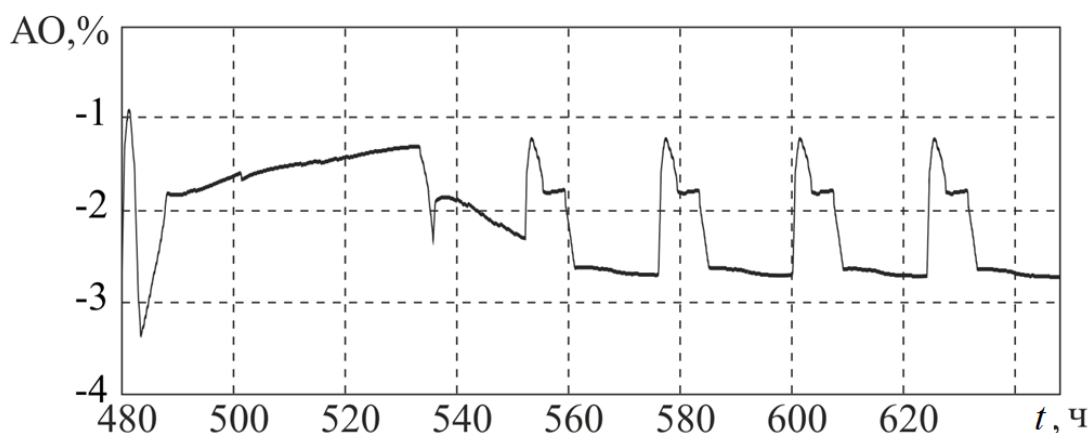


Рисунок 3.12 – Изменение величины АО при эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 по комбинированному циклу переменного нагружения

В результате модельного эксперимента для комбинированного цикла переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000 установлено, что максимум  $\omega(\tau)$  для усредненной по алгоритму 3 перестановки ТВС приходится на 6-й АС, а максимум глубины выгорания ЯТ – на 4-й АС (рис. 3.13, 3.14).

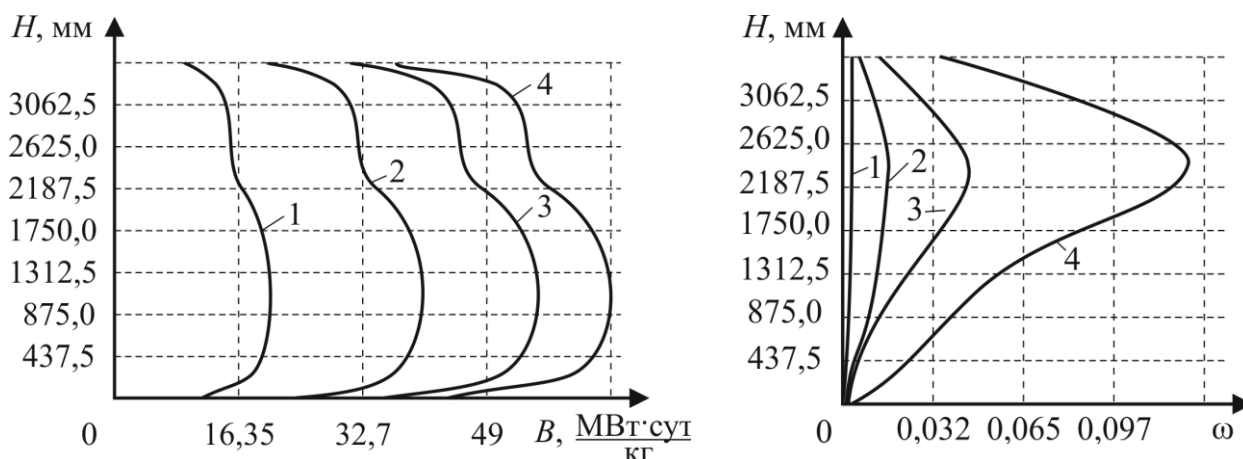


Рисунок 3.13 – Изменение со временем аксиальных профилей  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  для комбинированного цикла переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000:  
1, 2, 3, 4 – 1-й, 2-й, 3-й и 4-й год эксплуатации ЯТ, соответственно

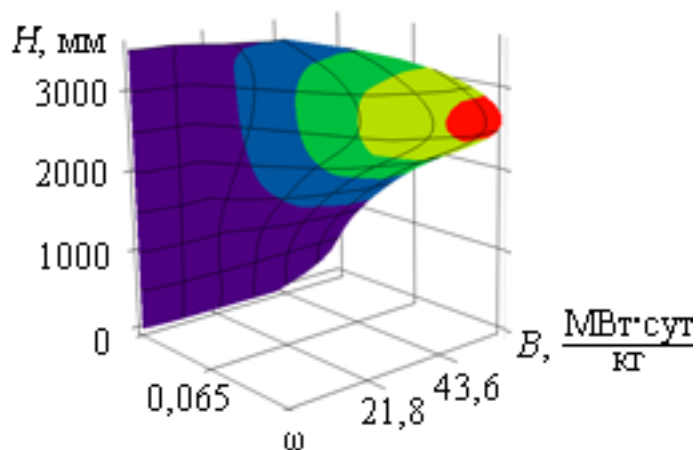


Рисунок 3.14 – Локализация максимумов  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  для комбинированного цикла переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000

### 3.5. Выводы по третьему разделу

1. В результате исследования закономерностей изменения со временем аксиальных профилей поврежденности оболочки  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания ЯТ  $B_U(\tau)$  для усредненного по ТВС твэла в зависимости от расположения ТВС в АКЗ, в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000 по суточному циклу нагружения, определено, что для модельного алгоритма перестановок ТВС (№ 3) и практически использованного алгоритма перестановок ТВС

(№ 18) интервал разброса значений  $\omega(\tau)$  для пяти АС с наибольшей величиной  $\omega(\tau)$  составил:

— № 3:  $\omega_3(\tau) = [0,828 \% ; 7,512 \%]$ , со среднеарифметической поврежденностью  $\langle \omega_3(\tau) \rangle \approx 3,93 \%$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma \approx 1,944 \%$ .

— №18:  $\omega_{18}(\tau) = [0,862 \% ; 8,84 \%]$ , со среднеарифметической поврежденностью  $\langle \omega_{18}(\tau) \rangle \approx 3,95 \%$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma \approx 2,066\%$ .

2. Для модельного и практически использованного алгоритмов перестановок ТВС интервал разброса значений глубины выгорания  $B_U(\tau)$  для пяти АС с наибольшей величиной  $\omega(\tau)$ , составил:

—  $B_{U,3}(\tau) = [49,25 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U} ; 67,28 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}]$ , со среднеарифметическим  $\langle B_{U,3}(\tau) \rangle \approx 59,63 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_3 \approx 5,028 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}$ ;

—  $B_{U,18}(\tau) = [41,76 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U} ; 71,61 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}]$ , со среднеарифметическим  $\langle B_{U,18}(\tau) \rangle \approx 59,63 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{18} \approx 7,062 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}$ .

3. Путем модификации критерия эффективности управления свойствами твэлов предложен критерий эффективности  $Eff$  эксплуатации ЯТ ВВЭР-1000, позволяющий определять алгоритмы перестановок ТВС с минимальными среднеарифметическими значениями поврежденности оболочек твэлов  $\omega(\tau)$ , а также минимальными среднеквадратическими отклонениями  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания  $B_U(\tau)$  ЯТ для пяти АС с наибольшей величиной  $\omega(\tau)$ .

4. Максимум величины  $\omega(\tau)$  всегда приходится на 6-й АС как для модельного, так и для практически использованного алгоритма перестановок ТВС.

5. Максимум величины  $B_U(\tau)$  для модельного и практически использованного алгоритма перестановок ТВС приходится на 4-й АС для 13 перестановок ТВС из 14, тогда как на 4-й и 5-й АС – лишь для одной перестановки.

6. В результате исследования закономерностей изменения со временем аксиальных профилей поврежденности оболочки  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания ЯТ  $B_U(\tau)$  для усредненной по алгоритму 3 перестановки ТВС определено, что максимум  $\omega(\tau)$  для усредненного по ТВС твэла приходится на 6-й АС, а максимум  $B_U(\tau)$  – на 4-й АС в следующих режимах нагружения РУ с ВВЭР-1000:

- базовом режиме нагружения;
- переменном режиме нагружения по суточному циклу;
- переменном режиме нагружения по недельному циклу;
- переменном режиме нагружения по комбинированному циклу.

7. Поскольку существует корреляция между расположением максимума величины  $\omega(\tau)$  и максимума величины  $B_U(\tau)$  для усредненного по ТВС твэла, для автоматизированного управления свойствами ЯТ ВВЭР-1000 задачу экспериментальной локализации области твэла, в которой произошла разгерметизация оболочки по механизму накопления деформационной поврежденности, целесообразно решать совместно с локализацией области твэла с максимальной глубиной выгорания ЯТ, с учетом расстояния между этими областями, равного длине одного АС (~0,44 м).

8. В дальнейших исследованиях целесообразно провести модельный эксперимент по определению распределения глубины выгорания по высоте ТВС в процессе проведения КГО с целью нахождения наиболее вероятных областей разгерметизации оболочек твелов по рассмотренным физическим механизмам. Кроме того, целесообразно рассмотреть измерительные каналы по определению глубины выгорания и поврежденности с точки зрения теории автоматического регулирования.



## РАЗДЕЛ 4

### РАЗРАБОТКА ОСНОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В ПЕРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ ВВЭР-1000

#### 4.1. Описание автоматизированной системы управления свойствами ядерного топлива

Рассмотрим физико-технологические основы эксплуатации ЯТ в ядерной энергетической установке с реактором ВВЭР-1000.

Необходимо различать два этапа управления свойствами ЯТ [19, 33, 40]:

— при перегрузке ЯТ с целью восстановления израсходованного запаса реактивности ( $\Delta\rho$ ) и выравнивания поля энерговыделения на последующую кампанию.

— при эксплуатации ЯТ в ядерном реакторе с целью выработки тепловой энергии;

Особенность перегрузки ЯТ состоит в ее периодичности и необходимости создания бассейна перегрузки из частично разобранный реактора и бассейна выдержки.

Перегрузка ЯТ осуществляется с помощью перегрузочной машины (МП) и представляет собой перемещение ТВС и стержней выгорающего поглотителя (СВП) по специальной программе с целью компоновки такой АКЗ, которая позволит обеспечить заданную продолжительность кампании и максимальную энерговыработку.

Можно выделить три основных этапа перегрузки топлива [19, 33]:

— Перестановка ТВС внутри АКЗ реактора (с приемлемым содержанием делящегося материала в виде  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ ) и перемещение СВП (выгоревшие – из ТВС, свежие – в ТВС). Такие перестановки осуществляются для выравнивания поля энерговыделения в последующей кампании;

— Извлечение из реактора, перемещение в бассейн выдержки дефектных и отработавших ТВС;

— Загрузка новых ТВС с высоким уровнем начального обогащения для возобновления запаса реактивности на текущую топливную кампанию. Начальное высокое обогащение топлива обеспечивает запас реактивности, глубину выгорания и продолжительность топливной кампании. В свежие ТВС помещаются СВП для выравнивания поля энерговыделения. При перегрузке ЯТ стержни ОР и аварийной защиты помещают в ТВС 2-го или 3-го года выгорания.

При управлении перемещением ЯТ в бассейне перегрузки в качестве управляющих параметров целесообразно рассматривать глубину выгорания ЯТ  $B_U(\tau)$  (определяет экономичность эксплуатации ЯТ) и поврежденность оболочки твэла  $\omega(\tau)$  (определяет безопасность эксплуатации ЯТ).

Управление перемещением ЯТ в бассейне перегрузки может быть реализовано с помощью АСУ замкнутого типа (рис. 4.1).

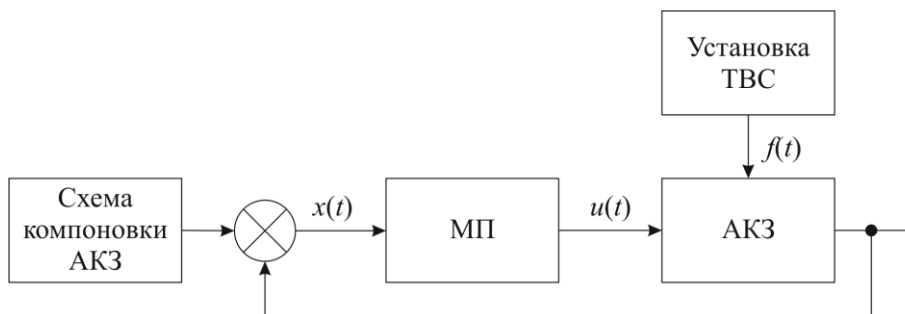


Рисунок 4.1 – Общая схема АСУ свойствами ТВС

В такой АСУ исходя из требований безопасности и экономичности задается «Схема компоновки АКЗ», что определяет набор параметров  $x(t)$ .

Для обеспечения заданного поля энерговыделения МП осуществляет управляющее воздействие  $u(t)$ , перемещая ТВС и СВП в бассейне перегрузки с учётом возмущающего воздействия  $f(t)$ .

В процессе перемещения ядерного топлива МП участвует в формировании измерительного канала по определению необходимых для управления свойствами ЯТ параметров, которыми служат  $B_U(\tau)$  и  $\omega(\tau)$ .

АСУ замкнутого типа является наиболее подходящим типом АСУ для управления свойствами ЯТ, поскольку благодаря обратной связи информация о состоянии управляемого объекта передается в управляющее устройство. Вместе с тем, для замкнутой АСУ характерна полная взаимозависимость функционирования звеньев [89, 90].

#### 4.2. Основы автоматизированного управления выгоранием ядерного топлива

Особенность управления свойствами ЯТ при выработке реактором тепловой энергии состоит в необходимости поддержания заданного значения реактивности. Реактивность определяется алгебраической суммой следующих составляющих [33, 70, 77]:

$$\rho_{\text{СУММ}} = \rho_{\text{ОРСУЗ}} + \rho_{\text{бор}} + \rho_{\text{ВЫГОР.}} + \rho_{\text{ШЛАК.}} + \rho_N + \rho_{\text{ХЕ}} + \rho_t, \quad (4.1)$$

где  $\rho_{\text{ОРСУЗ}}$  – эффект реактивности регулирующих групп;

$\rho_{\text{бор}}$  – эффект реактивности, вносимый борной кислотой в теплоноситель 1-го контура;

$\rho_{\text{ВЫГОР.}}$  – эффект реактивности, вносимый свежим топливом;

$\rho_{\text{ШЛАК.}}$  – эффект реактивности, связанный с накоплением шлаков;

$\rho_N$  – эффект реактивности, вносимый изменением текущей мощности реактора;

$\rho_{\text{ХЕ}}$  – эффект реактивности, вносимый изменением концентрации отравителей (ксенона и йода) в ЯТ;

$\rho_t$  – эффект реактивности, вносимый изменением температуры теплоносителя.

Из перечисленных возмущений внутренне присущими реактору являются эффекты реактивности, связанные с такими процессами, как

— выгорание и шлакование;

— изменение мощности реактора;

— изменение температуры теплоносителя 1-го контура;

— изменение концентрации ксенона и йода в ЯТ.

Эти возмущения изменяют не только реактивность, но и механическое взаимодействие топливной таблетки с оболочкой твэла (МВТО).

Эффекты реактивности, связанные с выгоранием и шлакованием ЯТ, относятся к медленным процессам, в то время как эффекты, связанные с изменением мощности реактора и температуры теплоносителя, относятся к быстрым процессам и проявляются при изменении мощности энергоблока.

