

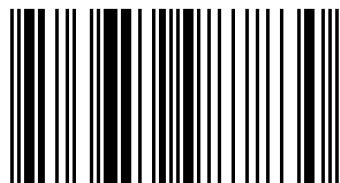
Основы управления свойствами ТВЭЛОВ ВВЭР

Создано научное направление – управление свойствами ТВЭЛОВ ВВЭР на стадиях проектирования и эксплуатации реактора с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности оболочек ТВЭЛОВ, с целью повышения эффективности эксплуатации ТВЭЛОВ за счет обеспечения баланса между безопасностью и экономичностью эксплуатации. Развитая теория позволяет: значительно снизить консерватизм оценки условий разгерметизации оболочки ТВЭЛА за счет снижения в 5 раз коэффициента запаса по группе прочностных критериев приемки ТВЭЛА; снизить вероятность разгерметизации оболочек ТВЭЛОВ ВВЭР; расширить границы и повысить экономичность эксплуатации ВВЭР; разработать автоматизированный программно-технический комплекс управления свойствами ТВЭЛОВ ВВЭР.



Сергей Николаевич Пельих

Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Одесского национального политехнического университета. Создал научное направление - управление свойствами ТВЭЛОВ ВВЭР на стадиях проектирования и эксплуатации реактора.



978-3-659-98783-0

Управление свойствами ТВЭЛОВ ВВЭР



Сергей Николаевич Пельих

Основы управления свойствами ТВЭЛОВ ВВЭР

Монография

Пельих


Palmarium
academic publishing

Сергей Николаевич Пелых

Основы управления свойствами твэлов ВВЭР

Сергей Николаевич Пелых

**Основы управления свойствами
ТВЭЛОВ ВВЭР**

Монография

Palmarium Academic Publishing

Impressum / Выходные данные

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Alle in diesem Buch genannten Marken und Produktnamen unterliegen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz bzw. sind Warenzeichen oder eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Inhaber. Die Wiedergabe von Marken, Produktnamen, Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen u.s.w. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Библиографическая информация, изданная Немецкой Национальной Библиотекой. Немецкая Национальная Библиотека включает данную публикацию в Немецкий Книжный Каталог; с подробными библиографическими данными можно ознакомиться в Интернете по адресу <http://dnb.d-nb.de>.

Любые названия марок и брендов, упомянутые в этой книге, принадлежат торговой марке, бренду или запатентованы и являются брендами соответствующих правообладателей. Использование названий брендов, названий товаров, торговых марок, описаний товаров, общих имён, и т.д. даже без точного упоминания в этой работе не является основанием того, что данные названия можно считать незарегистрированными под каким-либо брендом и не защищены законом о брендах и их можно использовать всем без ограничений.

Coverbild / Изображение на обложке предоставлено: www.ingimage.com

Verlag / Издатель:

Palmarium Academic Publishing

ist ein Imprint der / является торговой маркой

OmniScriptum GmbH & Co. KG

Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Deutschland / Германия

Email / электронная почта: info@palmarium-publishing.ru

Herstellung: siehe letzte Seite /

Напечатано: см. последнюю страницу

ISBN: 978-3-659-98783-0

Zugl. / Утверд.: Одесса, Одесский Национальный Политехнический Университет, 2013

Copyright / АВТОРСКОЕ ПРАВО © 2013 OmniScriptum GmbH & Co. KG

Alle Rechte vorbehalten. / Все права защищены. Saarbrücken 2013

Содержание

Условные сокращения	5
Предисловие	6
Введение	7
Глава 1.	
Предпосылки управления свойствами твэлов ВВЭР	13
1.1. Актуальность повышения эффективности эксплуатации твэлов	13
1.2. Необходимость усовершенствования нормативных требований	15
1.3. Принципы обоснования изменения свойств твэлов	18
1.4. Актуальность управления свойствами твэлов	19
1.5. Системные недостатки методики проектирования твэлов	20
1.6. Постановка научной проблемы	29
1.7. Выводы по первой главе	32
Глава 2.	
ЭВТП-модель изменения свойств твэла	37
2.1. Структура модели изменения свойств твэла.....	37
2.2. Конструкционные параметры твэла и РУ.....	38
2.3. Моделирование изменения мощности РУ.....	39
2.4. Моделирование распределения энерговыделения в твэле	41
2.5. Моделирование размещения ОР регулирующей группы СУЗ	42
2.6. Принципы термомеханического анализа свойств твэла.....	43
2.7. Входные и выходные данные модели расчета деформаций	44
2.8. Модель определения энтальпии теплоносителя.....	45
2.9. Принципы расчета температуры в твэле.....	45
2.10. Принципы анализа МВТО	46
2.11. Соотношение для скорости деформации ползучести оболочки.....	47
2.12. Соотношение для скорости коррозии оболочки	48
2.13. Замыкающие соотношения модели расчета температуры	48
2.14. Модель перестановок ТВС	49
2.15. Основной процесс накопления поврежденности оболочки	50

2.16. Соотношения для описания накопления поврежденности	52
2.17. Алгоритм расчета поврежденности оболочки	54
2.18. Выводы по второй главе	55

Глава 3.

ЭВТП-метод расчета поврежденности оболочки твэла	58
3.1. Положения ЭВТП-метода	58
3.2. Программное средство для расчета деформации оболочки	61
3.3. Влияние характеристик цикла нагружения на поврежденность	62
3.4. Влияние режимных характеристик РУ на поврежденность	66
3.5. Гистерезисное снижение деформации ползучести оболочки	68
3.6. Принцип совместного учета поврежденности и стабильности АО	69
3.7. Сравнение долговечности оболочек твэлов ТВС разных типов	73
3.8. Чувствительность модели расчета поврежденности	77
3.9. Уточненный анализ чувствительности модели поврежденности	83
3.10. Принцип совместного учета безопасности и экономичности	85
3.11. Задача о максимально нагруженном АС оболочки	92
3.12. Определение амплитуды скачка мощности АС твэла	92
3.13. Расчет аксиального распределения поврежденности оболочки	96
3.14. Влияние коррозии оболочки на поврежденность	99
3.15. Достоверность расчета поврежденности по ЭВТП-методу.....	102
3.16. Сравнение оценок поврежденности по SC4 и ЭВТП-методу	103
3.17. Выводы по третьей главе	105

Глава 4.

Управление конструкцией твэла и температурой теплоносителя	109
4.1. Модель эффективности управления свойствами твэлов.....	109
4.2. Метод управления конструкцией твэла	111
4.3. Метод аксиального профилирования диаметра отверстия таблетки.....	112
4.4. Программы суточного маневра мощностью РУ.....	113
4.5. Эффективность температурного режима теплоносителя.....	114
4.6. Метод управления температурным режимом теплоносителя	122
4.7. Выводы по четвертой главе	125

Глава 5.	
Управление перестановками ТВС и свойствами твэлов	127
5.1. Метод управления перестановками ТВС.....	127
5.2. Эффективность детерминистского управления перестановками	127
5.3. Вероятностная модель параметров эксплуатации твэла.....	134
5.4. Уменьшение количества детерминирующих факторов.....	135
5.5. Робастная модель управления перестановками ТВС	136
5.6. Простейшее робастное управление перестановками	137
5.7. Эффективность робастного управления перестановками ТВС	144
5.8. Метод управления свойствами твэлов	146
5.9. Выводы по пятой главе	147
Выводы.....	148
Заключение.....	154
Библиография	155

Условные сокращения

АКЗ – активная зона;
АО – аксиальный офсет;
АС – аксиальный сегмент;
ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор (PWR);
ВМ – вероятностная модель;
ГПК – главный паровой коллектор;
ГУ – граничное условие;
КИУМ – коэффициент использования установленной мощности;
КМ – критериальная модель;
ДФ – детерминирующий фактор;
КО – компенсационный объем;
КРН – коррозионное растрескивание под напряжением;
МВТО – механическое взаимодействие между топливом и оболочкой;
МКР – метод конечных разностей;
МКЭ – метод конечных элементов;
ОР – органы регулирования;
ПД – продукты деления;
ПР – программа регулирования;
ПС – программное средство;
РУ – реакторная установка;
СУЗ – система управления и защиты;
ТВС – тепловыделяющая сборка;
ЭВТП – энергетический вариант теории ползучести;
 B – глубина выгорания ядерного топлива, МВт·сут/кг-U;
ВWR – кипящий ядерный реактор;
 N – тепловая мощность АКЗ ВВЭР, МВт;
PWR – ядерный реактор с водой под давлением;
 $\omega(t)$ – поврежденность оболочки твэла.

Предисловие

Опубликование научным издательством “Palmarium Academic Publishing” моей докторской диссертации “Теоретические и технологические основы безопасной эксплуатации твэлов легководного реактора” в виде монографии “Основы управления свойствами твэлов ВВЭР” является большой честью и радостью для меня.

При подготовке монографии почти полностью сохранены структура и состав диссертации [1]. Некоторое сокращение объема монографии, по сравнению с рукописью диссертации, вызвано стремлением максимально ясно изложить главные идеи и результаты работы, за счет исключения второстепенных подробностей.

Выражаю сердечную благодарность друзьям и коллегам за поддержку и критику моей работы.

С.Н. Пельх, 20 октября 2013 г.



Доктор технических наук, старший научный сотрудник по специальности “Тепловые и ядерные энергоустановки”.
Одесский национальный политехнический университет.
пр. Шевченко, 1. Одесса. 65044. Украина. 1@pelykh.net

Введение

Согласно прогнозу по производству и потреблению электроэнергии, до 2050 г. основой атомной энергетики Украины останутся реакторные установки (РУ) с легководными реакторами типа ВВЭР, будет необходимо участие АЭС в регулировании энергосистемы [2].