Эффект реактивности, связанный с накоплением отравителей, относится одновременно и к быстрым, и к медленным процессам, так как изменение концентрации ксенона и йода, с одной стороны, происходит за счет выгорания ЯТ и радиоактивного распада продуктов деления ЯТ (стационарное отравление), а с другой – за счет изменения плотности нейтронного потока при маневрировании мощностью РУ с ВВЭР-1000 [18, 91].

Внутренне присущие реактору эффекты реактивности способны без системы регулирования изменять тепловую мощность реактора  $N$ . Поэтому задачей АСУ свойствами ЯТ является компенсация изменений реактивности при переходе с одного уровня  $N$  на другой или при длительном поддержании  $N = \text{const}$ . Система управления может воздействовать на реактивность регулирующими стержнями и изменением концентрации борной кислоты (рис. 4.2).

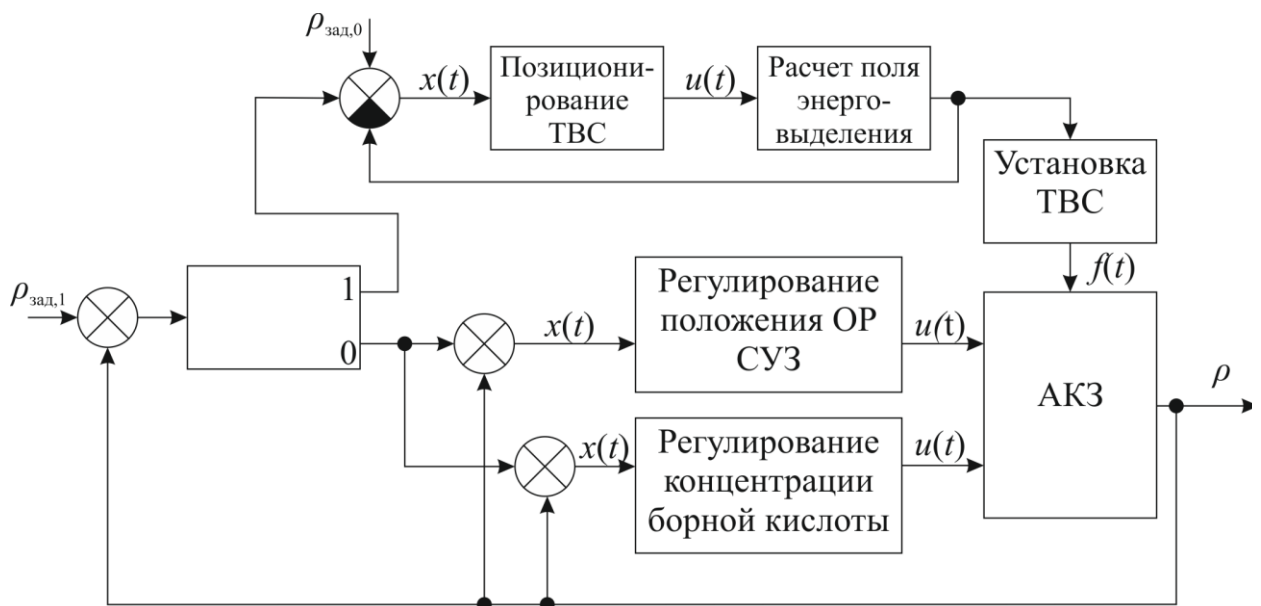


Рисунок 4.2 – Алгоритмическая схема управления свойствами ЯТ

Исходя из требований безопасности и экономичности, в АСУ задаются начальный ( $\rho_{\text{зад},0}$ ) и предельный ( $\rho_{\text{зад},1}$ ) уровень реактивности, что определяет вектор параметров  $x(t)$ .

Регулятор положения ОР СУЗ осуществляет управляющее воздействие  $u(t)$ , перемещая стержни СУЗ для поддержания уровня АО ( $-5\dots+5\%$ ) – РОРСУЗ.

Регулятор концентрации борной кислоты осуществляет управляющее воздействие  $u(t)$  путем ввода/вывода дистиллята при маневрировании мощностью, что приводит к появлению  $\rho_N$ ,  $\rho_{\text{бор}}$ .

При условии достижения  $\rho_{\text{зад},1}$  (ориентировочно через 290 эфф. сут.), выполняется остановка РУ с последующим позиционированием ТВС в АКЗ, что представляет собой управляющее воздействие  $u(t)$  для расчета поля энерговыделения, компенсации наработанной реактивности ( $\rho_{\text{ШЛАК}}$ ,  $\rho_{\text{ХЕ}}$ ) и  $\rho_{\text{ВЫГОР}}$ .

Температура теплоносителя на входе АКЗ поддерживается const, таким образом:  $\rho_i=0$ .

После завершения компоновки АКЗ выполняется пуск РУ, в результате которого формируется воздействие  $f(t)$  для обеспечения необходимого поля энерговыделения и  $\rho=\rho_{\text{зад},0}$ .

### **4.3. Передаточные функции системы управления**

Для моделирования представленной АСУ необходимо определить передаточные функции [92].

Передаточные функции каналов регулирования изменения реактивности могут быть определены из моделей эффективности регулирующей группы ОР СУЗ и борного регулирования.

Модель эффективности регулирующей группы ОР СУЗ была получена экспериментально для блока № 5 Запорожской АЭС [79]. График зависимости реактивности от координаты погружения регулирующей группы для разных эффективных суток кампании ВВЭР-1000 показан на рис. 4.3.

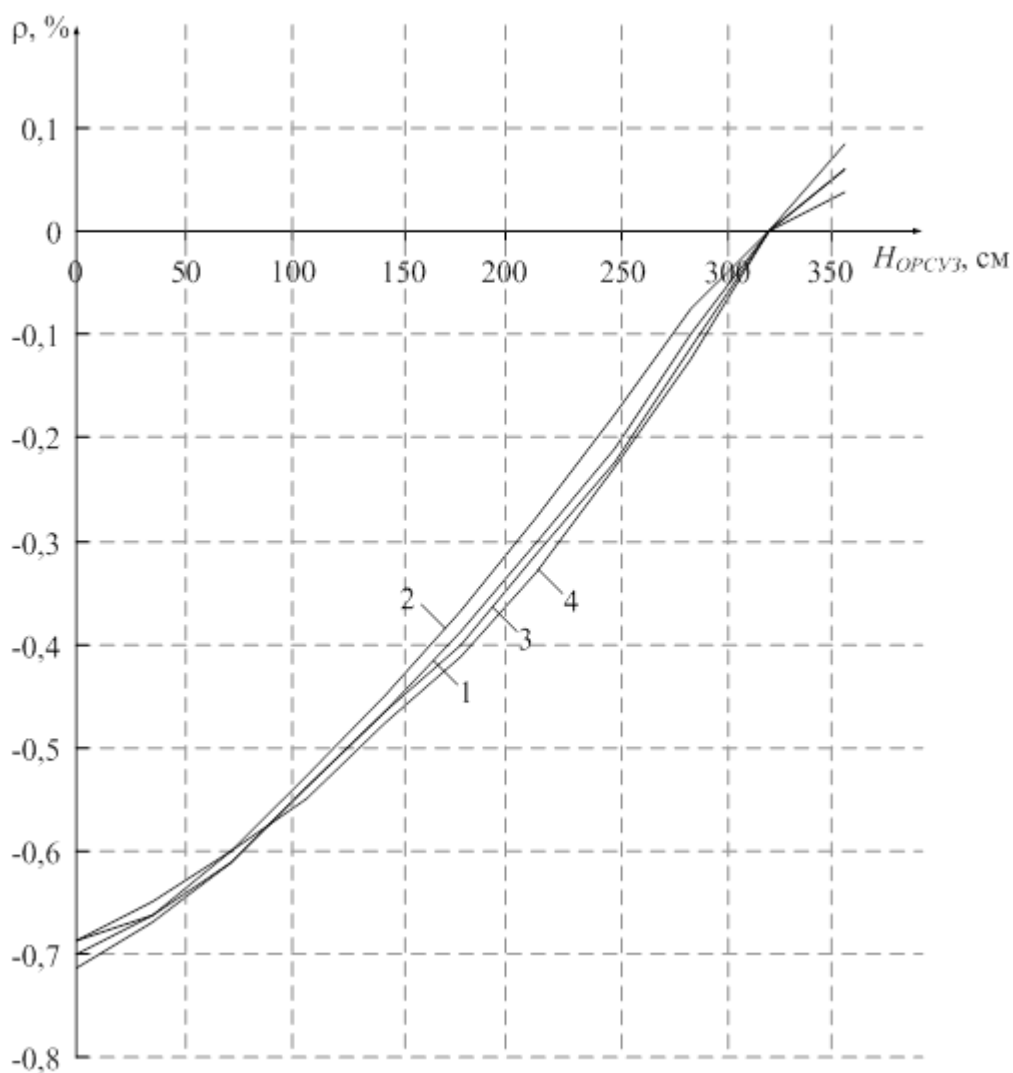


Рисунок 4.3 – Зависимость реактивности от координаты погружения регулирующей группы ОР СУЗ:

1, 2, 3 и 4 – 0, 80, 160 и 285 эф. сут, соответственно

В аналитической форме зависимость реактивности от координаты погружения регулирующей группы ОР СУЗ наилучшим образом аппроксимируется линейной функцией [77]. Максимальная реактивность, которую может внести регулирующая группа ОР СУЗ в одну зону [79]:

$$\rho_{ОРСУЗ_i} = a_i \cdot (h_{СУЗ} - h_0), \quad (4.2)$$

где  $\rho_{ОРСУЗ_i}$  – реактивность, вносимая регулирующей группой ОР СУЗ, отн. ед.;

$a_i$  – угловой коэффициент наклона характеристики, определяемый из табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Угловой коэффициент наклона характеристики

Номер зоны	Обозначение	Значение, см <sup>-1</sup>
1	$a_1$	0,0000164
2	$a_2$	0,000033
3	$a_3$	0,00003
4	$a_4$	0,0000027
5	$a_5$	0,00002405
6	$a_6$	0,0000198
7	$a_7$	0,0000184
8	$a_8$	0,0000226
9	$a_9$	0,00001414
10	$a_{10}$	0,000009

Таким образом, эта модель позволяет определить изменение реактивности, вносимое регулирующей группой ОР СУЗ в  $i$ -ю зону, в зависимости от высоты погружения стержней в АКЗ ВВЭР-1000.

Теперь запишем модель изменения реактивности за счет ввода/вывода борной кислоты  $\rho_{бор}(C_{бор})$ , позволяющую при текущей концентрации  $C_{бор}$  определить изменение реактивности при изменении концентрации борной кислоты в теплоносителе от 0 до  $C_{бор}$  [78, 93, 94]:

$$\rho_{бор}(C_{бор}) = \int_0^{C_{бор}} \alpha_{бор} dC_{бор}, \quad (4.3)$$

где  $\alpha_{бор} = f(C_{бор}) = \frac{\partial \rho_{бор}}{\partial C_{бор}}$  – коэффициент реактивности по концентрации борной кислоты в теплоносителе.

Величина  $\alpha_{бор}$  была определена из альбома НФХ для блока № 5 Запорожской АЭС – рис. 4.4 [79]:

$$\alpha_{бор} = -\frac{1,58 \%}{\text{г/кг}}, \quad (4.4)$$

Уменьшение концентрации борной кислоты в теплоносителе происходит за счет ввода в теплоноситель дистиллята (обессоленной воды).

Изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе происходит по экспоненциальному закону (рис. 4.5).

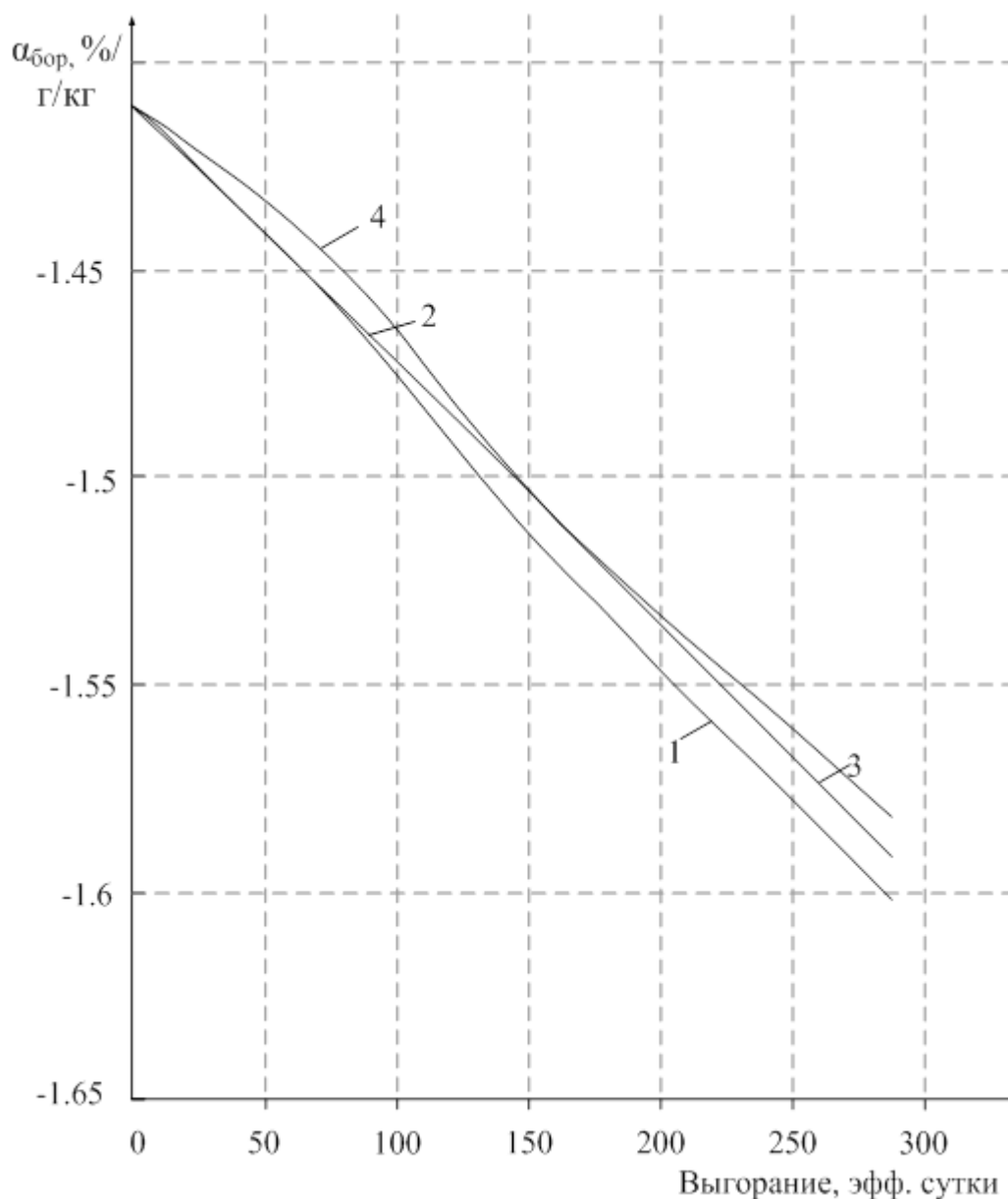


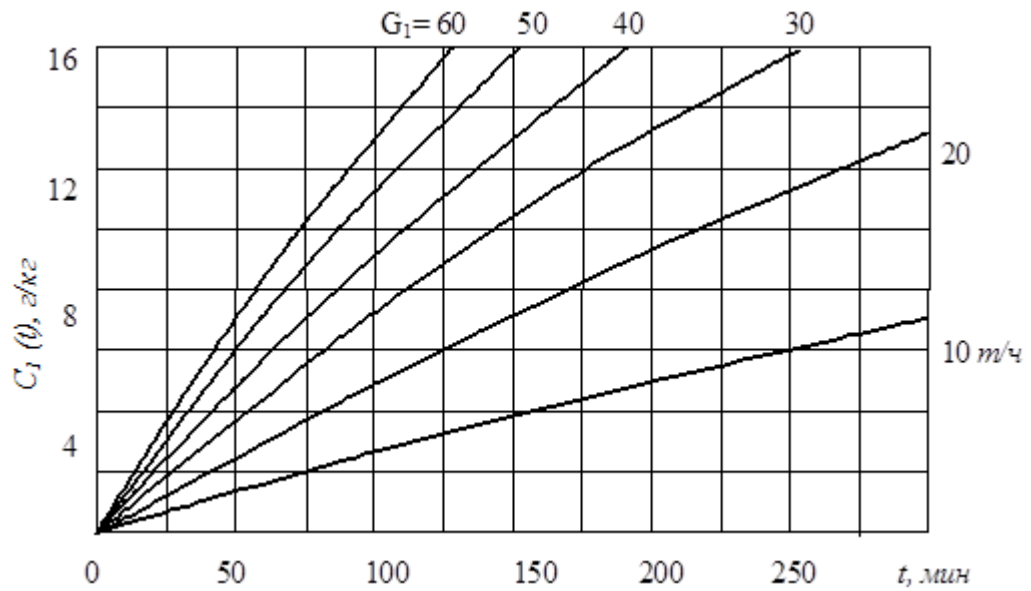
Рисунок 4.4 – Зависимость коэффициента реактивности по концентрации борной кислоты от глубины выгорания ЯТ: 1, 2, 3, 4 –  $N = 1500, 2100, 2700, 3000$  МВт, соответственно