В проектах РУ IV поколения повышены энергонапряженность активной зоны (АКЗ), длительность кампании и глубина выгорания ядерного топлива. Главным фактором, ограничивающим эти показатели, является долговечность оболочек твэлов. Согласно действующему подходу к оценке поврежденности оболочки твэла в нормальных условиях эксплуатации ВВЭР-1000, поврежденность оболочки оценивается по критерию SC4 через относительную длительность эксплуатации, когда компоненты поврежденности в стационарном и переменном режимах рассматриваются отдельно и суммируются.

Недостатки этого подхода: несоответствие условий, при которых получены ограничивающие компоненты SC4, условиям эксплуатации оболочки; хотя ограничивающие компоненты SC4 зависят от условий эксплуатации оболочки, в открытых источниках нет этих зависимостей; согласно SC4, при эксплуатации РУ по переменному циклу нагружения основным процессом накопления поврежденности оболочки является усталость, но экспериментальные результаты показывают основной вклад процесса ползучести; неопределенность оценки поврежденности оболочки по SC4, что отражается в коэффициенте запаса 10, более чем в пять раз превышающем коэффициенты запаса для остальных критериев приемки твэла прочностной группы.

Действующий подход к оценке поврежденности оболочки твэла препятствует эволюционному развитию РУ в направлении повышения энергонапряженности АКЗ, длительности кампании и глубины выгорания топлива.

Научно-техническое противоречие эффективной эксплуатации твэлов легководного реактора состоит в том, что расчетная методика оценки поврежденности оболочки при переменном нагружении твэла основана на преобладании

усталости в деформационном разрушении, тогда как экспериментальные данные показывают преобладание ползучести.

Научная проблема заключается в отсутствии теоретических и технологических основ эксплуатации твэлов легководного реактора с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности их оболочек, что делает невозможным управление свойствами твэлов для повышения безопасности их эксплуатации при соблюдении требований экономической эффективности.

Для повышения экономической эффективности эксплуатации твэлов путем управления их свойствами, при соблюдении требований безопасности, необходимо разработать теоретические и технологические основы эксплуатации твэлов легководного реактора с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности их оболочек.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- анализ моделей и методов расчета изменения свойств твэла и условий разрушения его оболочки;
- синтез модели изменения свойств твэла, учитывающей основной процесс накопления поврежденности его оболочки и параметры, определяющие поврежденность в нормальных условиях эксплуатации;
- разработка метода расчета поврежденности оболочки твэла в нормальных условиях эксплуатации с учетом основного процесса накопления поврежденности и определяющих ее параметров;
- разработка модели эффективности управления свойствами твэлов, учитывающей требования по безопасности и экономичности их эксплуатации;
- разработка методов управления конструктивными параметрами твэла и температурным режимом теплоносителя, учитывающих поврежденность оболочек твэлов, баланс безопасности и экономичности эксплуатации твэлов;
- разработка робастной вероятностной модели параметров эксплуатации твэла, учитывающей неопределенность их знания;
- разработка методов управления перестановками тепловыделяющих сборок (ТВС) и свойствами твэлов, учитывающих поврежденность оболочек твэ-

лов, баланс безопасности и экономичности эксплуатации твэлов.

Перечисленные задачи были решены в работе [1]. Объектом исследования являлись твэлы легководного реактора в нормальных условиях эксплуатации (на примере ВВЭР-1000), тогда как предметом исследования – модели и методы обоснования безопасной эксплуатации твэлов легководного реактора.

В исследовании [1] применялись: энергетический вариант теории ползучести, моделирование изменения поврежденности оболочки твэла в зависимости от режимных параметров РУ и конструкционных параметров твэла, размещения и вертикального перемещения ОР, перестановок ТВС, компьютерное моделирование – позволили разработать метод расчета поврежденности оболочки твэла; метод вариации постоянных – позволил минимизировать количество варьируемых и контролируемых параметров при моделировании изменения свойств твэла; метод учета поврежденности оболочек твэлов при нормальных условиях их эксплуатации в критерии модели эффективности управления свойствами твэлов – позволил одновременно учесть требования к безопасности и экономичности; метод управления конструкционными параметрами твэла – позволил предложить метод аксиального профилирования диаметра центрального отверстия топливной таблетки; метод управления температурным режимом теплоносителя – позволил разработать программу изменения мощности ВВЭР-1000 с постоянной входной температурой теплоносителя; закон нормального распределения и метод выборок Монте-Карло – позволили учесть робастные условия эксплуатации твэла; метод управления перестановками ТВС – позволил найти алгоритмы перестановок ТВС ВВЭР-1000, характеризующиеся минимумом средней поврежденности оболочек твэлов и интервалов неопределенности ее значений при максимальной равномерности выгорания ядерного топлива среди ТВС алгоритма перестановок; метод управления свойствами твэлов при проектировании и эксплуатации РУ – позволил обеспечить минимум средней поврежденности оболочек и интервалов неопределенности ее значений при максимальных равномерности и глубине выгорания ядерного топлива, стабильности аксиального офсета (АО).

Научная новизна результатов [1] состоит в том, что

– получила дальнейшее развитие модель изменения деформации и поврежденности оболочки твэла, глубины выгорания ядерного топлива на основе решения системы уравнений теплопередачи и механического взаимодействия между оболочкой твэла и топливной таблеткой методом конечных элементов, отличающаяся использованием энергетического варианта теории ползучести для расчета поврежденности оболочки при нормальных условиях ее эксплуатации, моделированием влияния изменения мощности РУ, размещения и вертикального перемещения ОР, перестановок ТВС на поврежденность оболочки твэла, что позволило разработать метод расчета поврежденности оболочки, учитывающий ползучесть как основной процесс ее разрушения при нормальных условиях эксплуатации;

– впервые определена мера влияния параметров на поврежденность оболочки и получено, что максимальная линейная мощность в твэле и температурный режим теплоносителя определяют поврежденность, локализован аксиальный сегмент (АС) оболочки, ограничивающий ее долговечность, что позволило минимизировать количество варьируемых и контролируемых параметров при моделировании изменения свойств твэла;

– получила дальнейшее развитие модель эффективности управления свойствами твэлов на основе учета показателей экономичности и безопасности эксплуатации твэлов, отличающаяся учетом поврежденности оболочек в нормальных условиях их эксплуатации, что позволило одновременно учесть требования к экономичности и безопасности для этих условий;

– впервые разработан метод управления конструкционными параметрами твэла на основе учета поврежденности его оболочки, баланса между безопасностью и экономичностью эксплуатации твэла, что позволило предложить метод аксиального профилирования диаметра центрального отверстия топливной таблетки, характеризующийся низкой поврежденностью оболочек при высокой нагрузке ядерного топлива;

– впервые разработан метод управления температурным режимом теплоно-

сителя на основе учета поврежденности оболочки твэла, что позволило разработать программу изменения мощности ВВЭР-1000 с постоянной входной температурой теплоносителя, характеризующуюся минимальной поврежденностью оболочек при максимальной стабильности аксиального оффсета;

- впервые разработана вероятностная модель параметров эксплуатации твэла на основе учета неопределенности параметров, определяющих поврежденность оболочки твэла, что позволило учесть робастные условия эксплуатации твэла при минимальной размерности вектора случайных величин;

- получил дальнейшее развитие метод управления перестановками ТВС в АКЗ на основе учета вероятности разгерметизации оболочек твэлов в условиях запроектной аварии и глубины выгорания ядерного топлива, отличающийся учетом поврежденности оболочек твэлов в нормальных условиях их эксплуатации, что позволило найти алгоритмы перестановок ТВС ВВЭР-1000, характеризующиеся минимумом максимальной, средней поврежденности оболочек и интервалов неопределенности ее значений при максимальной равномерности выгорания ядерного топлива среди ТВС алгоритма перестановок;

- впервые разработан метод управления свойствами твэлов при проектировании и эксплуатации РУ на основе итерационного задания параметров, определяющих поврежденность оболочек твэлов, глубину выгорания топлива, стабильность АО, что позволило обеспечить минимум максимальной, средней поврежденности, максимум загрузки топлива, уменьшить вероятность разгерметизации оболочек и повысить равномерность выгорания топлива за счет уменьшения интервалов разброса значений поврежденности и глубины выгорания, обеспечить максимум стабильности АО. Последовательный алгоритм управления свойствами твэлов позволяет снизить размерность векторов контролируемых параметров и варьируемых детерминирующих факторов, а также пространства случайных величин, описывающих свойства твэлов.

Методы управления свойствами твэлов легководного реактора позволяют учитывать накопленную в нормальных условиях эксплуатации РУ поврежденность оболочек твэлов; снизить в 5 раз консерватизм оценки условий разруше-

ния оболочки твэла по группе прочностных критериев за счет снижения в 5 раз коэффициента запаса; расширить границы и повысить экономичность эксплуатации РУ; разработать регламент и автоматизированный программно-технический комплекс управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации РУ с учетом поврежденности оболочек, баланса безопасности и экономичности эксплуатации.

Глава 1.

Предпосылки управления свойствами твэлов ВВЭР

1.1. Актуальность повышения эффективности эксплуатации твэлов

Согласно прогнозу производства и потребления электроэнергии в Украине до 2100 года, выполненному в ГП НАЭК “Энергоатом” под эгидой МАГАТЭ, во второй половине текущего столетия доля генерации электроэнергии на АЭС не снизится и составит около 50 % от общей генерации [2].

Из этого вывода следует, что

– в первой половине столетия основной атомной энергетикой Украины останутся РУ с энергетическими реакторами типа ВВЭР;

– неизбежен переход на технологии производства электроэнергии, основанные на использовании реакторов, характеризующихся значительно более жесткими условиями эксплуатации для материалов топливных элементов (твэлов) по сравнению с ВВЭР;

– сохранится необходимость эволюционного развития существующих АЭС в направлении участия в регулировании энергосистемы, т.е. эксплуатации АЭС в маневренном режиме.

Существует запрос практики, состоящий в необходимости повышения безопасности и надежности нормальной эксплуатации РУ с одновременным повышением ее экономичности. Предъявляются все более высокие требования к экономичности нормальной эксплуатации легководного реактора, для удовлетворения которых необходимо повышать параметры термодинамического цикла РУ, среднюю достигаемую глубину выгорания топлива, продолжительность топливной кампании.