Для моделирования представленной АСУ данные зависимости были идентифицированы и описаны следующими дифференциальными уравнениями [95–98]:

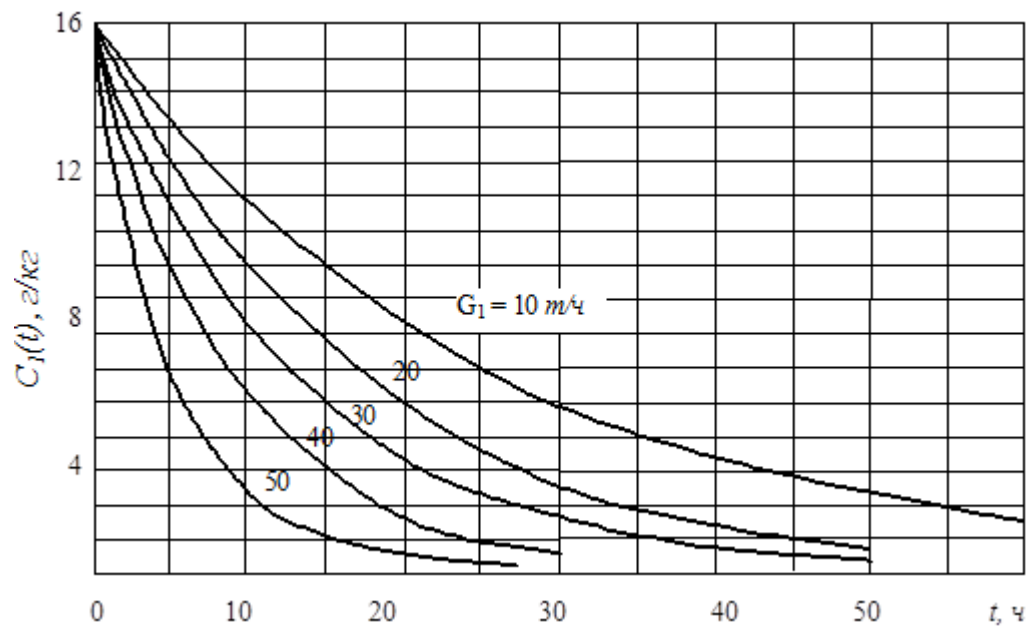
1) При вводе раствора борной кислоты в теплоноситель:

$$T_4 \cdot \frac{dC_{бор}}{d\tau} + \Delta C_{бор} = k_4 \cdot \Delta G_{бор}, \quad (4.5)$$





а)



б)

Рисунок 4.5 – Зависимость изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе от времени в случае подпитки концентрированной борной кислотой (а) и дистиллятом (б)

2) При вводе дистиллята:

$$T_5 \cdot \frac{dC_{\text{бор}}}{d\tau} + \Delta C_{\text{бор}} = k_5 \cdot \Delta G_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (4.5)$$

где  $C_{\text{бор}}$  – концентрация борной кислоты, г/кг ;

$k_4, k_5$  – коэффициенты передачи,  $\frac{\text{г/кг}}{\text{т/ч}}$  ;

$T_4, T_5$  – постоянные времени, с;

$\Delta G_{\text{бор}}$  – изменение расхода борной кислоты, т/ч;

$\Delta G_{\text{H}_2\text{O}}$  – изменение расхода дистиллята, т/ч.

Было принято, что номинальный расход борной кислоты  $G_{\text{бор}} = 40$  т/ч, номинальный расход дистиллята  $G_{\text{H}_2\text{O}} = 40$  т/ч. Для таких расходов борной кислоты и дистиллята коэффициенты передачи и постоянные времени имеют значения:

$$k_4 = 40 \frac{\text{г/кг}}{\text{т/ч}}; k_5 = 16 \frac{\text{г/кг}}{\text{т/ч}}; T_4 = 22,3 \cdot 10^3 \text{ с}; T_5 = 47,7 \cdot 10^3 \text{ с}.$$

Можно видеть, что для процессов ввода/вывода борной кислоты в теплоноситель/из теплоносителя коэффициенты передачи  $k_4, k_5$  отличаются в 2,5 раза, а постоянные времени  $T_4, T_5$  – в 2 раза.

Следовательно, вывод борной кислоты из теплоносителя путем введения в теплоноситель дистиллята происходит дольше, чем ввод борной кислоты в теплоноситель.

На основе представленных моделей после линеаризации получена передаточная функция по каналу «концентрация борной кислоты»:  $W$

$$W_p(s) = \frac{k \cdot \Delta G}{TsC_{\text{бор}} + \Delta C_{\text{бор}}}, \quad (4.6)$$

где  $C_{\text{бор}}$  – концентрация борной кислоты, г/кг;

$k$  – коэффициент передачи,  $\frac{\text{г/кг}}{\text{т/ч}}$ ;

$\Delta G$  – изменение расхода борной кислоты (при вводе раствора борной кислоты) или изменение расхода дистиллята (при вводе дистиллята), т/ч;

$T$  – постоянная времени, с.

Таким образом, скорость изменения объемной плотности энерговыделения  $q_v(\vec{r}, \tau)$  в АКЗ при борном регулировании *минимальна* и распределена равномерно по АКЗ.

При использовании же стержней ОР СУЗ для регулирования энерговыделения в АКЗ скорость изменения  $q_v(\vec{r}, \tau)$  *максимальна*, но значительна толь-

ко вблизи той ячейки АКЗ, где осуществляется перемещение регулирующей группы СУЗ.

Оба способа регулирования энерговыделения в АКЗ изменяют аксиальный профиль и (или) среднюю величину плотности нейтронного потока в АКЗ, а значит аксиальный профиль и (или) среднюю величину глубины выгорания ЯТ.

Поскольку для обеспечения максимальной экономичности эксплуатации ЯТ ВВЭР-1000 требуется обеспечить максимальную равномерность выгорания ЯТ среди ТВС АКЗ, необходимо предложить АСУ свойствами ЯТ. Рассмотрим структурную схему такой перспективной АСУ.

#### 4.4. Автоматизированная система управления свойствами ЯТ

##### 4.4.1. Основы автоматизированного управления свойствами ЯТ

На рис. 4.6 представлена параметрическая схема АКЗ реактора ВВЭР-1000 как объекта управления без учета периодической перегрузки ЯТ [33, 77, 78, 88–92, 95–97].

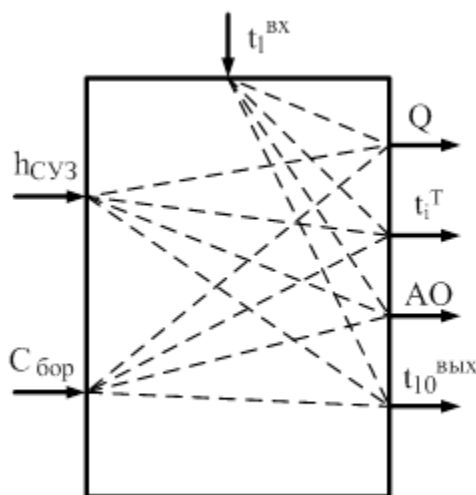


Рисунок 4.6 – Обобщенная параметрическая схема АКЗ реактора без учета периодической перегрузки ЯТ

*Управляющие воздействия* в параметрической схеме АКЗ:

- $h_{\text{СУЗ}}$  – координата погружения ОР СУЗ в АКЗ;
- $C_{\text{бор}}$  – концентрация борной кислоты в теплоносителе.

*Регулируемые величины* в параметрической схеме АКЗ:

- $Q$  – тепловая мощность АКЗ;
- $t_i^T$  – температура топлива в  $i$ -й зоне;
- АО – аксиальный офсет;
- $t_1^{\text{ВЫХ}}$  – температура теплоносителя на выходе АКЗ реактора.

*Возмущаемая величина* в параметрической схеме АКЗ:

- $t_1^{\text{ВХ}}$  – температура теплоносителя на входе АКЗ реактора.

#### 4.4.2. Блок формирования задания

На рис. 4.7 представлена структурная схема блока формирования задания (БФЗ).

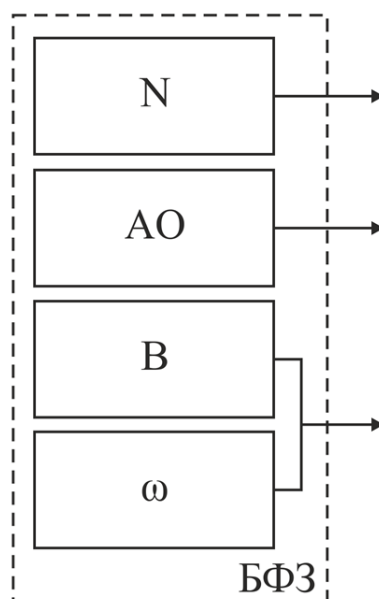


Рисунок 4.7 – Структурная схема блока формирования задания

БФЗ формирует задания по следующим параметрам:

- *Постоянно контролируемые параметры*: электрическая мощность ( $N$ ) реактора и величина АО;
- *Периодически контролируемые параметры*: глубина выгорания ЯТ  $B(\tau)$  и поврежденность оболочек твэлов  $\omega(\tau)$ .
- *Период формирования задания*: период КГО.

Каждому параметру соответствует свой канал, на выходе БФЗ формируется задание по каждому из приведенных параметров.

Сформированные на выходе БФЗ задания являются входными параметрами для блока управления и распределения (БУР), структурная схема которого представлена на рис. 4.8.

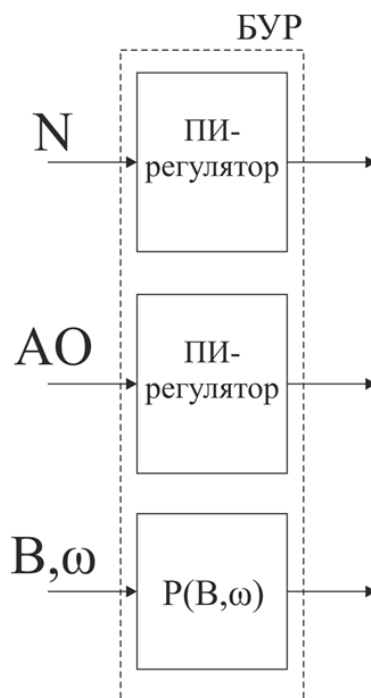


Рисунок 4.8 – Структурная схема блока управления и распределения

— В состав БУР входят два ПИ-регулятора, каждый из которых установлен по своему каналу регулирования (каналу регулирования  $N$  и связанному с ним каналу регулирования  $АО$ ), а также реле распределения ТВС согласно их свойствам, т.е. значений  $B(\tau)$  и  $\omega(\tau)$ .

#### 4.4.3. Объект управления

Объектом управления (ОУ) является АКЗ РУ с ВВЭР-1000, представленная в виде моноблока (рис. 4.9).

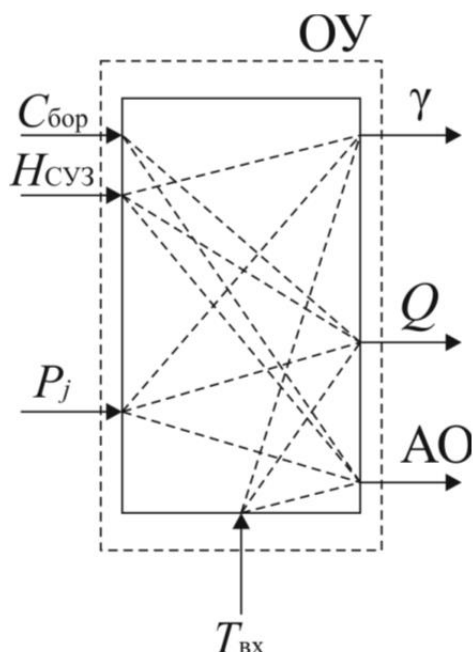


Рисунок 4.9 - Структурная схема блока «объект управления»

*Входными параметрами являются:*

- положение ОР СУЗ ( $H_{СУЗ}$ );
- концентрация борной кислоты ( $C_{бор}$ );
- температура теплоносителя на входе в реактор ( $T_{вх}=const$ );
- позиция каждой ТВС при перегрузке ЯТ ( $P_j$ ).

*Выходными параметрами являются:*

- тепловая мощность РУ с ВВЭР-1000 ( $Q$ );
- величина АО;
- аксиальный профиль интенсивности  $\gamma$ -излучения каждой ТВС, измеряемой при перегрузке ЯТ.

Представленная схема не отражает выходные параметры 1-го контура.

На основе полученных от ОУ данных, используя описанные модели и алгоритмы, в блоке измерений (БИ) осуществляется измерение  $B(\tau)$  и  $\omega(\tau)$ , т.е. основных параметров, определяющих пригодность/непригодность ЯТ к дальнейшей эксплуатации (рис. 4.10).

*Входные данные БИ:* аксиальный профиль интенсивности собственного  $\gamma$ -излучения каждой ТВС.

*Выходные данные БИ:* аксиальные профили  $B(\tau)$  и  $\omega(\tau)$  для каждой ТВС.

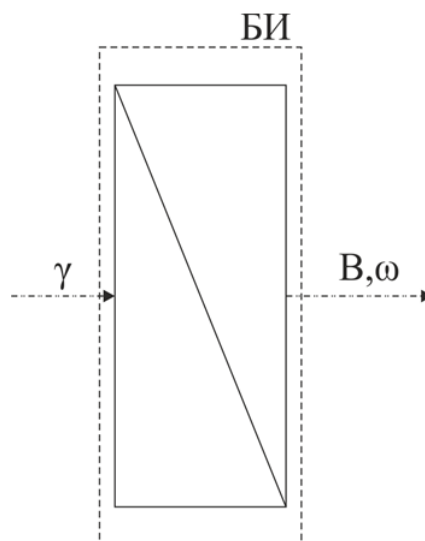


Рисунок 4.10 – Структурная схема блока измерений

Данные измерения выполняются при перегрузке ЯТ в конце каждого года топливной кампании ВВЭР-1000.

#### 4.4.4. Структурная схема автоматизированной системы управления свойствами ЯТ

На основе изложенных принципов управления свойствами ЯТ предложена структурная схема автоматизированной системы управления (АСУ) свойствами ЯТ, управляющей перемещением ЯТ ВВЭР-1000 с учетом норм и правил, определенных в ОПБ и ПБЯ – рис. 4.11 [5, 39, 99].

Основные требования, предъявляемые к АСУ свойствами ЯТ для обеспечения ядерной безопасности при перемещении облученных ТВС, сводятся к следующим положениям:

- не допустить повреждения, деформации, разрушения или падения ТВС;
- должно быть гарантировано перемещение всех устройств перегрузки ТВС в допустимых границах;
- должно обеспечиваться предоставление информации о состоянии ТВС в захватах;

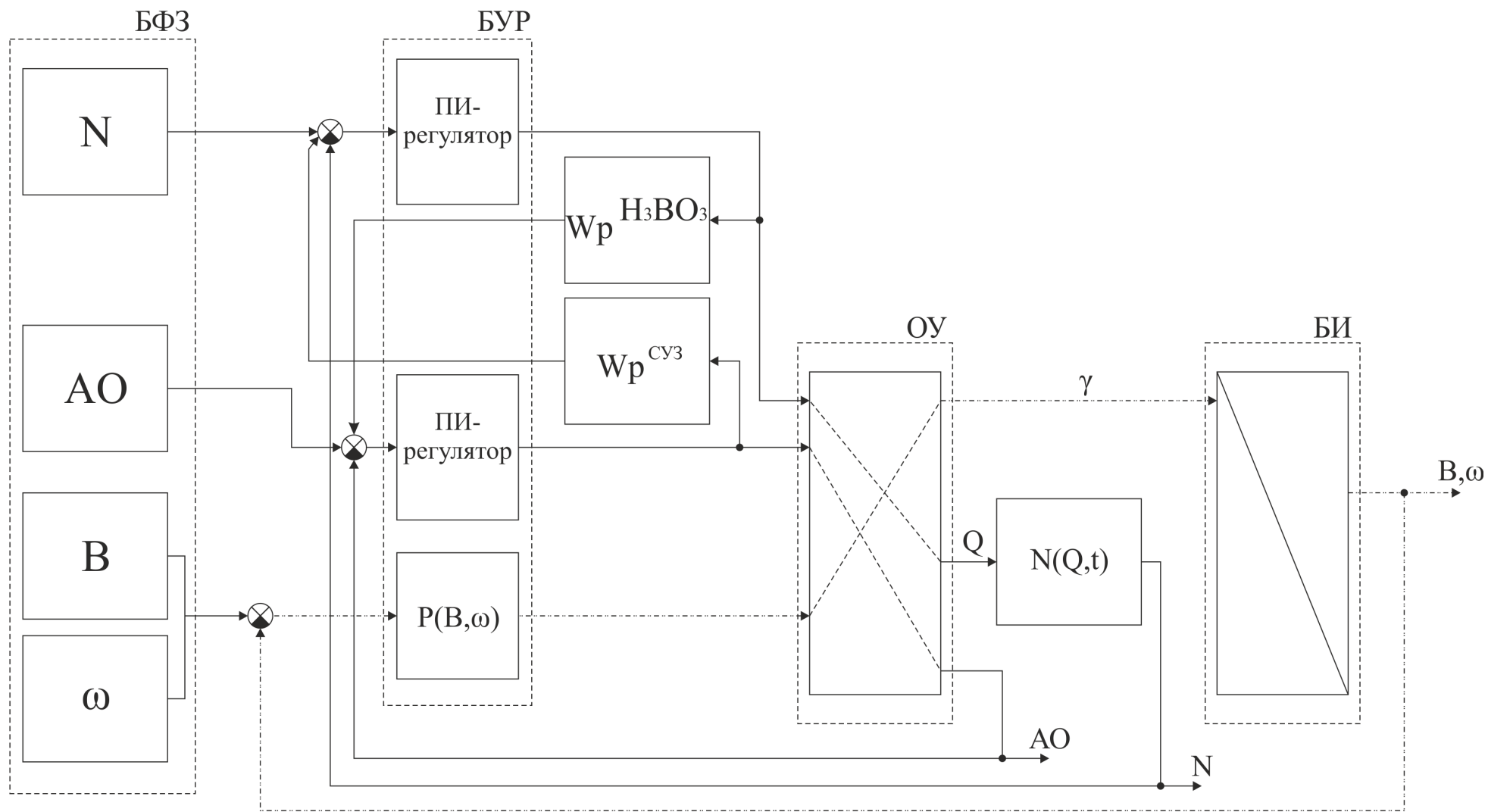


Рисунок 4.11 – Схема автоматизированной системы управления свойствами ЯТ



— должны обеспечиваться скорость и ускорение перемещения ЯТ, не превышающие установленные в техническом проекте РУ (перемещение ПМ в горизонтальной плоскости – со скоростью не более 0,25 м/с, а в вертикальной, при извлечении ТВС из АКЗ, – не более 0,0016 м/с);

— должен осуществляться непрерывный контроль мощности РУ, реактивности и нейтронного потока в течение всей перегрузки ЯТ;

— должен осуществляться непрерывный контроль уровня воды и концентрации в ней раствора борной кислоты, например, при снижении концентрации борной кислоты ниже 16 г/кг перегрузка ЯТ должна прекращаться.

Изложенные требования к АСУ свойствами ЯТ представлены на рис. 4.12.

АСУ состоит из пульта управления оператора, системы контроля скорости измерения, системы сортировки ЯТ и оперативно-запоминающего устройства системы сортировки ЯТ.

*Пульт управления оператора (ПУО)* предназначен для формирования задания и, в случае необходимости, ручного управления.

*Система контроля скорости измерения (СКСИ)* обеспечивает заданную скорость извлечения ТВС из АКЗ.

*Система сортировки ЯТ (ССЯТ)* предназначена для изменения положения ТВС в АКЗ во время перегрузки ЯТ, в зависимости от его свойств.

*Оперативно-запоминающее устройство системы сортировки ЯТ (ОЗУ ЯТ)* предназначено для запоминания информации о текущем состоянии ЯТ и схемах его перестановки.

Поскольку с помощью ССЯТ выполняется КГО, который используется для определения свойств ЯТ, КГО можно считать измерительным каналом АСУ свойствами ЯТ.

Поэтому целесообразно рассмотреть процесс КГО применительно к задаче управления свойствами ЯТ ВВЭР-1000 более детально.

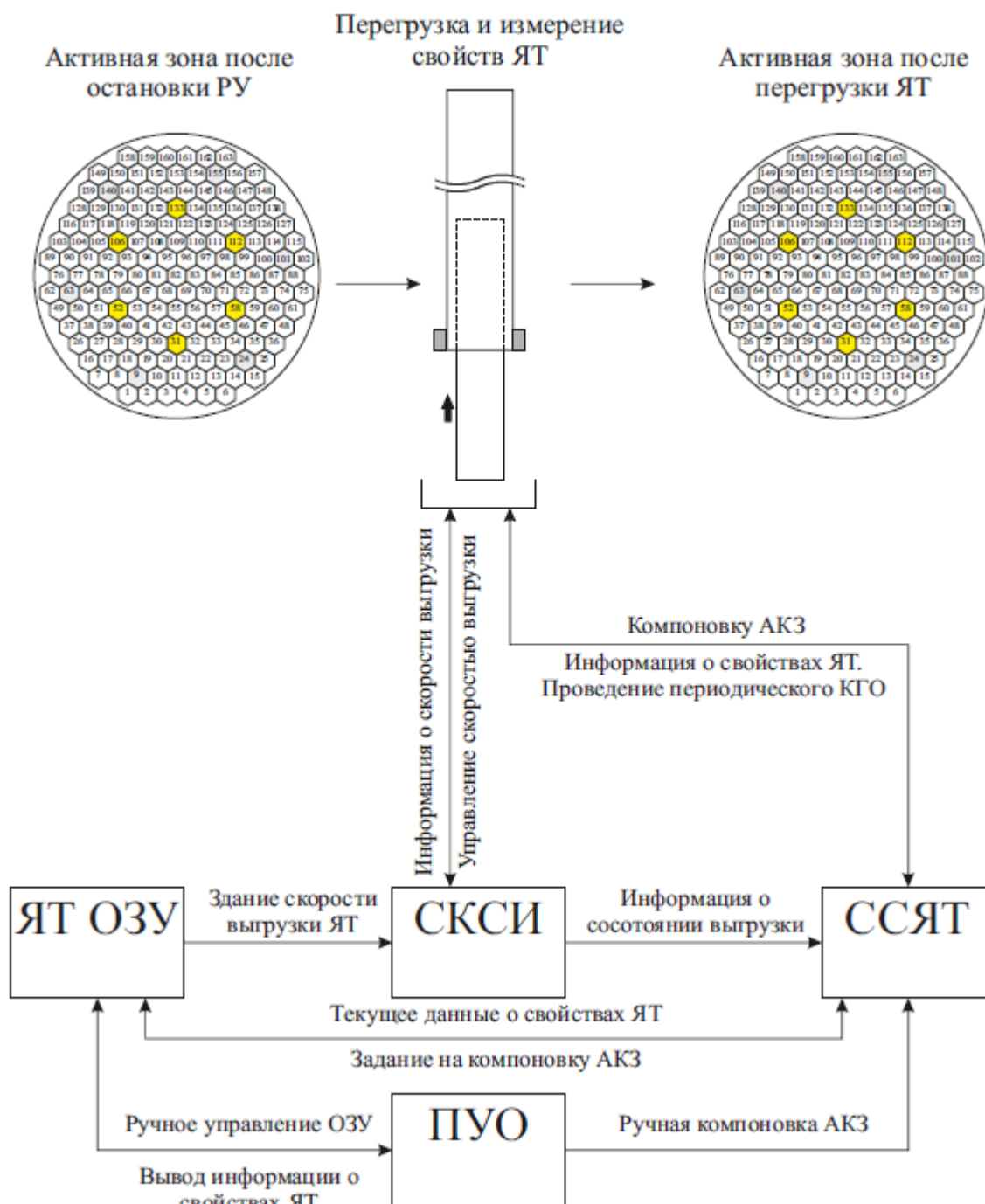


Рисунок 4.12 – Устройство автоматизации перегрузки ЯТ

#### 4.4.5. Контроль герметичности оболочек

Процесс эксплуатации ЯТ ВВЭР-1000 может быть представлен в виде круговой диаграммы (рис. 4.13).

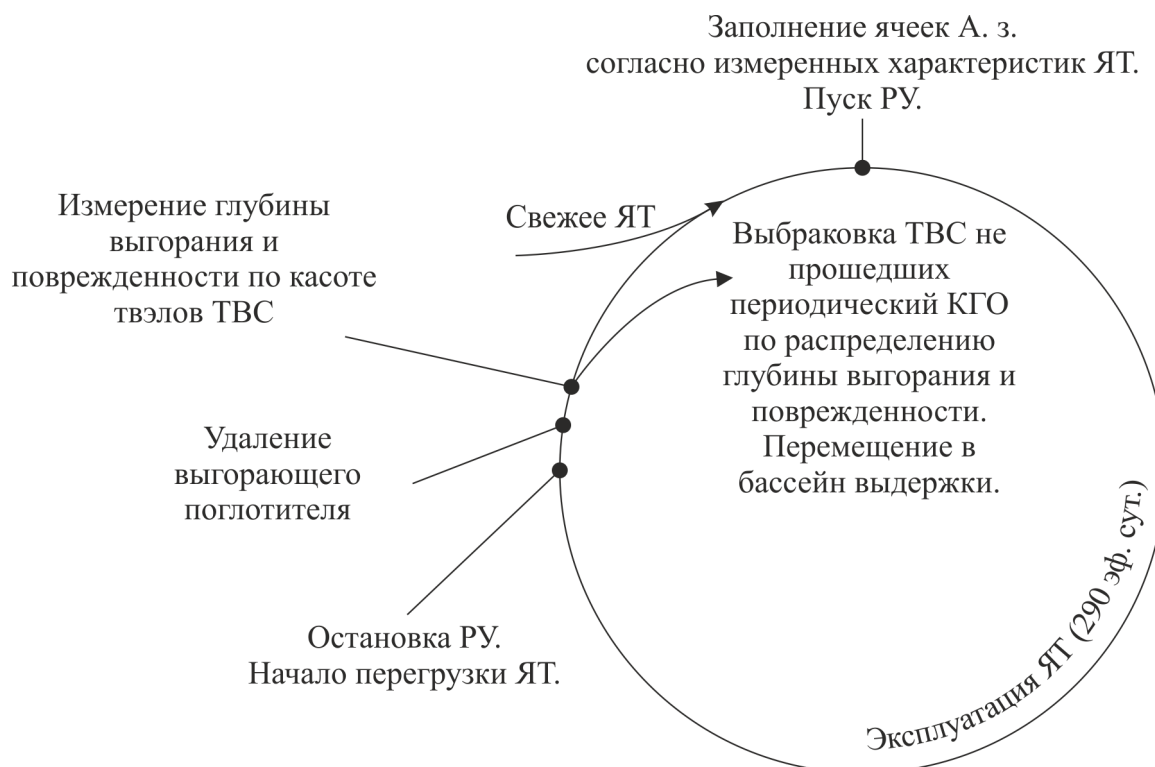


Рисунок 4.13 – Модель процесса эксплуатации ЯТ

При эксплуатации ЯТ возможно нарушение герметичности оболочек отдельных твэлов.

Причинами повреждений оболочек твэлов могут быть:

- местный перегрев;
- растрескивание, обусловленное напряжениями или усталостью, а также влиянием термических циклов сердечника и оболочки твэла при быстрых и значительных изменениях мощности ТВС;

- распухание или чрезмерное удлинение твэлов, связанное с накоплением газообразных продуктов деления или структурными изменениями топливных таблеток;

- развитие микродефектов оболочек твэлов, невыявленных при изготовлении ТВС на заводе.

Основные два типа нарушений герметичности оболочек твэлов:

- микротрещины, через которые могут проникать только газообразные продукты деления;

— дефекты, при которых возможен непосредственный контакт топлива с водой, в результате чего в теплоноситель могут проникать не только газообразные, но и другие продукты деления [24, 83].

Своевременное определение уровня разгерметизации твэлов производится системами КГО, проводимого как на остановленном, так и на работающем реакторе.

При КГО на работающем реакторе определяют момент времени, когда общее количество дефектов твэлов во всех ТВС превосходит некий заданный порог, тогда как на остановленном реакторе КГО проводят с целью отделения ТВС, имеющих разгерметизированные твэлы, с целью их недопущения в АКЗ.

При КГО на остановленном реакторе (периодическом КГО) выполняется измерение собственного гамма-излучения ТВС. На основании полученных данных выполняется отбраковка ТВС, подлежащих преждевременному удалению из реактора.