Поскольку наибольшее число легководных реакторов эксплуатируется в США, целесообразно привести статистику по парку легководных реакторов США (с водой под давлением – типа PWR и кипящих – типа BWR). По данным института EPRI, на протяжении 15 лет (1990-2005 г.) для легководных реакто-

ров США зафиксирована устойчивая тенденция роста глубины выгорания топлива и длины топливного цикла [3].

Однако, удовлетворение требований повышения экономичности эксплуатации РУ за счет увеличения глубины выгорания топлива, других параметров приводит к повышению нагрузки на твэлы и увеличению риска разгерметизации их оболочек, что приводит не только к снижению надежности и безопасности эксплуатации РУ, но и к снижению экономичности. Согласно оценкам института EPRI (США), экономические потери от разгерметизации оболочки даже одного твэла легководного реактора (на примере ВВР), с учетом потерь из-за простоя РУ, затрат на замену твэла и замещение энергетической мощности РУ, в США достигают 1 млн. долларов [3].

Данные EPRI за период 1980-2005 г. по количеству случаев разгерметизации оболочек твэлов легководных реакторов США в год в пересчете на 1 ГВт установленной мощности показывают, что несмотря на значительное сокращение числа случаев разгерметизации в период 1980-1990 г., после 1990 г. произошла стабилизация этого числа на уровне примерно 1 случай в год на 1 ГВт установленной мощности, и данная тенденция сохранялась на протяжении 15 лет (1990–2005 г.) [3].

Данные института EPRI по причинам разгерметизации твэлов реакторов типа PWR в США, полученные на основе результатов их эксплуатации в течение 10 лет (1996-2005 г.), показывают, что главными факторами разгерметизации оболочек твэлов для PWR были [3]:

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

Для PWR такие факторы, как влияние механического взаимодействия между топливом и оболочкой (МВТО)/коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) на ранних стадиях облучения топлива, влияние брака при изготовлении и обращении с твэлами, влияние примесей в материале оболочки и коррозии при больших глубинах выгораний, имеют тенденцию к сокращению.

Данные института EPRI по причинам разгерметизации оболочек твэлов реакторов типа BWR в США, полученные на основе результатов их эксплуатации в течение 10 лет (1996-2005 г.), показывают, что главными факторами разгерметизации оболочек для BWR были [3]:

- примесная коррозия;
- МВТО/КРН;
- мусор в теплоносителе;
- неизвестные причины (18 %).

Влияние примесей в материале оболочки и коррозии при больших глубинах выгораний для BWR сильно зависит от применяемого водно-химического режима теплоносителя и определяется им [3].

Следовательно, на основе имеющегося знания механизмов разгерметизации, в нормальных условиях эксплуатации, оболочек твэлов легководных реакторов, механизм разгерметизации примерно в 20 % случаев неизвестен.

В проектах РУ IV поколения производства ОКБ “Гидропресс” повышены энергонапряженность активной зоны (АКЗ), длительность кампании и глубина выгорания ядерного топлива. В докладе [4] в качестве основной тенденции развития атомной энергетики и новых проектов РУ ВВЭР отмечалось “...повышение требований к экономической эффективности АЭС при обеспечении безопасности не ниже требований действующих нормативных документов”. Главным фактором, ограничивающим повышение экономических показателей эффективности эксплуатации АЭС с легководными реакторами, является долговечность оболочек твэлов.

1.2. Необходимость усовершенствования нормативных требований

При эксплуатации твэлов существует ненулевая вероятность образования и роста дефектов в соответствии с различными механизмами деградации материалов, и снижение в результате этого условного уровня безопасности не должно выходить за рамки проектных показателей надежности [5].

Поскольку обоснование безопасности должно быть консервативным, то с точки зрения целостности оболочек твэлов, являющихся первым барьером безопасности, неопределенность расчета исходных данных и поврежденности оболочки твэла должна рассматриваться как приводящая к заведомо худшим результатам. Однако, вместе с тем, для снижения издержек при проектировании, эксплуатации и продлении ресурса твэлов важно снижать консерватизм расчетов на прочность в рамках обоснования безопасности [5].

Поскольку требования нормативных документов к обоснованию надежности эксплуатации твэлов в течение проектного срока службы предполагают установление показателей надежности, связанных с вероятностью безотказной работы, для твэлов основным показателем надежности является неразрушение оболочек твэлов при их эксплуатации.

Безопасная эксплуатация твэлов легководного реактора типа ВВЭР производства ОКБ “Гидропресс” регламентируется требованиями нормативных документов “Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97” (ОПБ) [6] и “Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций НП-082-07 ” (ПБЯ) [7].

В ПБЯ установлены эксплуатационный предел повреждения твэлов и предел безопасной эксплуатации повреждения твэлов.

Эксплуатационный предел повреждения твэлов:

– дефекты типа газовой неплотности – не более 0,2 % от числа твэлов в активной зоне;

– прямой контакт ядерного топлива с теплоносителем – не более 0,02 % от числа твэлов в активной зоне.

Предел безопасной эксплуатации повреждения твэлов:

– дефекты типа газовой неплотности – не более 1 % от числа твэлов в активной зоне;

– прямой контакт ядерного топлива с теплоносителем – не более 0,1 % от числа твэлов в активной зоне.

Максимальный проектный предел повреждения твэлов соответствует

непревышению следующих предельных параметров [7]:

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

Хотя в ОПБ и ПБЯ сказано, что при обосновании безопасности РУ не допускается превышение пределов безопасной эксплуатации РУ, там не регламентируется изменение термомеханического состояния твэлов при нормальных условиях их эксплуатации, прежде всего деформации и поврежденности оболочек твэлов (под действием температурных и механических нагрузок, с учётом нестационарных теплофизических процессов в твэлах и межтвэльном пространстве). В нормативных документах не сказано, каким образом можно и следует влиять на изменение термомеханического состояния твэлов при нормальных условиях их эксплуатации.

Не определяется методика расчета в режиме реального времени поврежденности оболочек твэлов в процессе их эксплуатации, приводящая к дефектам типа газовой неплотности. Вследствие этого на действующих реакторах с ВВЭР-1000 НАЭК “Энергоатом” нет технических средств и не предусмотрено процедур для локализации разрушенного твэла в ТВС, локализации аксиального сегмента (АС) оболочки твэла, в котором произошла разгерметизация, а также для учета последовательности перестановок ТВС, содержащих разрушенные твэлы. Соответственно, на АЭС не ведется статистики разрушений оболочек твэлов, учитывающей локализацию области разгерметизации оболочки по высоте твэла и последовательность перестановок ТВС, содержащих разрушенные твэлы. В результате этого статистические данные по локализации области разгерметизации оболочки и последовательности перестановок ТВС, содержащих

разрушенные твэлы, отсутствуют в открытых источниках как Украины, так и других стран.

В работе [8] поставлена и решена проблема обоснования поведения твэлов и ТВС ВВЭР в аварийных режимах с большой течью из 1-го контура РУ.

Если не рассматривать аварийные режимы, для повышения безопасности нормальной эксплуатации твэлов ВВЭР необходимо усовершенствовать нормативные требования к долговечности оболочек твэлов. Это объясняется высокой величиной экономических потерь при разгерметизации оболочки даже одного твэла и необходимостью разработки РУ нового поколения, характерной особенностью которых является более высокая мощность при больших экономичности и безопасности.

В частности, необходимо регламентировать контроль средней и максимальной поврежденности оболочек твэлов каждой ТВС в зависимости от совокупности условий нормальной эксплуатации ТВС.

1.3. Принципы обоснования изменения свойств твэлов

В работе [8] сформулирована методология обоснования поведения твэлов и ТВС реактора типа ВВЭР в запроектной аварии. При обобщении этой методологии, основными принципами обоснования изменения свойств твэлов в режимах нормальной эксплуатации РУ являются [1]:

- необходимость детального описания изменения свойств твэлов;
- совместное рассмотрение термомеханических и теплогидравлических задач для снижения консервативности расчётов при обосновании безопасности и неопределённости;
- уточнение экспериментальных результатов по термомеханическим эффектам, полученных в конце 70-х и в 80-е годы, и не претерпевших заметных количественных и качественных изменений с тех пор;
- учет взаимосвязанного проявления процессов различной природы, а именно: нейтронно-физических, теплофизических, физико-химических, термо-

механических и теплогидравлических процессов;

- необходимость при обосновании безопасности РУ изучать деформационное поведение твэла в связи с теплофизическими и физико-химическими процессами в твэле и межтвэльном пространстве [8];

- недопустимость слишком высокой консервативности результатов, что ведёт к ухудшению экономических показателей и снижению конкурентоспособности РУ;

- необходимость ограничения количества твэлов в АЗ, герметичность которых может быть нарушена;

- учет неопределённости в численном анализе;

- управление изменением свойств твэлов.

1.4. Актуальность управления свойствами твэлов

Из опыта эксплуатации оболочек твэлов легководных реакторов [3] следует, что при исключении из рассмотрения таких причин разгерметизации оболочек как примесная коррозия, мусор, фреттинг-износ, в нормальных условиях эксплуатации твэла характерны следующие основные механизмы разгерметизации его оболочки:

- МВТО, особенно при низких глубинах выгорания ядерного топлива, и КРН;

- коррозия оболочки в области глубоких выгораний (>50 МВт·сут/кг-U);

- разгерметизация оболочки, вызванная комбинацией многократных циклических и долговременных стационарных нагружений.

Путем внедрения проектных и эксплуатационных мероприятий возможно постепенно снижать удельный вес некоторых факторов разгерметизации оболочек в нормальных условиях эксплуатации легководных реакторов [9].

В частности:

- 1) Влияние МВТО на долговечность оболочки при низких глубинах выгорания ядерного топлива возможно исключить введением нормативных ограни-

чений по величине максимальной линейной мощности в твэле.

2) Недопущение механического повреждения оболочки вследствие КРН обеспечивается путем контроля допустимого значения линейной мощности и величины скачков линейной мощности в твэле.

3) Влияние коррозии в области глубоких выгораний на долговечность оболочки твэла возможно исключить путем оптимизации технологии производства материала оболочки.

4) Возможность пластической деформации оболочки твэла, вследствие аварийного повышения ее температуры и соответствующего снижения предела текучести, при рассмотрении условий нормальной эксплуатации оболочки может быть исключена.

Следовательно, основным фактором разгерметизации оболочек твэлов, который необходимо рассматривать при управлении свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации легководных реакторов, является процесс разрушения оболочки, вызванный комбинацией многократных циклических и долговременных стационарных нагружений [10].

Данный подход к обеспечению безопасности эксплуатации твэлов, основанный на управлении свойствами твэлов, подразумевает учет в режиме реального времени накопленной в нормальных условиях поврежденности оболочек твэлов, требований экономической эффективности эксплуатации твэлов, а также внедрение проектных и эксплуатационных мероприятий, обеспечивающих постепенное снижение удельного веса таких факторов разгерметизации оболочек, как МВТО при низких глубинах выгорания ядерного топлива и КРН, а также коррозия оболочек в области глубоких выгораний.

Целостность оболочки твэла, оцениваемая на основе того или иного критерия ее поврежденности, является главным фактором безопасной эксплуатации твэлов, подлежащим учету при управлении свойствами твэлов.

1.5. Системные недостатки методики проектирования твэлов

Постановка вопроса о недостатках действующей практики проектирования твэлов РУ с ВВЭР актуальна исходя из следующих положений:

1) В работе [11] отмечено, что согласно экспериментальным исследованиям, при увеличении числа циклов нагружения прочность оболочки твэла определяется в основном:

- коррозионным растрескиванием под напряжением в атмосфере агрессивных продуктов деления (ПД);

- повреждением под действием многократных циклических и длительных статических нагружений.

Поскольку ограничением линейной мощности и скачкообразного изменения мощности реактора обеспечивается исключение механического повреждения оболочки в результате коррозионного растрескивания под напряжением, основное влияние на прочность оболочки оказывает ее повреждение под действием многократных циклических и длительных статических нагружений [11].

2) Прочность элементов АЭС играет важнейшую роль в обеспечении безопасности, поэтому за последние 30 лет наблюдается тенденция к увеличению полноты и глубины обоснования прочности элементов ВВЭР-1000. Однако, в нормативной литературе недостаточно четко изложены требования к термомеханическим расчетам безопасности ВВЭР-1000, – наиболее распространенного реактора на АЭС России и Украины [5].

3) Моделирование деформации материала оболочки при условиях, соответствующих реальным эксплуатационным условиям в АКЗ, невозможно по многим причинам.

Во-первых, поскольку необходимо учитывать всю историю нагружения материала оболочки твэла, при оценке срока службы оболочки в режиме переменных нагрузок представляется некорректным использование экспериментальных данных о ползучести материала оболочки, полученных в условиях стационарных и аварийных режимов.

Во-вторых, сложность оценки времени сохранения целостности оболочки твэла при стационарных и переменных нагрузках заключается в том, что экспе-

риментальное изучение совместного действия процессов ползучести и усталости в оболочке модельного твэла в условиях, соответствующих эксплуатационным режимам переменных нагрузок, или затруднительна, или невозможна, поскольку продолжительность таких испытаний может составлять несколько лет [9].

В этой связи основным подходом при обосновании долговечности твэлов легководного реактора в маневренном режиме является расчет величины окружных напряжений в оболочке твэла в зависимости от времени и проверка выполнения условия не превышения некоторой предельной величины, принятой для окружных напряжений [11].

В экспериментальных условиях прибегают к значительному увеличению интенсивности радиационного воздействия и частоты нагружения оболочки, но при этом меняется механизм ее разрушения, что приводит к неточности оценки условий ее разрушения. Следовательно, реальные условия эксплуатации оболочки твэла моделируются в экспериментах приблизительно и без учета всех возможных ситуаций при эксплуатации РУ (т.е. без учета изменения совокупности параметров эксплуатации РУ, влияющих на долговечность оболочки твэла).

Поэтому для усовершенствования проектирования твэлов актуальной является задача сбора экспериментальных данных и создания базы данных по совместному действию ползучести и усталости при циклическом нагружении оболочки твэла с низкими частотами ($\ll 1$ Гц), характерными для реальных эксплуатационных режимов [12].

В действующей практике проектирования твэлов РУ с ВВЭР-1000 для оценки долговечности оболочки твэла используют критерии приемки твэла, объединенные в группы деформационных, теплофизических, коррозионных и прочностных критериев. Нормативный коэффициент запаса определяется:

$$K = R^{\text{lim}} / R, \quad (1.1)$$

где R^{lim} – предельное значение параметра; R – расчетное значение параметра.

Известны следующие проектные критерии приемки твэлов прочностной группы и соответствующие им нормативные коэффициенты запаса [13]:

– критерий SC1 ($K=1,2$), ограничивает величину окружных напряжений σ_{θ} в оболочке твэла: $\sigma_{\theta} < 250$ МПа, что не допускает КРН в атмосфере агрессивных ПД;

– критерий SC2 ($K=1$), ограничивает максимальное эквивалентное напряжение σ_e^{\max} в оболочке величиной предела текучести $\sigma_0(T, \phi)$: $\sigma_e^{\max} < \sigma_0(T, \phi)$, где T – температура, ϕ – флюенс нейтронов, что не допускает потерю устойчивости материала оболочки по механизму “пластического шарнира”;

– критерий SC3 ($K=1,5$), ограничивает величину избыточного наружного давления теплоносителя P : $P < P^{\text{lim}}$, что не допускает потерю окружной устойчивости материала оболочки;

– критерий SC4 ($K=10$), ограничивает величину параметра поврежденности ω материала оболочки вследствие совместного действия процессов усталости и ползучести: $\omega < 1$;

– критерий SC5 ($K=1,2$), ограничивает величину окружной пластической деформации ϵ_{θ} оболочки в кратковременных режимах термомеханического нагружения, когда высокие напряжения появляются, например, при контакте топливного сердечника и оболочки: $\epsilon_{\theta} < 0,5\%$.

Таким образом, согласно действующей практике проектирования твэлов РУ с ВВЭР-1000, для обоснования прочности твэла при развитии напряженно-деформированного состояния в его оболочке используются критерии SC1...SC5, при этом коэффициент запаса $K=10$ для SC4 почти на порядок превышает коэффициенты запаса для остальных критериев прочностной группы.

Известны следующие проектные критерии приемки твэлов деформационной группы и соответствующие им нормативные коэффициенты запаса [13]:

– критерий DC1 ($K=1,2$), ограничивает величину изменения диаметра ΔD оболочки твэла, что не допускает фреттинг-износ оболочек: $\Delta D < 0,05$ мм (ТВС-А);

– критерий DC2 ($K=1,25$), ограничивает удлинение ΔL твэла с учетом зазо-

ра между верхними заглушками твэлов и верхней головкой ТВС:
 $\Delta L < 61$ мм (ТВС-А).

Известны следующие проектные критерии приемки твэлов теплофизической группы и соответствующие им нормативные коэффициенты запаса [13]:

– критерий ТС1 ($K=1,1$), ограничивает температуру ядерного топлива $T_{\text{топ}}$ (К) для недопущения достижения температуры плавления:
 $T_{\text{топ}} < 3110 - 3,577 \cdot B$, где B – глубина выгорания топлива, МВт·сут/кг;

– критерий ТС2 ($K=1,1$), ограничивает предельное значение давления газов $p_{\text{г}}$ под оболочкой твэла для недопущения превышения давления теплоносителя $p_{\text{тепл}}$: $p_{\text{г}} < p_{\text{тепл}}$;

– критерий ТС3 ($K=1$), ограничивает предельную линейную мощность твэла в зависимости от глубины выгорания: $q_l < q_l^{\text{lim}}$.

Известны следующие проектные критерии приемки твэлов коррозионной группы и соответствующие им нормативные коэффициенты запаса [13]:

– критерий КС1 ($K=1,5$), ограничивает окисление оболочки для недопущения превышения допустимого значения толщины окисной пленки: $h < 60$ мкм;

– критерий КС2 ($K=1$), ограничивает гидрирование оболочки для недопущения превышения допустимого значения содержания водорода в оболочке:
 $H < 0,04$ %.

Следовательно, коэффициент запаса для критериев деформационной, теплофизической и коррозионной групп также почти на порядок меньше коэффициента запаса для прочностного критерия SC4, описывающего поврежденность оболочек твэлов в результате совместного действия процессов ползучести и усталости.

Этот факт имеет двоякий смысл:

1) Прочностной критерий SC4 имеет важнейшее значение при обосновании долговечности оболочек твэлов. Этот вывод подтверждается результатом выполненного в п. 1.4 анализа, согласно которому основным фактором разгерметизации оболочек твэлов, который необходимо рассматривать при управлении

свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации легководных реакторов, является процесс разрушения оболочки, вызванный комбинацией многократных циклических и долговременных стационарных нагрузжений;

2) Расчет поврежденности оболочки по критерию SC4 имеет высокую степень неопределенности.

Согласно критерию SC4, общая поврежденность материала оболочки, вызванная комбинацией многократных циклических и долговременных стационарных нагрузжений, определяется через относительную длительность эксплуатации оболочки, когда компоненты поврежденности в результате переменной и стационарной эксплуатации рассматриваются отдельно, на основе принципа аддитивности

$$\omega(\tau) = \sum_i \frac{n_i}{n_i^{\text{lim}}} + \int_0^{\tau} \frac{dt}{t^{\text{lim}}} < 1, \quad (1.2)$$

где $\omega(\tau)$ – поврежденность материала оболочки; n_i и n_i^{lim} – количество и предельно допустимое количество циклов переменного нагружения i -го типа, соответственно; t – время; t^{lim} – предельная длительность эксплуатации оболочки до разрушения от ползучести при стационарных условиях.