В случае удаления ТВС, имеющей разгерметизированные твэлы, на систему наносится *возмущение*.

Так как осуществляется внеплановое удаление ТВС, в АСУ возникает *рассогласование* между заданным набором свойств ЯТ и набором свойств, обнаруженных в результате КГО.

Далее в АСУ свойствами ЯТ формируется *управляющий сигнал*, после которого отбракованные ТВС заменяются исправными.

На основе такой модели эксплуатации ЯТ была разработана материально-информационная схема движения ЯТ ВВЭР-1000.

#### **4.4.6. Материально-информационная схема движения ядерного топлива**

Разработанная материально-информационная схема движения ЯТ состоит из следующих систем и процессов:

- система КГО твэлов;
- система сортировки ЯТ;
- система сбора и контроля данных;
- процессы измерения и управления свойствами ЯТ.

*Система сбора и контроля данных* (измерительный канал) предусматривает получение величин  $\omega(\tau)$  и  $B(\tau)$  от каждой ТВС по всей высоте твэлов. Сбор данных выполняется под присмотром контролирующего физика.

*Система сортировки ЯТ* предусматривает автоматическую компоновку АКЗ (канал управления) на основе измеренных данных, полученных при периодическом КГО с применением системы сбора и контроля данных.

На рисунке 4.14 представлена материально-информационная схема движения ЯТ, определяющая жизненный цикл ЯТ на протяжении одного года эксплуатации (290 эффективных суток).

1-й этап: остановка РУ с пуском после загрузки АКЗ новым ЯТ.

2-й этап: перегрузка ЯТ с одновременным измерением через предложенный измерительный канал (что является основным отличием этой схемы) свойств ЯТ, т.е. величин  $\omega(\tau)$  и  $B(\tau)$ .

3-й этап: на основе измеренных величин  $\omega(\tau)$  и  $B(\tau)$  принимается решение о пригодности ЯТ для дальнейшего размещения в АКЗ и осуществляется выбор способа хранения ЯТ – в случае его непригодности к использованию.

4-й этап: замещение всех непригодных для эксплуатации ТВС новыми.

В дальнейшем целесообразно предложить усовершенствование измерительного канала при проведении КГО, в результате которого стало бы возможным измерять такие свойства ТВС, которые обеспечили бы определение уровней глубины выгорания и разгерметизации оболочки.

Далее необходимо определить метод идентификации пригодных к эксплуатации ТВС.

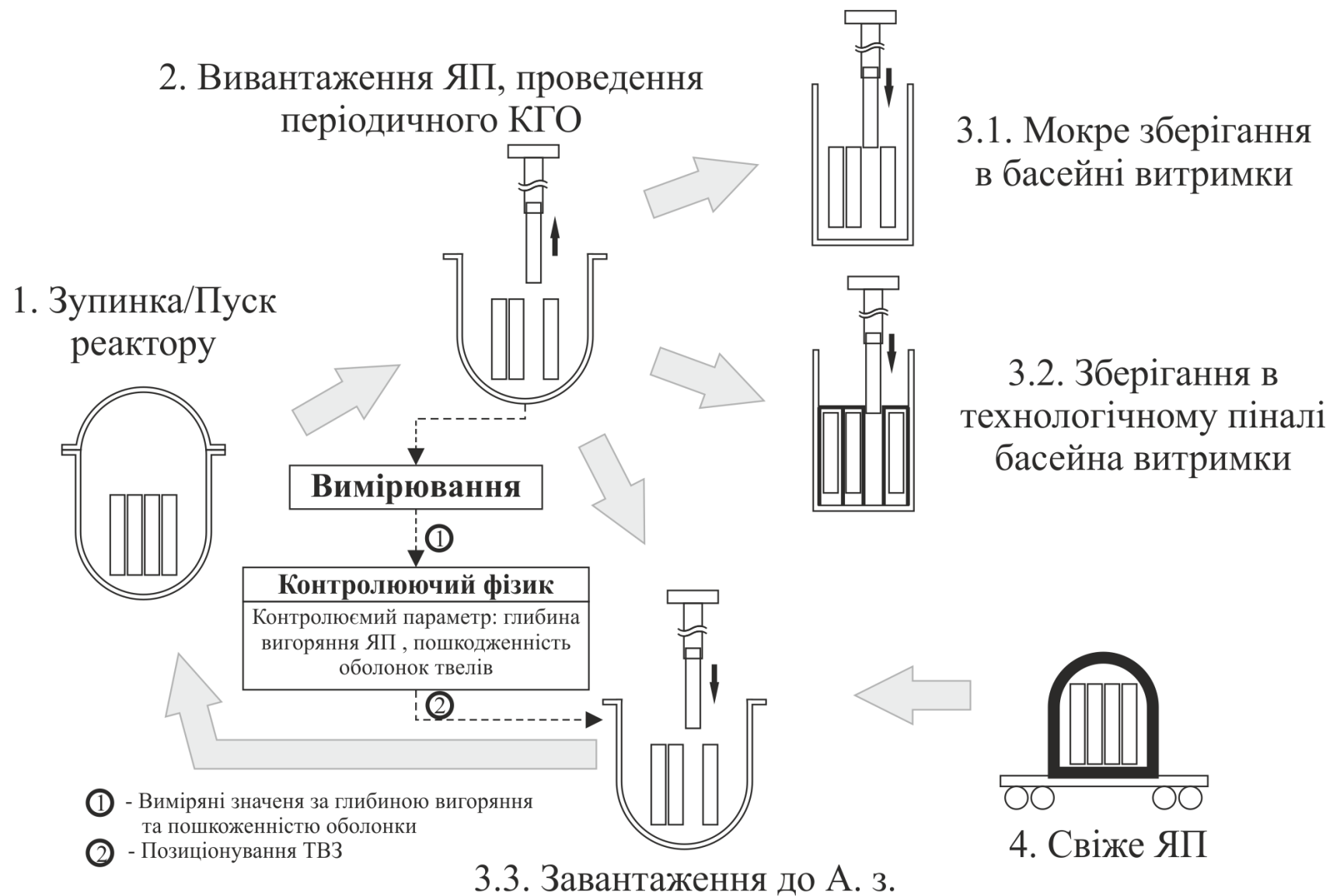


Рисунок 4.14 – Предложена материально-информационная схема движения ядерного топлива с применением измерительного канала

#### 4.5. Метод идентификации пригодных к эксплуатации ТВС с применением коллиматора детектора

На рис. 4.15 показано взаимное расположение твэлов ТВС реактора ВВЭР-1000, где  $D$  – точка установки детектора.

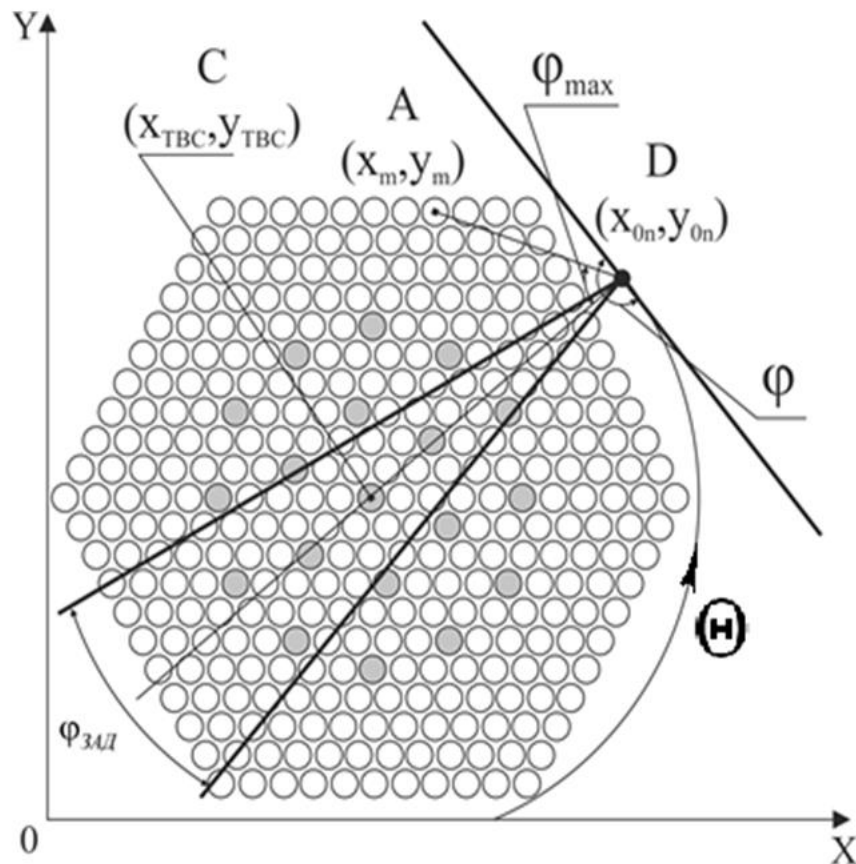


Рисунок 4.15 – Картограмма ТВС

Расстояние от центра ТВС (стержень № 166) к точке  $D$  образует радиус окружности, по которой перемещается детектор. Максимальный угол облучения коллиматора  $\varphi_{\max}$  детектора составил  $180^\circ$ . Для проведенных исследований количество положений детектора строго дискретно и составляет 360 или 720.

Для исследования зависимости качества восстановления ТВС от величины угла облучения твэлами коллиматора детектора, было проведено моделирование интенсивности  $\gamma$ -излучения от каждого твэла ТВС в точке  $D$ , при различных углах облучения. В зависимости от рассматриваемого угла облу-

чения количество твэлов, расположенных в области облучения, будет разным, что и будет определять качество восстановления.

Решение данной задачи основано на совершенствовании алгоритма, предложенного в цикле работ О.В. Маслова [24, 26].

Введем прямоугольную систему координат ХОУ и проведем индексацию всех твэлов и стержневых отверстий. Создадим матрицу размером 331x360, куда будем помещать значения коэффициентов ослабления излучения для одного изотопа от каждого из 331 стержня, для всех 360 положений коллиматора детектора (Таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Коэффициенты ослабления гамма-излучения

Изотопы ПД	Коэффициент ослабления. 1/см		
	UO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Zr
Cs <sup>134</sup> (1365 кэВ)	0.6278	0.0604	0.3175
Cs <sup>134</sup> (1167 кэВ)	0.7062	0.0654	0.3444
Cs <sup>134</sup> (1038 кэВ)	0.7842	0.0694	0.3670
Cs <sup>134</sup> (802 кэВ)	1.0183	0.0785	0.4232
Cs <sup>134</sup> (795кэВ)	1.0279	0.0788	0.4253
Cs <sup>134</sup> (604 кэВ)	1.4388	0.0891	0.4982
Cs <sup>134</sup> (569 кэВ)	1.5631	0.0915	0.5166
Cs <sup>134</sup> (563 кэВ)	1.5873	0.0920	0.5199
Cs <sup>137</sup> (661 кэВ)	1.3596	0.0856	0.4723
Ru <sup>106</sup> (1050 кэВ)	0.7761	0.0689	0.3581
Ru <sup>106</sup> (622 кэВ)	1.3849	0.0880	0.4895
Ru <sup>106</sup> (511кэВ)	1.8271	0.0957	0.5528
Eu <sup>154</sup> (996 кэВ)	0.8154	0.1655	0.3755
Eu <sup>154</sup> (1004 кэВ)	0.8088	0.0705	0.3739
Eu <sup>154</sup> (1274 кэВ)	0.6589	0.0626	0.3288



При увеличении числа точек измерений или количества изотопов размер матрицы будет изменяться.

Так, при увеличении количества изотопов до двух размер матрицы составит  $331 \times 720$ . В случае увеличения числа точек измерений до 720 размер матрицы также будет  $331 \times 720$ . В случае увеличения количества энергий до 2-х и точек измерений до 720, размер матрицы составит  $331 \times 1440$ .

Были приняты следующие исходные данные:

- координаты каждого из 331 стержня;
- радиальная координата детектора – 22.5 см;
- шаг измерений детектора относительно оси ТВС –  $1^\circ$ ;
- угол облучения коллиматора детектора определяется двумя лучами, расположенными под заданным углом ( $\varphi_{\text{зад}}$ ).

На первом шаге осуществляется заполнение матрицы расчетными значениями интенсивности  $\gamma$ -излучения твэлов в точке измерения в зависимости от угла раскрытия коллиматора детектора. Значения интенсивности учитывают ослабление  $\gamma$ -излучения при прохождении через материал оболочки, топливную таблетку и теплоноситель.

#### 4.6. Математическая модель коллиматора детектора

Для каждого  $n$ -го положения детектора при измерении интенсивности  $\gamma$ -излучения  $m$ -го твэла с координатой  $(x_m, y_m)$  координаты точки  $D (x_{0n}, y_{0n})$  определяются:

— уравнением прямой  $AD$ , проходящей через точку расположения детектора  $(x_{0n}, y_{0n})$  и центр  $m$ -го твэла;

— уравнением прямой  $CD$ , проходящей через точку расположения детектора  $(x_{0n}, y_{0n})$  и центр ТВС  $(x_{\text{ТВС}}, y_{\text{ТВС}})$ .

Уравнение прямой  $AD$  имеет вид:

$$A_1x + B_1y + C_1 = 0, \quad (4.7)$$

где коэффициенты определяются как:

$$\begin{aligned} A_1 &= -(y_{0n} - y_m); \\ B_1 &= x_{0n} - x_m; \\ C_1 &= 0. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Уравнение прямой  $CD$  имеет вид:

$$A_2x + B_2y + C_2 = 0, \quad (4.9)$$

где коэффициенты определяются как:

$$\begin{aligned} A_2 &= y_{ТВС} - y_{0n}; \\ B_2 &= x_{ТВС} - x_{0n}; \\ C_2 &= 0. \end{aligned} \quad (4.10)$$

#### 4.7. Идентификация твэлов, попавших под облучение коллиматора детектора

Принимаем, что  $m$ -й твэл попадает в сектор облучения коллиматора детектора, если угол  $\varphi$  (Рисунок 4.) между прямыми  $AD$  и  $CD$  меньше или равен углу  $\varphi_{зад}/2$ . Значение угла  $\varphi$  определяется как:

$$\varphi = \arctg((A_1 \cdot B_2 - A_2 \cdot B_1)/(A_1 \cdot A_2 + B_1 \cdot B_2)), \quad (4.11)$$

Для каждого  $i$ -го твэла с известными координатами  $(x_i, y_i)$ , через который проходит  $\gamma$ -излучение, рассчитывается расстояние по нормали  $d_i$  от центра твэла до прямой  $Ax + By + C = 0$ . Коэффициенты прямой определяются как:

$$\begin{aligned} A &= y_m - y_z; \\ B &= x_m - x_z; \\ C &= 0. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Длина нормали определяется как:

$$d_i = \frac{Ax_i + By_i + C}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad (4.13)$$

Проверяем отобранные группы  $m$ -х и  $i$ -х твэлов на следующих условиях:

— если координаты центров рассматриваемых двух групп твэлов одновременно попадают в область облучения коллиматора детектора, образовавшуюся углом  $\varphi_{\text{зад}}$ , то рассчитывается активность твэлов по выражению:

$$A_m = (-5.84 \cdot 10^{-4} \cdot x_m^2 + 3.9 \cdot 10^{-3} \cdot x_m + 1.14) \times (-1.2 \cdot 10^{-3} \cdot y_m^2 - 6.1 \cdot 10^{-3} \cdot y_m + 1.15), \quad (4.14)$$

— иначе активность этих групп твэлов определяем равной нулю:

$$\varphi \leq \varphi_{\text{зад}}/2, \quad (4.15)$$

— если координаты центров рассматриваемых двух групп твэлов находятся от коллиматора детектора на расстоянии не большем, чем то, на которое излучает твэл, то определяем расстояние, проходимое  $\gamma$ -излучением в материале оболочки твэлов;

— иначе это расстояние равно нулю:

$$\sqrt{(x_i - x_{0n})^2 + (y_i - y_{0n})^2} \leq \sqrt{(x_m - x_{0n})^2 + (y_m - y_{0n})^2}, \quad (4.16)$$

#### 4.8. Расчёт ослабления $\gamma$ -излучения в твэлах на пути к коллиматору детектора

Для каждого  $m$ -го твэла, испускающего  $\gamma$ -излучение, находится длина пробега  $L_i^{\text{об}}$  в материале  $i$ -х твэлов, которые находятся на пути  $\gamma$ -излучения – рис. 4.16 и выражение (4.17).