Расчетные оценки показали, что при определении поврежденности оболочки твэла РУ с ВВЭР-1000 по выражению (1.2), после двух лет эксплуатации оболочки по суточному циклу нагружения РУ в режимах вторичного (цикл 100 % $N_{\text{ном}}$ – 80 % $N_{\text{ном}}$ – 100 % $N_{\text{ном}}$) и третичного (цикл 100 % $N_{\text{ном}}$ – 50 % $N_{\text{ном}}$ – 100 % $N_{\text{ном}}$) регулирования, соответствующий переменной нагрузке компонент поврежденности становится преобладающим, а после четырех лет эксплуатации – в 4,6 раз превосходит компонент, описывающий стационарную нагрузку [11].

Подход к оценке поврежденности оболочки твэла на основе критерия SC4 имеет следующие недостатки [14, 15, 16]:

1) Несоответствие между экспериментальными условиями, при которых получены ограничивающие члены n_i^{lim} и t^{lim} для компонентов поврежденности,

и реальными условиями эксплуатации оболочки (например, флюенс нейтронов; нейтронный спектр; давление газов под оболочкой твэла; температурный режим теплоносителя; скорость коррозии оболочки со стороны теплоносителя; аксиальное распределение поврежденности оболочки; алгоритм перестановок ТВС; размещение и амплитуда перемещения органов регулирования (ОР) системы управления и защиты (СУЗ) реактора; параметры цикла нагружения РУ и последовательность совокупностей параметров эксплуатации твэла).

2) При построении критерия SC4 использован принцип аддитивности, компоненты поврежденности оболочки твэла вследствие действия процессов ползучести и усталости в SC4 имеет одинаковый весовой коэффициент (1), тем самым не учитывается удельный вклад процессов ползучести и усталости как физических механизмов накопления поврежденности в оболочке твэла при частоте переменного нагружения РУ $\nu \ll 1$ Гц;

3) В открытых источниках не обнаружено обоснования использования при построении SC4 принципа аддитивности, с равными весовыми коэффициентами для компонентов поврежденности оболочки вследствие действия процессов ползучести и усталости, при частоте переменного нагружения РУ $\nu \ll 1$ Гц;

4) В открытых источниках не обнаружено обоснования справедливости принципа неучета при расчете поврежденности оболочки твэла последовательности совокупностей параметров эксплуатации оболочки, включающих:

- частоту цикла переменного нагружения;
- последовательность уровней мощности РУ;
- температурный режим теплоносителя;
- скорость коррозии оболочки со стороны теплоносителя;
- схему размещения в АКЗ и амплитуду перемещения ОР СУЗ реактора;
- алгоритм перестановок ТВС;
- аксиальное распределение поврежденности оболочки;
- флюенс нейтронов;
- нейтронный спектр;
- давление газов под оболочкой твэла и пр.

При нелинейном характере зависимости деформации ползучести от времени это вносит значительную неопределенность в оценку поврежденности по SC4;

5) Значения n_i^{lim} и t^{lim} зависят от условий нагружения РУ; метода маневрирования мощностью РУ; схемы размещения ОР в АКЗ и амплитуды их перемещения при маневрировании; алгоритма перестановок ТВС и т.д. Это требует определения новых n_i^{lim} и t^{lim} для любой новой совокупности параметров эксплуатации твэла;

6) Значения n_i^{lim} и t^{lim} в зависимости от совокупности условий эксплуатации твэла не обнаружены в открытых источниках;

7) Неопределенность оценки поврежденности оболочки твэла по критерию SC4 вынуждает принимать коэффициент запаса $K = 10$, на порядок превышающий коэффициент запаса для других прочностных критериев, регламентирующих максимальные значения в оболочке для тангенциального (SC1, $K=1,2$) и эквивалентного (SC2, $K=1$) напряжений, тангенциальной пластической деформации (SC5, $K=1$), а также максимальное давление теплоносителя (SC3, $K=1,5$).

Следовательно, критерий SC4 невозможно использовать при управлении свойствами твэлов для расчета в режиме реального времени поврежденности оболочек твэлов, накопленной в нормальных условиях эксплуатации твэлов.

В настоящее время комплекс недостатков подхода к оценке поврежденности оболочки твэла на основе критерия SC4 в практике проектирования твэлов для реактора ВВЭР-1000 решается путем построения лимитирующих зависимостей для критериев приемки твэлов, разбитых на группы деформационных, прочностных, теплофизических и коррозионных критериев.

Недостоверность оценки условий разрушения оболочки по прочностному критерию SC4, таким образом, компенсируется проверкой детерминистическими методами выполнения многочисленных установленных критериев безопасности, с использованием соответствующих расчетных кодов, где для обеспечения безопасной эксплуатации принимаются самые консервативные оценки. Для

этого определяются такие возможные значения параметров, которые отвечают этим консервативным оценкам [13].

Однако, поскольку предельные значения критериев приемки сами составлены с максимальной степенью консервативности, такое консервативное сочетание параметров: во-первых, имеет близкую к нулю вероятность реализации; во-вторых, сужает область параметров эксплуатации реактора и уменьшает экономичность эксплуатации; в-третьих, делает управление ресурсом оболочек твэлов при эксплуатации РУ принципиально невозможным ввиду неучета влияния на поврежденность оболочки последовательности совокупностей реальных условий эксплуатации оболочки.

Хотя для обхода этих недостатков предпринимаются попытки моделирования поведения твэлов с помощью вероятностного метода при различных допустимых значениях исходных параметров, путем рассмотрения на основе вероятностного подхода выполнения критериев приемки [13], результатом такого подхода является лишь указание границ возможных значений, которые могут принимать теплофизические, прочностные и деформационные характеристики твэлов при различных допустимых сочетаниях исходных параметров, а также указание вероятности реализации этих значений и вероятности выполнения какого-либо критерия безопасности.

Проведение же самих расчетных обоснований предлагается проводить на основе детерминистического подхода и использования предельных значений критериев приемки, составленных с максимальной степенью консервативности [13, 17].

Таким образом, данная методика тоже не позволяет определять условия разрушения оболочки твэла в зависимости от комплекса реальных условий ее эксплуатации и реализовать алгоритм управления ресурсом оболочек твэлов на АЭС с реакторами типа ВВЭР.

1.6. Постановка научной проблемы

На основе существующего подхода к обоснованию безопасности твэлов, подразумевающего высокую неопределенность расчета поврежденности оболочки твэла по прочностному критерию SC4, невозможно решить проблему управления свойствами твэлов ВВЭР с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности оболочек, поскольку

1) Для управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации ВВЭР необходимо выполнить требования корректного описания процесса разрушения оболочки, вызванного комбинацией многократных циклических и долговременных стационарных нагружений, а также учета последовательности совокупностей условий эксплуатации твэла, которым не удовлетворяет критерий SC4;

2) Невозможность корректного расчета при эксплуатации реактора средней и максимальной поврежденности оболочек твэлов каждой ТВС, на основе существующего подхода к обоснованию безопасности твэлов, приводит к тому, что невозможно реализовать алгоритм управления свойствами твэлов с учетом поврежденности оболочек.

В изданной в 1988 г. монографии [18] отмечено: “Герметичность теплообменников элементов методом радиохимического анализа проб воды 1-го контура проверяют эпизодически, хотя такой анализ можно автоматизировать. **В процессе же эксплуатации реактора необходим непрерывный контроль за состоянием активной зоны, позволяющий анализировать условия, при которых твэлы разгерметизируются.** Желательно также хотя бы ориентировочно определить районы активной зоны с негерметичными твэлами. **В некоторой степени** этим требованиям удовлетворяет петлевая система КГО...”.

Через 25 лет после того, как были написаны процитированные слова, можно констатировать, что на действующих РУ с ВВЭР-1000 НАЭЖ “Энергоатом” нет технических средств и не предусмотрено процедур для ведения статистики локализации разрушенного твэла в ТВС, локализации аксиального сегмента

оболочки твэла, в котором произошла разгерметизация, а также для учета последовательности перестановок ТВС, содержащих разрушенные твэлы.

3) Предельные значения критериев приемки составлены с максимальной степенью консерватизма и получаемое консервативное сочетание параметров эксплуатации РУ, для которого обосновывается безопасность эксплуатации твэлов, имеет близкую к нулю вероятность реализации, что делает невозможным сформулировать критерий эффективности управления свойствами твэлов в зависимости от реальных условий их эксплуатации;

4) Необоснованно сужается область допустимых параметров и уменьшается экономическая эффективность эксплуатации РУ, что не позволяет сформулировать критерий эффективности управления свойствами твэлов на основе баланса требований безопасности и экономичности эксплуатации твэлов. Тем самым, действующий подход к обоснованию безопасности твэлов ВВЭР препятствует эволюционному развитию РУ в направлении повышения энергонапряженности АКЗ, длительности кампании и глубины выгорания топлива.

Отсутствие теоретических и технологических основ эксплуатации твэлов ВВЭР, с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности их оболочек, делает невозможным управление свойствами твэлов для повышения безопасности их эксплуатации, при соблюдении требований экономичности. Разработка теоретических и технологических основ эффективной эксплуатации твэлов ВВЭР, путем управления свойствами твэлов с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности их оболочек, позволит расширить границы и повысить экономичность эксплуатации РУ с одновременным повышением ее безопасности, разработать регламент и автоматизированный программно-технический комплекс управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации РУ, с учетом баланса безопасности и экономичности эксплуатации твэлов.

Основной причиной отсутствия теоретических и технологических основ управления свойствами твэлов является невозможность учета поврежденности оболочек твэла из-за высокой неопределенности оценки поврежденности по

критерию SC4, вытекающей из неучета основного физического процесса накопления поврежденности при нормальных условиях, а также неучета последовательности совокупностей параметров эксплуатации твэла.

Для разработки теоретических и технологических основ эксплуатации твэлов ВВЭР с учетом поврежденности их оболочек, для повышения безопасности эксплуатации твэлов путем управления их свойствами, при соблюдении требований экономической эффективности, необходимо разработать модель изменения свойств твэла, учитывающую основной процесс накопления поврежденности его оболочки и последовательность совокупностей параметров, определяющих поврежденность в нормальных условиях.

На основе модели изменения свойств твэла необходимо разработать метод расчета поврежденности оболочки твэла в нормальных условиях эксплуатации, с учетом основного процесса накопления поврежденности и определяющих ее параметров. Чтобы метод расчета поврежденности оболочки твэла был пригоден для любых режимов нормальной эксплуатации ВВЭР, он должен быть основан на использовании модели изменения свойств твэла, основными чертами которой являются [1, 9, 10, 14–16]:

- учет влияния последовательности всего комплекса условий эксплуатации твэла на поврежденность его оболочки;
- учет основного физического механизма накопления поврежденности в материале оболочки при частоте переменного нагружения $\ll 1$ Гц, характерной для реальных режимов эксплуатации ВВЭР;
- использование метода конечных элементов (МКЭ) для расчета развития напряжений и деформаций в оболочке;
- рассмотрение уравнения деформации оболочки для случая многоосного напряженного состояния, с учетом радиационных явлений;
- учет изменения толщины окисного слоя на внешней поверхности оболочки и влияния этого изменения на механические свойства оболочки;
- учет реальных конструктивных и режимных параметров реактора, размещения органов СУЗ в АКЗ, распределения физических параметров в АКЗ,

перестановок ТВС в АКЗ;

– учет взаимосвязи проблем поврежденности оболочки твэла и стабильности аксиального офсета при маневрировании мощностью РУ;

– учет влияния неопределенности в знании комплекса условий эксплуатации оболочки на оценку долговечности оболочки.

Для учета баланса требований по безопасности и экономичности эксплуатации твэлов необходимо разработать модель эффективности управления свойствами твэлов.

Необходимо разработать методы управления свойствами твэлов путем управления конструкционными параметрами твэла и температурным режимом теплоносителя, учитывающие поврежденность оболочек твэлов, баланс безопасности и экономичности эксплуатации твэлов.

Для учета неопределенности в знании параметров эксплуатации твэла необходимо разработать робастную вероятностную модель.

Необходимо разработать метод управления свойствами твэлов путем управления перестановками ТВС, учитывающий поврежденность оболочек твэлов, баланс безопасности и экономичности эксплуатации твэлов.

Необходимо предложить алгоритм совместного использования различных методов управления свойствами твэлов в едином комплексном методе, который может быть положен в основу автоматизированного программно-технического комплекса, управляющего свойствами твэлов как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации ВВЭР.

1.7. Выводы по первой главе

На основе выполненного анализа предпосылок управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации ВВЭР можно сделать выводы:

1. Существует запрос практики, состоящий в необходимости повышения безопасности и надежности нормальной эксплуатации твэлов ВВЭР при одновременном повышении экономичности эксплуатации. Главным фактором,

ограничивающим повышением экономических показателей эффективности эксплуатации ВВЭР, является целостность оболочек твэлов.

2. С учетом существующей тенденции внедрения проектных и эксплуатационных мероприятий, обеспечивающих постепенное снижение удельного веса таких факторов разгерметизации оболочек, как МВТО при низких глубинах выгорания ядерного топлива и КРН, а также коррозия оболочек в области глубоких выгораний, основным фактором разгерметизации оболочек твэлов в нормальных условиях эксплуатации ВВЭР является изменение термомеханического состояния твэлов, приводящее к накоплению поврежденности оболочек, вызванной комбинацией многократных циклических и долговременных стационарных нагрузок.

3. Для повышения безопасности эксплуатации твэлов ВВЭР необходимо усовершенствовать нормативные требования к долговечности оболочек твэлов, поскольку в ОПБ и ПБЯ не сказано, каким образом можно и следует влиять на изменение термомеханического состояния твэлов, определяющего их поврежденность при нормальных условиях эксплуатации.

4. Хотя в ПБЯ есть нормативное ограничение количества твэлов в АКЗ ВВЭР-1000, имеющих дефект типа газовой неплотности, на уровне 0,1 %, в настоящее время нет методики расчета в режиме реального времени поврежденности оболочек твэлов, накопленной в процессе их нормальной эксплуатации.

5. На действующих реакторах с ВВЭР-1000 НАЭК “Энергоатом” нет технических средств и не предусмотрено процедур для локализации в ТВС разрушенного твэла, локализации аксиального сегмента оболочки твэла, в котором произошла разгерметизация, а также для учета последовательности перестановок ТВС, содержащих разгерметизированные твэлы. На АЭС не ведется статистики разрушений оболочек твэлов, учитывающей локализацию области разгерметизации оболочки по высоте твэла и последовательность перестановок ТВС, содержащих разрушенные твэлы.

6. Существующий подход к оценке поврежденности оболочки твэла на основе критерия SC4 имеет такие недостатки, как

– несоответствие между экспериментальными условиями, при которых получены ограничивающие члены для компонентов поврежденности, и реальными условиями эксплуатации оболочки;

– не учитывается удельный вклад процессов ползучести и усталости как физических механизмов накопления поврежденности в оболочке твэла при частоте переменного нагружения реактора $\nu \ll 1$ Гц;

– в открытых источниках нет обоснования использования при построении SC4 принципа аддитивности с равными весовыми коэффициентами для компонентов поврежденности оболочки твэла вследствие действия процессов ползучести и усталости при $\nu \ll 1$ Гц;

– в открытых источниках нет обоснования справедливости принципа неучета при расчете поврежденности оболочки твэла последовательности совокупностей параметров эксплуатации оболочки, что при нелинейном характере зависимости деформации ползучести от времени вносит значительную неопределенность в оценку поврежденности по SC4;

– ограничивающие члены для компонентов поврежденности зависят от совокупности параметров эксплуатации твэла, что требует определения новых значений ограничивающих членов для любой новой совокупности параметров эксплуатации твэла;

– значений ограничивающих членов для компонентов поврежденности, в зависимости от совокупности условий эксплуатации твэла, нет в открытых источниках;

– неопределенность оценки поврежденности оболочки твэла по критерию SC4 вынуждает принимать коэффициент запаса $K=10$, на порядок превышающий коэффициент запаса для других критериев приемки твэла, что делает невозможным практическое использование SC4 при управлении свойствами твэлов путем расчета в режиме реального времени поврежденности их оболочек, накопленной в нормальных условиях эксплуатации твэлов;

7. Недостатки существующей системы обеспечения безопасности эксплуатации твэлов РУ с ВВЭР-1000 являются следствием действующей практики

проектирования твэлов, согласно которой неопределенность оценки поврежденности оболочки твэла по прочностному критерию SC4 компенсируется проверкой выполнения критериев приемки твэлов, разбитых на группы деформационных, прочностных, теплофизических и коррозионных критериев, с использованием самых консервативных оценок и построением лимитирующих зависимостей для критериев. Поскольку предельные значения критериев приемки твэлов сами составлены с максимальной степенью консервативности, такое консервативное сочетание параметров не позволяет реализовать алгоритм управления ресурсом твэлов на АЭС с реакторами типа ВВЭР, ввиду невозможности определять условия разрушения оболочки твэла в зависимости от комплекса реальных условий эксплуатации оболочки.

8. Необходимо разработать новый подход к обеспечению эффективной эксплуатации твэлов, основанный на управлении свойствами твэлов, который подразумевает учет в режиме реального времени накопленной в нормальных условиях поврежденности оболочек твэлов, а также баланс требований безопасности и экономичности эксплуатации твэлов. Проблема разработки теоретических и технологических основ эффективной эксплуатации твэлов ВВЭР на основе управления свойствами твэлов, с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности их оболочек, а также баланса требований безопасности и экономичности эксплуатации, актуальна, поскольку решение этой проблемы позволит не только повысить безопасность и экономичность эксплуатации действующих РУ, но и создать предпосылки для управления свойствами твэлов перспективных РУ.

9. Для преодоления недостатков подхода к оценке поврежденности оболочки твэла на основе прочностного критерия SC4 необходимо синтезировать модель изменения свойств твэла в нормальных условиях эксплуатации РУ, которая позволяла бы учитывать реальные условия эксплуатации оболочки, а также основной физический механизм накопления поврежденности материала оболочки при частотах нагружения, характерных для переменного режима эксплуатации реактора ($\ll 1$ Гц).

10. Основными чертами модели изменения свойств твэла в нормальных условиях эксплуатации РУ должны стать: детальное описание изменения свойств твэла включая учет аксиального распределения поврежденности оболочки; использование уточненных экспериментальных результатов по термомеханическим эффектам в оболочке твэла; учет взаимосвязанного проявления нейтронно-физических, теплофизических, физико-химических, термомеханических и теплогидравлических процессов; недопустимость необоснованно высокой консервативности результатов; возможность ограничения количества твэлов в АЗ, герметичность которых может быть нарушена; учет неопределённости в численном анализе; возможность разработки алгоритма управления свойствами твэлов.

В результате анализа предпосылок управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации ВВЭР можно сделать вывод, что проблема разработки теоретических и технологических основ эффективной эксплуатации твэлов, с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности их оболочек, имеет комплексный характер и требует решения ряда задач.

Первой задачей является разработка модели изменения свойств твэла ВВЭР, в которой будут учтены основной механизм накопления поврежденности в оболочке при $\nu \ll 1$ Гц, все параметры ее нормальной эксплуатации, а также преодолены недостатки подхода к оценке поврежденности на основе SC4.

Глава 2.

ЭВТП-модель изменения свойств твэла

2.1. Структура модели изменения свойств твэла

Для обеспечения соответствия между модельными и реальными условиями эксплуатации твэла, снижения неопределенности оценки условий разрушения его оболочки в нормальных условиях эксплуатации РУ, необходимо разработать модель изменения свойств твэла, учитывающую основной процесс накопления $\omega(\tau)$ и параметры, определяющие $\omega(\tau)$ (рис. 2.1).