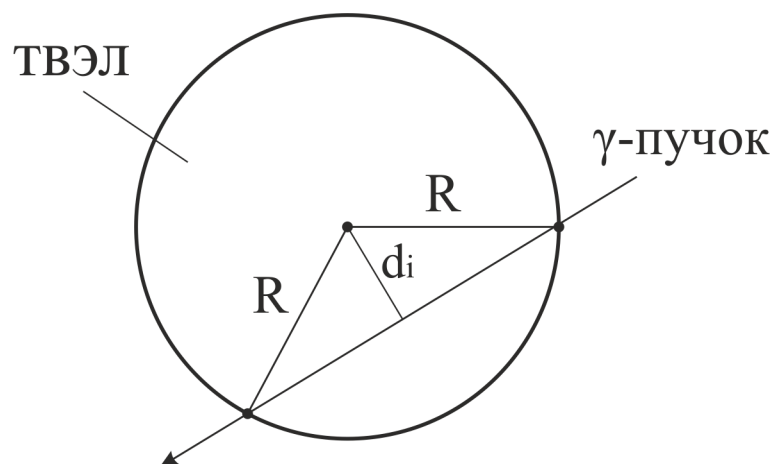


Рисунок 4.16 – Пересечение твэла с пучком  $\gamma$ -излучения

$$L_i^{об} = 2 \cdot \sqrt{R^2 - d_i^2}, \quad (4.17)$$

где  $R$  – радиус твэла, мм;

$d_i$  – длина нормали, мм.

Для  $i$ -х твэлов определяется длина пробега  $\gamma$ -излучения через трубки с водой, задаем активность в каждой из них равной нулю.

Далее для всех твэлов находится сумма  $L_i^{таб}$ , которая представляет собой суммарный пробег  $\gamma$ -излучения в топливной таблетке  $UO_2$ . Тогда суммарное ослабления  $\gamma$ -излучения от единичного  $m$ -го твэла на пути к коллиматору детектора в топливных таблетках  $UO_2$  составит:

$$P_{UO_2}^m = e^{\mu_{UO_2} \sum_i L_i^{таб}}, \quad (4.18)$$

Суммарное ослабление  $\gamma$ -излучения в оболочке твэла определяется по выражению:

$$P_{об}^m = e^{\mu_{об} \sum_i L_i^{об}}, \quad (4.19)$$

Определяем общую длину пробега  $\gamma$ -излучения от излучающего  $m$ -го твэла к коллиматору детектора:

$$G = \sqrt{(x_m^2 + x_{0n}^2)^2 + (y_m^2 + y_{0n}^2)^2}, \quad (4.20)$$

Определяем длину пробега  $\gamma$ -излучения в воде (как внутри, так и вне ТВС):

$$Z = G - \sum_i L_i^{таб}, \quad (4.21)$$

Суммарное ослабление  $\gamma$ -излучения в воде равно:

$$P_{H_2O}^m = e^{\mu_{H_2O} Z}, \quad (4.22)$$

Определяем величину ослабления  $\gamma$ -излучения от  $m$ -го твэла к коллиматору детектора:

$$R_{mn} = \sqrt{0.1 \sqrt{(x_m^2 + x_{0n}^2)^2 + (y_m^2 + y_{0n}^2)^2}}, \quad (4.23)$$

$$w_{mn} = (P_{UO_2}^m P_{H_2O}^m P_{об}^m) / (4\pi R_{mn}^2), \quad (4.24)$$

Задаем моделируемое распределение активности по твэлу (с учетом выгорания) внутри ТВС  $A_m$ ,  $m=1, \dots, 312$ , и рассчитывается интенсивность излу-

чения в  $n$ -й точке расположения детектора:

$$I_n = \sum_m A_m \cdot w_m, \quad (4.25)$$

Путем получения углового распределения интенсивности моделируется перемещение детектора по кругу, для этого организуется цикл по угловой координате детектора с  $\Theta$  с шагом  $\Delta\Theta=1$ .

По результатам, которые были получены в процессе моделирования, установлено следующее: уменьшение угла облучения позволяет повысить качество восстановления ТВС, что объясняется на рис. 4.17–4.21.

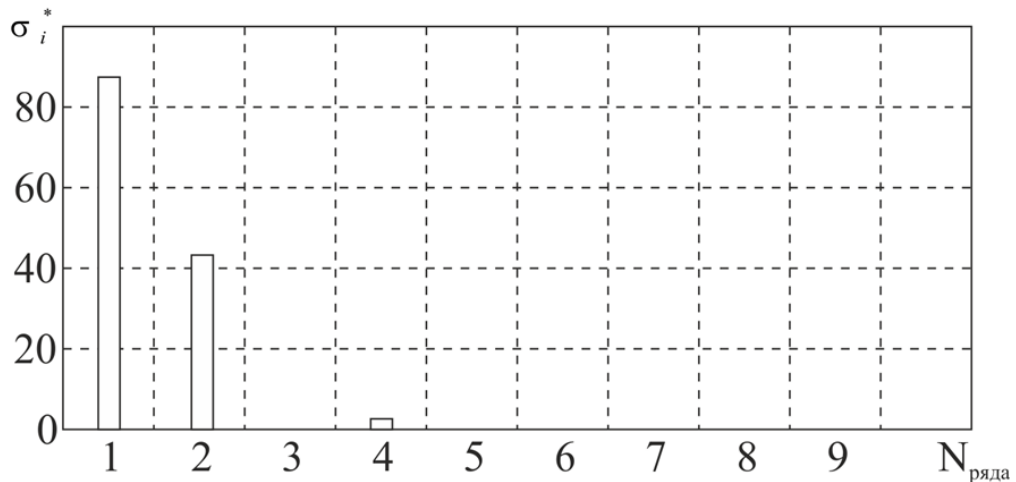


Рисунок 4.17 – Гистограммы относительной дисперсии отклонения активных твэлов по рядам, без применения коллиматора детектора, для  $N_E=2$

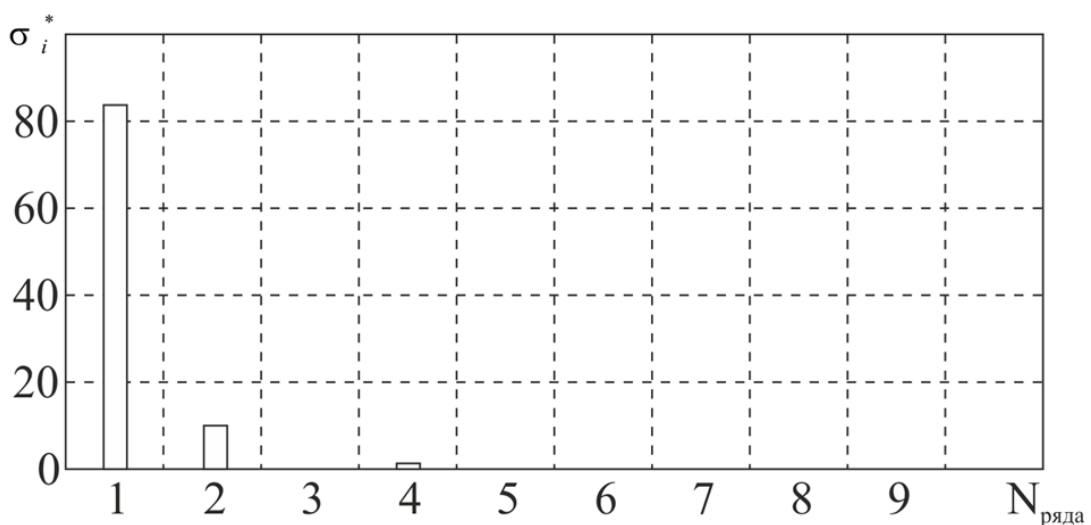


Рисунок 4.18 – Гистограммы относительной дисперсии отклонения активных твэлов по рядам, без применения коллиматора детектора для  $N_E=3$

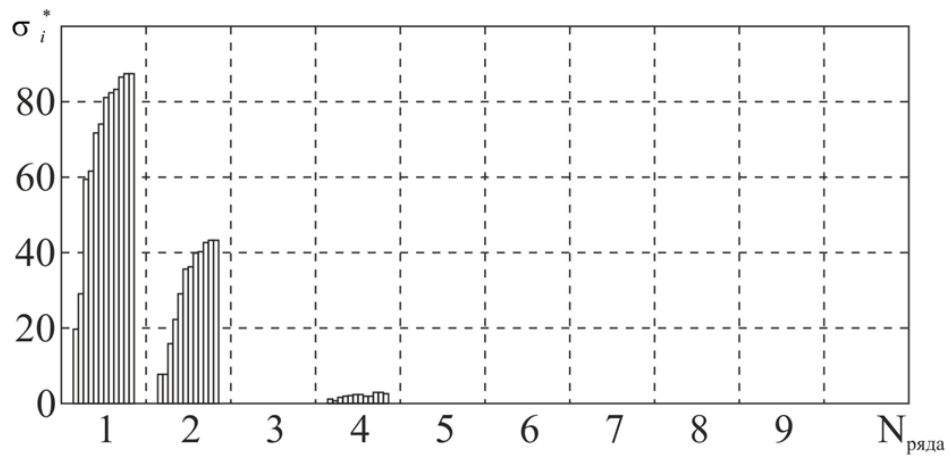


Рисунок 4.19 - Гистограммы относительной дисперсии отклонения активностей твэлов по рядам, с применением коллиматора детектора для  $N_E=2$  углами раскрытия коллиматора  $70...180^\circ$

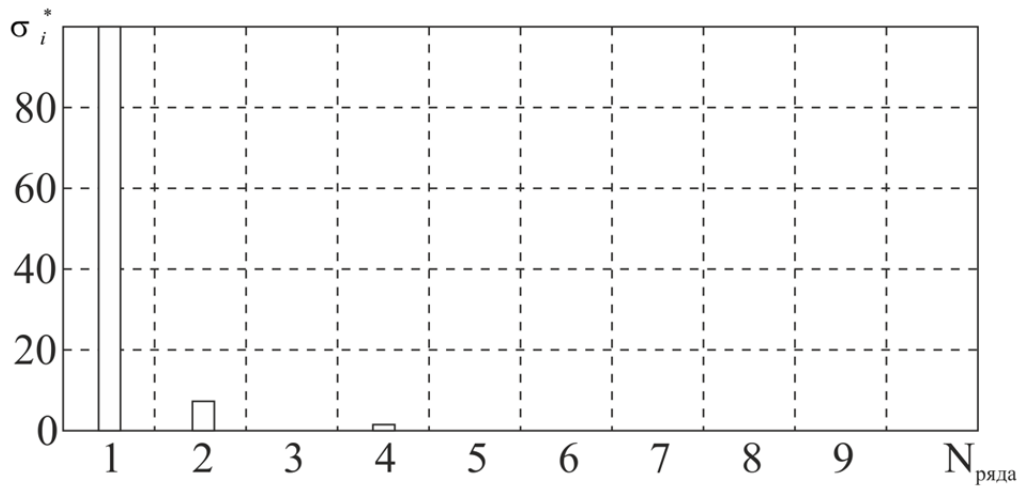


Рисунок 4.20 - Гистограммы относительной дисперсии отклонения активностей твэлов по рядам, без применения коллиматора детектора для  $N_E=3$

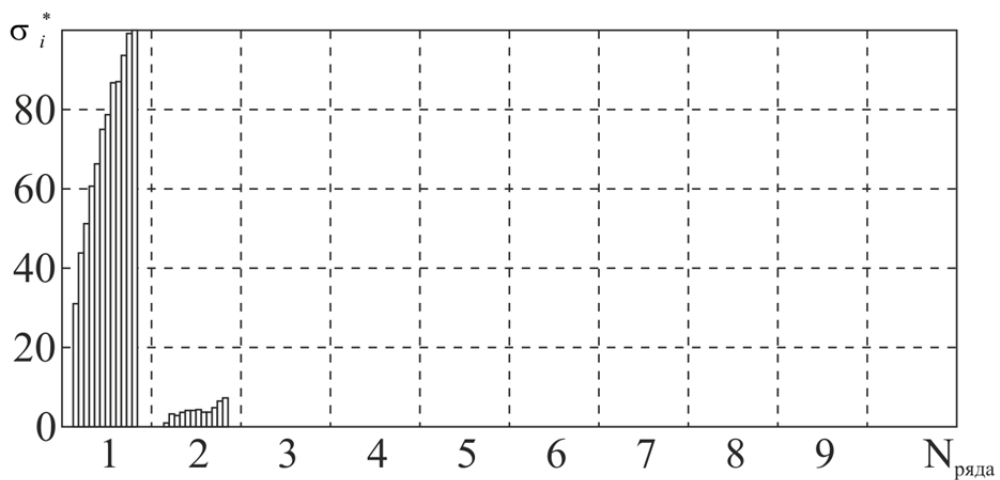


Рисунок 4.21 - Гистограммы относительной дисперсии отклонения активностей твэлов по рядам, с применением коллиматора детектора для  $N_E=3$  углами раскрытия коллиматора  $70...180^\circ$

Анализ представленных гистограмм подтвердил идею использования коллиматора детектора для повышения качества восстановления активности ТВЭЛОВ.

Кроме того, анализ гистограмм показал, что качество восстановления повышается с уменьшением угла обзора коллиматора. Также было установлено, что минимальный угол «зрения» коллиматора детектора должен быть не менее  $70^\circ$ .

#### **4.9. Выводы по четвертому разделу**

1. Определены основы автоматизированного управления свойствами ЯТ по высоте для любого режима эксплуатации РУ ВВЭР-1000 на протяжении всей топливной кампании, которые позволят повысить эффективность и безопасность эксплуатации ЯТ за счет своевременного определения областей с наибольшей вероятностью повреждения оболочек ТВЭЛОВ, с учетом глубины выгорания ЯТ и алгоритма перестановок ТВС в АКЗ.

2. Предложена материально-информационная схема движения ЯТ, основанная на измерении свойств ЯТ по всей высоте ТВС в процессе перегрузки, позволяющая сократить простой РУ, связанный с перегрузкой ЯТ, а также минимизировать вероятность внеплановых остановок РУ с ВВЭР-1000.

3. Выявлена зависимость между точностью идентификации поврежденных ТВЭЛОВ ТВС и величиной угла раскрытия коллиматора детектора.

## ВЫВОДЫ

Диссертационная работа посвящена задаче разработки технологических основ автоматизированного управления свойствами ядерного топлива АЭС с ВВЭР-1000, что позволяет обеспечить наиболее эффективную эксплуатацию ядерного топлива.