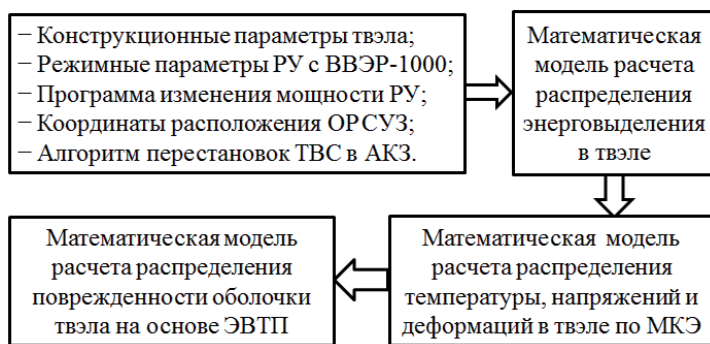


Рис. 2.1. Структура модели изменения свойств твэла

В модели изменения свойств твэла необходимо:

- учесть конструкционные параметры твэла и РУ для конкретного легководного реактора;
- использовать адекватный метод решения системы уравнений, описывающих теплопередачу и МВТО;
- учесть изменение деформации и поврежденности оболочки твэла;
- учесть изменение глубины выгорания ядерного топлива;
- использовать теорию, учитывающую основной процесс накопления $\omega(\tau)$;
- учесть влияние изменения мощности РУ, размещения и вертикального перемещения ОР СУЗ, перестановок ТВС на $\omega(\tau)$.

2.2. Конструкционные параметры твэла и РУ

Рассматривалась РУ с реактором ВВЭР-1000 проекта В-320. Для сравнительного анализа выбраны УТВС (серийная ТВС ВВЭР-1000 проекта В-320), ТВС-А производства ОКБМ им. И.И. Африкантова и ТВС-W корпорации "Westinghouse". Различающиеся и одинаковые конструктивные характеристики твэлов указанных типов ТВС, задаваемые в качестве исходных данных при сравнительном анализе долговечности оболочки твэла различных топливных загрузок ВВЭР-1000, приведены в табл. 2.1 и 2.2, соответственно [19, 23].

Таблица 2.1

**Различающиеся конструктивные характеристики
УТВС, ТВС-А и ТВС-W**

Параметр	УТВС	ТВС-А	ТВС-W
Наружный диаметр оболочки, см	0,91	0,91	0,914
Внутренний диаметр оболочки, см	0,773	0,773	0,8
Толщина оболочки, см	0,069	0,069	0,057
Диаметр топливной таблетки, см	0,757	0,757	0,784
Диаметр центрального отверстия таблетки, см	0,24	0,14	—
Зазор между таблеткой и оболочкой, см	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
Впадины у таблетки	—	—	на каждой стороне таблетки
Диаметр впадины, см	—	—	0,62
Глубина впадины, см	—	—	0,02
Эквивалентный диаметр проточного канала, см	1,06	1,06	1,05
Общий вес столба топлива в твэле, кг	1,385	1,487	1,554

В табл. 2.3 приведены режимные характеристики ВВЭР-1000, принятые в качестве исходных данных при сравнительном анализе долговечности оболочки твэла для различных типов ТВС [19].

Таблица 2.2

Одинаковые конструктивные характеристики УТВС, ТВС-А и ТВС-В

Высота таблетки, см	1,18
Шаг твэлов, см	1,275
Начальное содержание гелия в смеси под оболочкой, %	100
Начальная толщина окисной пленки, мк	0,1
Максимальное расстояние между краями смежных таблеток, мк	20
Разница между температурами газа верхнего КО и теплоносителя, °С	25
Начальное давление гелия под оболочкой, МПа	2,0
Материал топливной таблетки	UO ₂
Плотность UO ₂ , г/см ³	10,4
Материал оболочки	циркалой-4 SR
Количество АС	10
Длина АС, см	35,4
Начальный размер зерна таблетки, мк	10
Обогащение по U-235 (без учета бланкетов с пониженным обогащением в ТВС-В)	0,044
Величина верхнего КО, см ³	0,21
Величина нижнего КО, см ³	0
Форма расположения твэлов в ТВС	Равномерная треугольная

2.3. Моделирование изменения мощности РУ

Эксплуатация твэла характеризуется длительным воздействием высоких уровней температурно-силового нагружения, обуславливающих развитие неконтролируемых процессов ползучести конструкционного материала оболочки твэла, которые в определенный момент времени приводят к ее разрушению с выходом ПД в контур в количествах, превышающих как эксплуатационные пределы, так и пределы безопасной эксплуатации. С учетом повысившегося интереса к работе ядерных энергоблоков Украины в режиме переменных нагрузок, необходимо учитывать возможность многократных циклических изменений мощности РУ.

Принятые режимные характеристики РУ ВВЭР-1000

Характеристика	Значение
Закон распределения нейтронного потока по длине твэла	$\Phi(z) = \cos\left[\frac{\pi}{H_3}\left(z - \frac{H}{2}\right)\right] (0 \leq z \leq H)$, где $H_3 = H + 20$, см; H – длина твэла
Закон распределения линейного удельного энерговыделения по длине твэла, Вт/см	$q(z) = q_{l,\max} \cdot \Phi(z)$, $q_{l,\max} = 248$ Вт/см
Коэффициенты относительной мощности для 10 АС	0,231 0,506 0,736 0,902 0,989 0,989 0,902 0,736 0,506 0,231
Температура теплоносителя на входе в реактор, °С:	290
Давление теплоносителя на входе в реактор, МПа	15,84
Средняя плотность потока быстрых нейтронов при $N = N_{\text{ном}} = 100$ %, $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$	$1 \cdot 10^{14}$
Скорость теплоносителя, омывающего твэл, м/с	5,64

Поскольку некорректно при оценке времени целостности оболочки переносить экспериментальные данные по ползучести материала оболочки в условиях стационарных режимов на оболочку твэла, работающего в переменном режиме, в модели изменения свойств твэла необходимо учитывать программу изменения мощности РУ. Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) РУ в течение времени T определяется как

$$\text{КИУМ} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\tau_i \cdot N_i)}{T \cdot N_{\text{ном}}}, \quad (2.1)$$

где $\Delta\tau_i$ – время эксплуатации РУ на мощности N_i ; T – суммарное время эксплуатации РУ; $N_{\text{ном}}$ – установленная мощность РУ (100 %).

Рассмотрим в качестве примера четыре режима нагружения РУ:

1) Стационарная эксплуатация РУ при $N = N_{\text{ном}}$, КИУМ=1.

2) $N = N_{\text{ном}}$ в течение 5 суток \rightarrow в течение 1 ч РУ переводится на уровень $N = 50$ % $N_{\text{ном}} \rightarrow N = 50$ % в течение 46 ч \rightarrow в течение 1 ч РУ переводится на

уровень $N = N_{\text{ном}}$. Такой режим эксплуатации РУ – недельный цикл нагружения (5 сут – 100 %, 46 ч – 50 %), КИУМ = 0,860 (рис. 2.2).

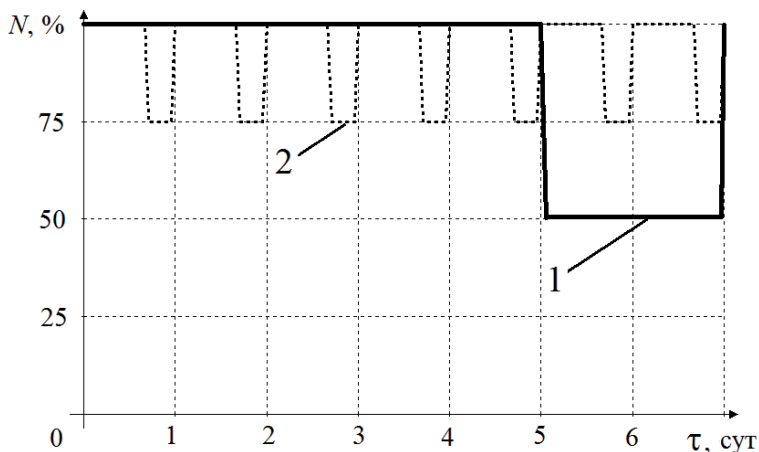


Рис. 2.2. 1, 2 – недельный цикл (5 сут – 100 %, 46 ч – 50 %) и суточный цикл (16 ч – 100 %, 6 ч – 75 %) нагружения, соответственно

3) $N=N_{\text{ном}}$ в течение 16 ч → в течение 1 ч РУ переводится на уровень $N = 75 \% N_{\text{ном}} \rightarrow N = 75 \%$ в течение 6 ч → в течение 1 ч РУ переводится на уровень $N=N_{\text{ном}}$. Такой режим эксплуатации РУ – суточный цикл (16 ч – 100 %, 6 ч – 75 %), КИУМ = 0,927 (рис. 2.2).

4) В будние дни недели – эксплуатация РУ по суточному циклу (16 ч – 100 %; 6 ч – 75 %) → в течение последнего часа каждых 5-х суток недели N снижается до $50 \% N_{\text{ном}} \rightarrow N = 50 \%$ в течение 47 ч → в течение последнего часа каждых 7-х суток N растет до $N_{\text{ном}}$. Такой режим – комбинированный цикл нагружения (5 сут – 100 % + 75 %; 2 сут – 50 %), КИУМ = 0,805.