Используя полученные научные и практические результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Получила дальнейшее развитие распределенная модель изменения свойств АКЗ ВВЭР-1000 во времени, основанная на двухгрупповом диффузионном приближении нейтронного поля, отличающаяся тем, что для определения величины деформационной поврежденности оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  применяется модель, основанная на энергетическом варианте теории ползучести, что позволило разработать математическую модель и метод расчета изменения со временем аксиальных профилей  $\omega(\tau)$  и глубины выгорания ЯТ  $B_U(\tau)$  с учетом истории нагружения ТВС, для определения показателей безопасности и эффективности эксплуатации ядерного топлива (ЯТ) в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000.

2. В результате исследования закономерностей изменения со временем аксиальных профилей  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  для усредненного по ТВС твэла в зависимости от перестановок ТВС в АКЗ при переменном режиме нагружения ВВЭР-1000 по суточному циклу, а также для усредненной по алгоритму 3 перестановки ТВС в базовом режиме нагружения и в переменном режиме нагружения по суточному, недельному и комбинированному циклу определено, что максимум  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$  приходится соответственно на 6-й аксиальный сегмент (АС), расположенный между координатами 2,21 и 2,65 м, и на 4-й АС, расположенный между координатами 1,33 и 1,77 м, считая от нижнего края топливного столба.



3. Путем модификации критерия эффективности управления свойствами твэлов предложен критерий эффективности эксплуатации ЯТ, позволяющий определять алгоритмы перестановок ТВС с минимальными среднеквадратическими отклонениями значений  $B_U(\tau)$  для пяти АС с наибольшей величиной  $\omega(\tau)$ : для алгоритма 3 значения  $B_U(\tau)$  среднего твэла по пяти АС с наибольшей величиной  $\omega(\tau)$  характеризуются интервалом разброса  $B_{U3}(\tau) = [49,25 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}; 67,28 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}]$ , со среднеарифметическим  $\langle B_{U3}(\tau) \rangle \approx 59,63 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_3 \approx 5,028 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}$ , тогда как для алгоритма 18 – интервалом разброса  $B_{U18}(\tau) = [41,76 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}; 71,61 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}]$ , со среднеарифметическим  $\langle B_{U18}(\tau) \rangle \approx 59,63 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{18} \approx 7,062 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг-U}$ .

4. Получил дальнейшее развитие метод контроля герметичности оболочек (КГО) твэлов, основанный на идентификации облученных ТВС с негерметичными оболочками твэлов методом томографии, отличающийся тем, что для выявления группы твэлов с наибольшей поврежденностью оболочек угол облучения коллиматора детектора изменяется, что повышает достоверность гистограммы отклонений выборок активности топливных стержней твэлов, тем самым повышая достоверность идентификации негерметичных оболочек. Усовершенствованный метод КГО твэлов позволяет повысить качество идентификации и определения количества поврежденных твэлов облученных ТВС за счет выявления групп твэлов с наибольшей величиной  $\omega(\tau)$ .

5. Впервые разработаны технологические основы автоматизированного управления свойствами ЯТ ВВЭР-1000 на базе автоматизированных систем управления выработкой электрической энергии и перегрузкой ЯТ, отличающиеся тем, что процессы эксплуатации и перегрузки ЯТ определяются через поврежденность оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  и глубину выгорания  $B_U(\tau)$  на основе системного подхода, что дает возможность одновременно контролировать

характеристики, описывающие как безопасность, так и экономичность эксплуатации ЯТ в любом режиме нормальной эксплуатации ВВЭР-1000.

**6.** Разработанные технологические основы автоматизированного управления свойствами ЯТ позволяют внедрить в ГП НАЭК «Энергоатом» на АЭС с ВВЭР-1000 методику компьютерно-интегрированной оценки целесообразности дальнейшей эксплуатации ЯТ на основе одновременного учета величин  $\omega(\tau)$  и  $B_U(\tau)$ , накопленных в результате реализованной последовательности совокупностей условий эксплуатации реактора.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Оценка развития атомной энергетики Украины на долгосрочную перспективу / [Власенко Н.И., Кухарчук Н.П., Годун О.В. и др.] // Тр. XX межд. конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. – Алушта: ННЦ “Харьковский физико-технический институт”, 10-15 сент. 2012.– С. 7–8.
2. Бронніков, В. Перспективи розвитку ядерної електрогенерації в контексті завдань Енергетичної стратегії України / В. Бронніков, Л. Литвинський // Національна безпека і оборона. – 2008. – № 3. – С. 42 – 45.
3. АЭС с ВВЭР: режимы, характеристики, эффективность / [Аминов Р. З., Хрусталева В.А., Духовенский А.С., Осадчий А.И.]– М.: Энергоатомиздат, 1990. – 365 с.
4. Запорожская АЭС: блоки 5,6 (расширение до 6000 МВт). Проект.– М.: Ин-т ”Атомтеплоэлектропроект”, 1985.–214 с. – (Препринт / Ин-т ”Атомтеплоэлектропроект”; ТП.З. 3.7 (т. 1)).
5. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций НП-082-07 (взамен ПНАЭ Г-1-024-90, ПБЯ РУ АС-89). – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2008. – 21 с.
6. Pelykh, S.N. A method for minimization of cladding failure parameter accumulation probability in VVER fuel elements / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov, M.V. Nikolsky // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. – 2014. – Iss. 4. – P. 108–116.
7. Гонтарь, Р. Л. Моделирование выгорания топлива и поврежденности оболочек ТВЭЛов при маневрировании мощностью ВВЭР-1000 / Р. Л. Гонтарь // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2012. – Вып. 2(39). – С. 108–112.

8. Гонтарь, Р. Л. Автоматизация процесса восстановления интенсивности гамма-излучения твэлов ТВЗ / Р. Л. Гонтарь, О. В. Маслов, В. О. Давыдов // Холодильная техника и технология. – 2010. – Вып. 6(128). – С. 72–73.

9. Pelykh, S. N. Estimation of local linear heat rate jump values in the variable loading mode / S. N. Pelykh, R. L. Gontar, T. A. Tsiselskaya // Proc. of the 3-rd int. conf. “Current problems of nuclear physics and atomic energy”. – К.: Institute for Nuclear Research, 2010. – P. 505–508.

10. Пелых, С. Н. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения / М. В. Максимов, С. Н. Пелых, Р. Л. Гонтарь, Т. А. Цисельская // Сб. науч. тр. Севастопольского нац. ун-та ядерной энергии и промышленности. – 2010. – Вып. 4 (36). – С. 50–58.

11. Гонтарь, Р. Л. Влияние угла облучения коллиматора детектора на качество восстановления интенсивности гамма-излучения твэлов ТВЗ / Р. Л. Гонтарь, М. В. Максимов, О. В. Маслов // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2011. – Вып. 1(35). – С. 49–53.

12. Максимов, М. В. Управление свойствами ядерного топлива в переменном режиме нагружения легководного реактора / Максимов М. В., Пелых С. Н., Гонтарь Р. Л. // Сб. науч. тр. Севастопольского нац. ун-та ядерной энергии и промышленности. – 2011. – Вып. 4 (40). – С. 34–42.

13. Пелых, С. Н. Принципы управления долговечностью оболочек твэлов в переменном режиме ВВЭР-1000 / С. Н. Пелых, М. В. Максимов, Р. Л. Гонтарь, Т. А. Цисельская // Сб. тезисов 7-й межд. научно-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. – Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2011. – С. 59.

14. Методы управления ресурсом оболочек твэлов легководных реакторов / С. Н. Пелых, О. Б. Максимова, Р. Л. Гонтарь, Т. А. Цисельская // Сб. мат. Всерос. науч.-практ. конф., посвященной 50-летию каф. «Атомная энергетика» Урал. фед. ун-та 6–8 окт. 2011 г. “Энергетика XXI века. Техника, экономика и подготовка кадров. Ч. 1”. – Екатеринбург: Урал. фед. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2011. – С. 54–57.

15. Pelykh, S. N. Estimation of local linear heat rate jump values in the variable loading mode / S. N. Pelykh, R. L. Gontar, T. V. Tsiselskaya // Nuclear Physics and Atomic Energy. – 2011. – Vol. 12, № 3. – P. 242–245.
16. Максимов, М. В. Основы управления ресурсом оболочки твэла в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000 / М. В. Максимов, С. Н. Пелых, Р. Л. Гонтарь // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112, вып. 4. – С. 199–206.
17. Гонтарь, Р. Л. Моделирование выгорания топлива и поврежденности оболочек твэлов при маневрировании мощностью ВВЭР-1000 / Р. Л. Гонтарь // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2012. – Вып. 2(39). – С. 108–112.
18. Белл, Д. Теория ядерных реакторов / Д. Белл, С. Глесстон. – М.: Энергоатомиздат, 1974. – 489 с.
19. Иванов, В. А. Эксплуатация АЭС / В. А. Иванов. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 379 с.
20. Коренной, А. А. Оптимизация длительности работы энергоблоков типа ВВЭР в режиме продления кампании / А. А. Коренной, О. В. Неделин, Е. Н. Письменный, Л. Г. Вайнер // Пром. теплотехника. – 2000. – Т. 22, № 5–6. – С. 82–88.
21. Буканов, В. Н. Методика определения радиационной нагрузки корпуса реактора ВВЭР-1000 / В. Н. Буканов, Е. Г. Васильева, О. В. Неделин и др. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2000. – Т. 3., Вып. 3. – С. 32–40.
22. Pelykh, S. N. Grounds of VVER-1000 fuel cladding life control / S. N. Pelykh, M. V. Maksimov, V. E. Baskakov // Annals of Nuclear Energy. – 2013. – Iss. 58. – P. 188–197.
23. ГОСТ 28506-90. Сборки тепловыделяющие ядерных энергетических реакторов типа ввэр. Методы контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – С. 2 – 3.
24. Маслов, О. В. Технические средства и методическое обеспечение контроля состояния ядерного топлива в реальном времени / О. В. Маслов, О. В. Неделин, Л. Л. Кальнев, Д. В. Билей, М. В. Максимов // Энергетика: економіка, технологія, екологія. – 2002. – № 4. – С. 26 – 32.

25. Пат. 65872 Україна, МПК G01N 29/46. Спосіб визначення герметичності оболонок тепловідільних елементів тепловідільних збірок / Максимов М. В., Гонтарь Р. Л., Маслов О. В.; заявник та патентовласник Максимов М. В., Гонтарь Р. Л., Маслов О. В. - № u201111987; заявл. 12.10.2011; опубл. 12.12.2011, Бюл. №23/2011.

26. Маслов, О. В. Система радиационно-технологического контроля отработавшего топлива реактора ВВЭР / О. В. Маслов, М.В. Максимов, С.Г. Олейник, Л.Л. Кальнев // Тр. 2-й междунар. науч.-технич. конф. "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики" – г. Москва, 22-23 марта, 2001 г. – С. 308.

27. Тевлин, С.А. Атомные электростанции с реактором ВВЭР-1000: учеб. пособие для вузов. – М.: МЭИ, 2008. – 358 с.

28. Pelykh, S.N. Theory of fuel life control methods at Nuclear Power Plants (NPP) with Water-Water Energetic Reactor (WWER) / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov // Nuclear Reactors / A.Z. Mesquita. – Rijeka, 2012. – Chapter 10. – P. 197–230.

29. Model of cladding failure estimation for a cycling nuclear unit / M.V. Maksimov, S.N. Pelykh, O.V. Maslov, V.E. Baskakov // Nuclear Engineering and Design. – 2009. – Vol. 239, № 12. – P. 3021–3026.

30. Метод оценки эффективности алгоритма маневра мощностью энергоблока с реактором типа ВВЭР / М.В. Максимов, С.Н. Пелых, О.В. Маслов, В.Е. Баскаков // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – Вып. 4. – С. 128–139.

31. Типовой технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 (В-320): ТРВ-1000-3.– М.: 1988.– 350 с.

32. Правила устройства и безопасности эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок : (ПН АЭГ–7–008–89): введ. 90-01-01 / Гос. ком. СССР по надзору за безопас. ведением работ в атом. энергетике. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 168 с.

33. Овчинников, Ф. Я. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов // Ф. Я. Овчинников, В. В. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 359 с.
34. Максимов, М.В. Анализ эффективности эксплуатации АЭС / М. В. Максимов, Н. А Фридман., О. В. Маслов // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2001. – Вып. 4 (16). – С. 42–45.
35. Максимов, М. В. Оценка эффективности работы АЭС с реакторами ВВЭР-1000 / М. В. Максимов, Н. А Фридман., О. В. Маслов // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2002. – Вып. 1 (17). – С. 70–75.
36. Разработка усовершенствованного алгоритма управления мощностью и энергораспределением активной зоны серийного ВВЭР-1000 с учетом результатов опытных маневров мощности на 5-м блоке Запорожской АЭС: Отчет о НИР / РНЦ “Курчатовский институт”.– Инв. № 32/1-64-498. – М., 1998.– 90 с.
37. Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержание суточного баланса мощности энергосистемы / В. Е. Баскаков, М. В. Максимов, О. В. Маслов // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2007. – Вып. 2 (28). – С. 56–59.
38. Адаптация усовершенствованных алгоритмов оптимизации управления мощностью применительно к первому блоку Ростовской АЭС. Отчет о НИР / РНЦ “Курчатовский институт”. – Инв. №32/1-32-200. – М., 2000. – 97 с.
39. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ-88/97 НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97) / В. М. Беркович, А. М. Букринский, М. И. Мирошниченко, В. А. Сидоренко.– М.: Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности (Госатомнадзор России), 1998. – 24 с.
40. Пелых, С. Н. Основы управления свойствами твэлов ВВЭР / С.Н. Пелых. – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. – 168 с.
41. Fuel R&D to Improve Fuel Reliability / R. Yang, B. Cheng, J. Deshon et al. // Journal of Nuclear Science and Technology.– 2006.– Vol. 43.– No. 9. – P. 951–959.

42. Рыжов, С. Б. О новых проектах реакторных установок ВВЭР на современном этапе развития атомной энергетики / С. Б. Рыжов, В. А. Мохов, А. К. Подшибякин и др. // Сб. тезисов 6-й межд. научно-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. – Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2009. – С. 19–20.

43. Анализ характеристик топливных циклов повышенной длительности реакторов ВВЭР/ О. Г. Герасимчук, В. И. Орлов, В. Ф. Украинцев // Ядерная Энергетика. Известия Вузов – 2002. – №. 3 – С. 88 – 94.

44. Анализ и прогнозирование экономических характеристик топливных циклов реакторов ВВЭР/ О. Г. Герасимчук, В. И. Орлов, В. Ф. Украинцев // Ядерная энергетика. Известия Вузов – 2002. – №. 3 – С. 95 – 103.

45. Анализ эффективности топливоиспользования и выработка рекомендаций по совершенствованию топливоиспользования на действующих АЭС с реакторами ВВЭР-1000: Отчет о НИР / ВНИИАЭС.–Инв. № О–313–29/93. – М., 1993. –78 с.

46. Максимов, М. В. Определение критерия эффективности эксплуатации АЭС с ВВЭР в переменной части графика электрической нагрузки / М. В. Максимов, Н. А Фридман., О. В. Маслов // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2001. – Вып. 2 (14). – С. 86–89.

47. Коренной, А. А. Совершенствование критериев эффективности эксплуатации топливных загрузок реакторов ВВЭР-1000 / А. А. Коренной, Н. А. Фридман // Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. – 2002. – № 2(8). – С. 85–88.

48. Крамеров, А.Я. Инженерные расчеты ядерных реакторов / А. Я. Крамеров, Я. В. Шевелев.– М.: Энергоатомиздат, 1984. – 736 с.

49. Горохов, А.К. Методика анализа аксиальных ксеноновых колебаний и режимов их подавления в реакторах ВВЭР-1000 и некоторые результаты ее применения / А.К. Горохов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. – 2006. – Вып. 15.– С. 13 –30.



50. Горохов, А. К. Ограничение аксиального офсета в реакторах ВВЭР-1000 при выполнении маневров мощности / А. К. Горохов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС.– 2006.– Вып. 15.– С. 31–44.

51. Аверьянова, С. П. Внедрение усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением активной зоны ВВЭР-1000 на Хмельницкой АЭС / С. П. Аверьянова, П. Е. Филимонов, А. К. Горохов и др. // Атомная энергия. – 2005. – Т. 98, Вып. 6. – С. 414–421.

52. Колесов, В. Ф. Динамика ядерных реакторов. / В. Ф. Колесов, П. А. Леппик, С. П. Павлов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 518 с.

53. Шустов, В. Системы аварийной сигнализации и контроля радиационной обстановки / В. Шустов, Ю. Петров, С. Шмельков, С. Малышев // СТА. – 2000. – № 2. – С. 42–49.

54. Коренной, А.А. Использование отрицательных эффектов реактивности для повышения эффективности работы энергоблоков ВВЭР-1000 и глубины выгорания отработанного ядерного топлива // Сборник докл. междунар. конф. УкрЯО “Обращение с отработанным ядерным топливом”. – К.: Знание Украины. – 2000. – С. 299–304.

55. Филимонов, П. Е. Программа ”Имитатор реактора” для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000 / П. Е. Филимонов, В. В. Мамичев, С. П. Аверьянова // Атомная энергия. – 1998. – Т. 84, № 6. – С. 560–563.

56. Пелых, С. Н. Метод прогнозирования надежности оболочек твэлов ВВЭР / С. Н. Пелых, М. В. Максимов, М. В. Никольский // Ядерная физика и энергетика. – 2014. – Т. 15, № 1 – С. 50–58.

57. Пелых, С. Н. Метод ограничения вероятности накопления поврежденности оболочек твэлов ВВЭР / С. Н. Пелых, М. В. Никольский, С. Д. Рябчиков // Тр. Одес. Политехн. ун-та. – 2014. – Вып. 2 (44). – С. 82–87.

58. Пат. 100070 України, МПК G 21 C 7/00. Спосіб управління ядерною енергетичною установкою з реактором водяного типу при зміні потужності

реактора або зовнішнього навантаження / Максимов М.В., Пелих С.М., Баскаков В.Е, Цисельська Т.О.; заявник та патентовласник Максимов М.В., Пелих С.М., Баскаков В.Є, Цисельська Т.О. – № а201102326; заявл. 28.02.2011; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21/2012.

59. Решетников, Ф.Г. Проблемы создания твэлов ВВЭР-1000 для работы в условиях маневренных АЭС и повышенного выгорания / Ф. Г. Решетников, Ю. К. Бибилашвили, И. С. Головнин и др. // Атомная энергия.–1988.– Т.64.– Вып. 4.– С. 258–266.

60. Сузуки, М. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения / автор. пер. с англ. С.Н. Пелых. – Одесса: Астропринт, 2010. – 218 с.

61. Соснин, О. В. Энергетический вариант теории ползучести / О.В. Соснин, Б.В. Горев, А.Ф. Никитенко. – Новосибирск: Ин-т термодинамики СО АН СССР, 1986. – 95 с.

62. Любашевская, И. В. Оценка интенсивности процесса ползучести и длительности до разрушения материала на базе деформационной теории / И. В. Любашевская, И. В. Новоселя, О. В. Соснин // Тр. науч.–практ. конф.–Новокузнецк: Новокузнец. филиал Кемеров. ГУ, 2006. – С. 54 – 59.

63. Pelykh, S. N. Theory of VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. – 2013. – Iss. 2(84). – P. 50–54.

64. Пелых, С. Н. Метод управления перестановками ТВС с учетом поврежденности оболочек твэлов и глубины выгорания топлива / С.Н. Пелых, М.В. Максимов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2013. – Вып. 5(87). – С. 84–90.

65. Pelykh, S.N. Model of cladding failure estimation under multiple cyclic reactor power changes / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov, V.E. Baskakov // Proc. of

the 2-nd int. conf. "Current problems of nuclear physics and atomic energy". – K.: Institute for Nuclear Research, 2008. – P. 638–641.

66. Pelykh, S.N. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Vol. 241, № 8. – P. 2956–2963.

67. Аборина, И. Н. Физические исследования реакторов ВВЭР / И. Н. Аборина // М. : Атомиздат, 1978. – 118 с.

68. Ганчев, Б. Г. Ядерные энергетические установки / Б. Г. Ганчев, Л. Л. Калишевский, Р. С. Демешев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 346 с.

69. Сигал, М. В. Оценка экономически целесообразного времени продления кампании водо-водяных реакторов АЭС / М. В. Сигал, В. В. Семенов // Атомные электрические станции. – М.: Энергоатомиздат, 1980. – С. 123–127.

70. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов / Г. Г. Бартоломей, Г. А. Бать, В. Д. Байбаков, М. С. Алхутов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 512 с.

71. Филимонов, П.Е. Исследование и развитие методов управления мощностью и распределением энерговыделения реактора ВВЭР–1000 / П.Е. Филимонов, С.П. Аверьянова // Сб. трудов 2-й межд. научно-техн. конф. "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики". Часть 1.– М.: РНЦ "Курчатовский ин-т", 2001. – С. 271–276.

72. ГОСТ 24693-81. Реакторы ядерные энергетические корпусные с водой под давлением. Общие требования к системе борного регулирования. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 5 с.

73. Оценка аксиального распределения параметра повреждения оболочки твэла ВВЭР-1000 при суточном маневрировании / М.В. Максимов, С.Н. Пелых, О.В. Маслов, В.Е. Баскаков // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – № 2. – С. 162–170.

74. Харрер, Дж. Техника регулирования ядерных реакторов : пер. с англ. / Дж. Харрер // – М. : Атомиздат, 1967. – 494 с.

75. Сангинова, О. В. Использование гидродинамических моделей для расчета концентрации борной кислоты в ядерных реакторах типа ВВЭР-1000 / О. В. Сангинова / Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-14) // тез. докл. 14-й междунар. науч. конф. – Т. 6, секц. 10. – Смоленск: Смоленск. фил. Москов. энергет. ин-та. – 2001. – С. 64 – 65.

76. Антонов, А.В. Системный анализ. Учеб. для вузов / А.В. Антонов. – М.: Высшая шк., 2004. – 454 с.

77. Филипчук, Е. В. Управление нейтронным полем ядерного реактора / Е. В. Филипчук, П. Т. Потапенко, В. В. Постников. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 280 с.

78. Дементьев, Б.А. Кинетика и регулирование ядерных реакторов.– М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.

79. Воробьев, Р. Ю. Альбомы нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора энергоблока № 5 ЗАЭС, кампании 20-23 / Р. Ю. Воробьев. – Энергодар: Запорожская АЭС, 2008-2011. – 323 с.

80. Шмелев, В. Д. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций / В. Д. Шмелев, Ю. Г. Драгунов, В. П. Денисов. – М.: Академкнига, 2004. – 220 с.

81. Suzuki, M. Light water reactor fuel analysis code FEMAXI-V (Ver.1). JAERI-Data/Code 2000-030. – Tokai: Japan atomic energy research institute, 2000. – 285 p.

82. Основные требования к обоснованию прочности и термомеханического поведения ТВС и твэлов в активной зоне реакторов ВВЭР. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2015. – 18 с.

83. Алексеев, Е. Е. Разработка методов расчета работоспособности твэлов ВВЭР в вероятностной и детерминистической постановке: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.14.03 “Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации” / Е. Е. Алексеев. – М., 2008. – 31 с.

84. Обеспечение работоспособности ядерного топлива в маневренных режимах. – В сб.: Украинско-рос. научно-практ. сем. “Опыт эксплуатации и внедрения топлива ВВЭР нового поколения” / [Новиков В.В., Медведев А.В., Богатырь С.М. и др.]– Хмельницкий: ХАЭС, 2005. – 22 с.

85. Deformation behavior of Zircaloy-4 cladding under cyclic pressurization / J. H. Kim, M. H. Lee, B. K. Choi, Y. H. Jeong // Journal of Nuclear Science and Technology.– 2007.– Vol. 44.– P. 1275–1280.

86. Hohorst, J.K. MATPRO-A, a library of materials properties for light-water-reactor accident analysis. NUREG/CR-5273-Vol.4.– Idaho Falls: Idaho National Engineering Lab., 1990.– 1098 p.

87. Pelykh, S. N. A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov, G. T. Parks // Nuclear Engineering and Design. – 2013. –Vol. 257, № 4. – P. 53–60.

88. Пелых, С. Н. Анализ устойчивости активной зоны ядерного реактора ВВЭР-1000 при различных программах регулирования реакторной установки / С. Н. Пелых, А. А. Назаренко, Т. А. Цисельская // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2011. – Вып. 2 (36). – С. 109–114.

89. Плютинский, В. И. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок АЭС / В. И. Плютинский, В. И. Погорелов – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 295 с.

90. Фельдбаум, А. А. Методы теории автоматического управления / А. А. Фельдбаум, А. Г. Бутковский – М. : Наука, 1971. – 743 с.

91. Саркисов, А. А. Физика переходных процессов в ядерных реакторах / А. А. Саркисов, В. Н. Пучков – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 232 с.

92. Северин, В. П. Моделирование, оптимизация и идентификация систем автоматического управления / В. П. Северин, Д. Е. Грозенок, Н. А. Позняк // Матеріали 1-ої Міжнар. конф. з автомат. керування «Автоматика-94».– К. : ІК АН України. – 1994. – Ч. I. – С. 172.

93. Christiansen, J. Algorithm 77. Solving a system of simultaneous ordinary differential equations of the first order using a method for automatic step change. / J. Christiansen // The Computer Journal. – 1973. – Vol. 16, N. 2. – P. 187 – 188.

94. Иванов, В. А. Автоматизация энергетических установок ТЭС и АЭС: учеб. пособие / В. А. Иванов, Ю. В. Ожиганов. – Л. : СЗПИ, 1986. – 64 с.

95. Цисельская, Т. А. Анализ возможности использования борного регулирования для управления мощностью реактора ВВЭР-1000 / Т. А. Цисельская, О. Б. Максимова // Сб. науч. тр. Севастополь. нац. ун-та ядерной энергии и промышленности. – 2012. – Вып. 4 (44). – С. 33 – 40.

96. Цисельская, Т. А. Математическая модель реактора с ВВЭР-1000 как объекта с распределенными параметрами / Т. А. Цисельская, М. В. Максимов, К. В. Беглов // тез. конф. 19-й Міжнар. конф. з автоматичного упр. Автоматика 2012 Киев, 26 – 28 верес. 2012 р. – К., 2012. – С. 287 – 288.

97. Цисельская, Т. А. Математическая модель энергоблока ВВЭР-1000 / Т. А. Цисельская, М. В. Максимов, К. В. Беглов // Розвиток наукових досліджень 2011. : тез. доп. 7-ї міжнар. наук.-практ. конф. Полтава, 28-30 нояб. 2011 р. – Полтава, 2011. – С. 47 – 51.

98. Шальман, М. П. Контроль и управление на атомных электростанциях / М. П. Шальман, В. И. Плютинский – М. : Энергия, 1979. – 272 с.

99. Типовой технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 (В-320) : ТРВ-1000-3. – М.:1988.–350 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Документи о внедрении



**МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА  
ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ**  
(Міненерговугілля України)

01601, м.Київ, вул. Хрещатик, 30, тел.: 206-38-44, 206-38-45, ф.: 531-36-92  
E-mail: kanc@mev.energy.gov.ua, Код ЄДРПОУ 37471933

*27.08.2014 № 12-03/1334/1*

На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

**Ректору  
Одеського національного  
політехнічного університету  
проф. Оборському Г.О.**

#### ДОВІДКА

про впровадження Міністерством енергетики та вугільної промисловості результатів дисертаційної роботи Гонтаря Романа Леонідовича **«Технологічні основи автоматизованого керування властивостями ядерного палива АЕС з ВВЕР-1000»** на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.14 – Теплові та ядерні енергоустановки

Міністерство енергетики та вугільної промисловості України за результатами розгляду дисертаційної роботи Гонтаря Романа Леонідовича «Технологічні основи автоматизованого керування властивостями ядерного палива АЕС з ВВЕР-1000» пропонує звернутися до Державного підприємства «НАЕК «Енергоатом» з пропозицією опрацювати зазначену дисертацію та ухвалити рішення щодо впровадження таких результатів роботи:

- метод контролю герметичності оболонок твелів із застосуванням коліматору детектору - для підвищення безпеки та надійної безперервної роботи реактору;
- технологічні основи автоматизованого керування властивостями ядерного палива - для підвищення якості експлуатації ядерного палива.

**В.о. директора Департаменту  
з питань ядерної енергетики та  
атомно-промислового комплексу**

**Царьов О.М.**



МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

**ЕНЕРГО АТОМ**  
ENERGO ATOM

**НАЦІОНАЛЬНА  
АТОМНА  
ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧА  
КОМПАНІЯ**

№ 1284/26 від 29.01. 2013 р.

На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ 201\_\_ р.

Україна, 01032, Київ, вул. Вєстрова, 3  
Тел.: +38 044 206 97 57, факс: 277 78 83

Розрахунковий рахунок 26002100019275  
у ПАТ «Укресімбанк» м. Київ,  
МФО 322313, код ЗКПО 24584661

Ректору ОНПУ  
проф. Оборському Г.О.

### ДОВІДКА

про впровадження в тематиці ДП НАЕК «Енергоатом» результатів дисертаційної роботи Гонтаря Романа Леонідовича «Технологічні основи автоматизованого керування властивостями ядерного палива АЕС з ВВЕР-1000»

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.14 – Теплові та ядерні енергоустановки

Державне підприємство Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» впровадила наступні результати дисертаційної роботи Гонтаря Романа Леонідовича:

модель зміни властивостей реактора в змінному режимі навантаження, що дозволила визначити глибину вигорання і пошкодженості оболонок твелів;

метод контролю герметичності оболонок твелів із застосуванням коліматору детектору, що дозволяє виявлення групи твелів з найбільшим пошкодженням оболонки;

технологічні основи автоматизованого керування властивостями ядерного палива, що дало можливість визначити властивості ядерного палива в будь якому режимі його експлуатації.

Генеральний інспектор —  
директор з безпеки, канд. техн. наук.



Д.В. Білей

003650





### ДОВІДКА

Надана Гонтарю Роману Леонідовичу в тому, що матеріали дисертаційного дослідження «Технологічні основи автоматизованого керування властивостями ядерного палива АЕС з ВВЕР-1000» на здобуття ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю «Теплові та ядерні енергоустановки» використовуються при підготовці магістрів та бакалаврів за напрямом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» в інституті енергетики та комп'ютерно-інтегрованих систем керування в наступних курсах:

«Ідентифікація та моделювання»;

«Теорія автоматичного керування»;

«Автоматизація технологічних процесів та виробництв».

Довідка надана для подання до спеціалізованої вченої ради Д41.052.04

Проректор



С.А. Нестеренко

Вик. Максимов М.В.

тел. 705-85-31