2.4. Моделирование распределения энерговыделения в твэле

Модель расчета, на основе двухгруппового диффузионного приближения, распределения энерговыделения в твэле в качестве входных данных использует конструкционные параметры твэла, режимные параметры РУ с ВВЭР-1000,

характеристики программы изменения мощности РУ и координаты расположения ОР СУЗ, а выходными данными являются значения линейной мощности в условно выделенных аксиальных слоях ТВС, расположенных в пронумерованных ячейках АКЗ. Условно разделив высоту твэла на $m=16$ аксиальных слоев и обозначив i -й (от низа АКЗ) аксиальный слой ячейки j как расчетную ячейку (i, j) , рассчитывалась относительная мощность $k_{v,i,j}$ расчетной ячейки (i, j)

$$k_{v,i,j} = Q_{i,j} / \langle Q_{\text{сл}} \rangle, \quad (2.2)$$

где $Q_{i,j}$ – тепловая мощность ячейки (i, j) , МВт; $\langle Q_{\text{сл}} \rangle = \langle Q_{\text{ТВС}} \rangle / m$ – средняя мощность аксиального слоя; $\langle Q_{\text{ТВС}} \rangle$ – средняя по АКЗ мощность ТВС.

Полагая, что в АКЗ 163 ТВС и $N_{\text{ном}}=3000$ МВт, $\langle Q_{\text{ТВС}} \rangle=18,405$ и 14,724 МВт при $N=100$ и 80 % $N_{\text{ном}}$, соответственно. Тогда $\langle Q_{\text{сл}} \rangle=1,15$ и 0,92 МВт при $N=100$ и 80 % $N_{\text{ном}}$, соответственно.

Рассчитав $k_{v,i,j}$, находилась средняя линейная мощность $\langle q_{l,i,j} \rangle$

$$\langle q_{l,i,j} \rangle = k_{v,i,j} \cdot \langle q_l \rangle, \quad (2.3)$$

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

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

$\langle q_{l,i,j} \rangle$ представлялась в виде

$$\langle q_{l,i,j} \rangle = q_{l,j,\text{max}} \cdot k_{i,j}, \quad (2.4)$$

где $q_{l,j,\text{max}}$ – максимальная линейная мощность в ячейке АКЗ j ; $k_{i,j}$ – коэффициент относительной мощности ячейки (i, j) ; Линейная мощность q_l в центральной точке ячейки (i, j) задавалась равной $\langle q_{l,i,j} \rangle$, значения q_l в других точках задавались путем линейной интерполяции $\langle q_{l,i,j} \rangle$.

2.5. Моделирование размещения ОР регулирующей группы СУЗ

Усовершенствованный алгоритм (У-алгоритм) управления мощностью АКЗ

ВВЭР-1000 обеспечивает наиболее стабильный АО [20]. Ячейки АКЗ, в которых при У-алгоритме размещены ОР регулирующей (10-й) группы СУЗ, и границы сектора симметрии (1/6 АКЗ) обозначены на рис. 2.3 толстыми линиями.

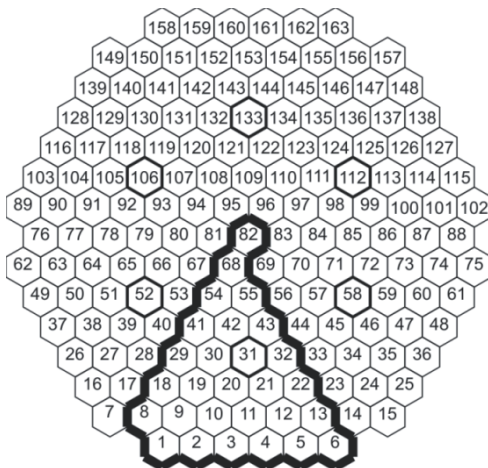


Рис. 2.3. Размещение ОР СУЗ 10-й группы при У-алгоритме: (число) номер ячейки АКЗ (360° симметрия)

2.6. Принципы термомеханического анализа свойств твэла

Использование МКЭ при расчете изменения напряжений и деформаций в оболочке позволяет учесть влияние переменных режимов на состояние твэла во всех режимах нормальной эксплуатации РУ до выгорания более 50 МВт·сут/кг, с учетом заданной последовательности изменений мощности и режимных параметров РУ, поэтому анализ развития напряженно-деформированного состояния в твэле выполнялся путем совместного решения уравнений теплопроводности и деформации по МКЭ, где четырехугольный элемент имеет 4 степени свободы. Применение МКЭ позволяет избежать такого недостатка метода конечных разностей (МКР), как пренебрежение механическим взаимодействием между соседними кольцевыми элементами. Вследствие этого, в переходных режимах с помощью МКР не удастся точно предсказать термическое напряже-

ние внутри таблетки и силу МВТО, что приводит к неопределенности в предсказании поведения твэла [9].

Использовалась двумерная осесимметричная модель твэла, в которой длина твэла условно делилась на 8 АС (длина АС принималась равной длине 2 аксиальных слоев), каждый АС делился в радиальном направлении на концентрические кольцевые элементы. Количество радиальных ячеек таблетки и оболочки задавалось как 10 и 4, соответственно. Две внутренние ячейки оболочки – металлическая фаза, а две внешние – слой окиси циркония ZrO_2 . Относительное приращение объема оболочки в результате коррозии определялось с учетом коэффициента Пайлинга-Бедворта. Для металлической фазы и окисной пленки учитывалось различие модуля Юнга, коэффициента термического расширения, скорости ползучести и скорости роста под действием облучения. Ползучестью в окисном слое ZrO_2 пренебрегалось, а скорость роста под действием облучения для окиси задавалась равной той же величине для циркалоя, умноженной на некоторый коэффициент.

Согласно МКЭ находились матрицы деформация-перемещение [В] и напряжение-деформация [С]. Элементы матриц [В] и [С], а также методика неявного решения уравнений ползучести и пластичности приведены в монографии [9].

2.7. Входные и выходные данные модели расчета деформаций

Модель расчета распределения температуры, напряжений и деформаций в твэле по МКЭ в качестве входных данных использует:

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

Выходными данными являются температура, напряжения и деформации в АС твэла.

2.8. Модель определения энтальпии теплоносителя

Для энтальпии теплоносителя j -го сегмента i_j в момент $t_0 + \Delta t$ использовалось следующее выражение [9]:

$$i_j(t_0 + \Delta t) = i_0(t_0) + \sum_{i=k}^j v_i \cdot q_{l,i} \cdot \delta t_i / S_i, \quad (2.5)$$

где элементарно малый объем теплоносителя движется от z_0 к z ; z_0 – аксиальная координата в момент t_0 объема теплоносителя, находившегося в z в момент $t_0 + \Delta t$; координата z поставлена в соответствие j -му сегменту, а z_0 – k -му сегменту; $\Delta t = \delta t_k + \delta t_{k+1} + \dots + \delta t_{j-1} + \delta t_j$; δt_i – время, за которое теплоноситель, находящийся в момент $t_0 + \Delta t$ в координате z , проходит через i -й сегмент; v_i , $q_{l,i}$, S_i – средние значения удельного объема теплоносителя, линейной мощности и площади поперечного сечения проточного канала для i -го сегмента, соответственно; $\delta t_i = S_i \cdot \Delta L_i / (G \cdot v_i)$, ΔL_i – длина i -го сегмента; G – массовый расход, кг/с; $i_0(t_0) = i_k(t_0) + [i_{k+1}(t_0) - i_k(t_0)](z_0 - z_k) / (z_{k+1} - z_k)$.

Для вычисления коэффициента теплоотдачи на поверхности оболочки использовались эмпирические соотношения модели, приведенной в монографии [9].

2.9. Принципы расчета температуры в твэле

Допущения расчета распределения температуры в твэле [9]:

1) Распределение температуры в твэле определялось с учетом внутреннего тепловыделения, изменений в теплопроводности таблетки и зазора, изменений в теплообмене между поверхностью и теплоносителем. При анализе градиента температуры в АС твэла использовалось одномерное уравнение теплопроводности, записанное для радиальной координаты r , теплопроводностью в осевом направлении пренебрегалось.

2) Массовая скорость и давление потока на каждом временном шаге при-

нимались постоянными.

3) Учитывалась зависимость термических свойств топлива в каждой расчетной ячейке от температуры.

Коэффициент теплопередачи k определялся принимая температуру теплоносителя в качестве граничного условия (ГУ), далее рассчитывалась температура поверхности оболочки. Распределение температуры от поверхности оболочки до центра таблетки рассчитывалось используя в качестве ГУ температуру поверхности. Используя ГУ для поверхности оболочки, уравнение теплопроводности для j -го АС и соответствующей области зазора решалось неявным методом путем преобразования в разностные аппроксимационные соотношения. После расчета распределения температуры в твэле рассчитывались испускание газообразных продуктов деления (ПД), поток газа в зазоре в осевом направлении, а также их обратное влияние на теплопроводность зазора. При расчете давления газа под оболочкой принимались допущения, что газ в твэле ведет себя как идеальный газ и давление в твэле распределено равномерно [9]. Для определения коэффициента теплопроводности смешанного газа, находящегося в зазоре между таблеткой и оболочкой, использовались выражения модели MATPRO-09 [21].

2.10. Принципы анализа МВТО

При анализе МВТО принимался следующий порядок расчета [9]:

1) Рассчитывалась деформация таблетки, вызванная термическим расширением, уплотнением, распуханием и релокацией, и записывалось уравнение жесткости для таблетки и оболочки с учетом растрескивания, эластичности/пластичности и ползучести таблетки;

2) Рассчитывалось распределение напряжений и деформаций путем решения уравнения жесткости с ГУ, соответствующими режиму контакта между таблеткой и оболочкой. Поскольку распределения температуры и деформации физически влияют друг на друга, уравнения теплопроводности и механической

деформации компонентов твэла решались совместно путем организации расчетного цикла сходимости.

3) Если происходило МВТО и менялся режим контакта между таблеткой и оболочкой, то начиная с момента изменения режима контакта выполнялся новый расчет, с новыми ГУ контакта.

2.11. Соотношение для скорости деформации ползучести оболочки

В открытой литературе нет эмпирических соотношений для расчета, с учетом радиационных эффектов, скорости эквивалентной (двухосевой) деформации ползучести \dot{p}_e в оболочке из сплава Э-110, пригодных во всех диапазонах изменения эксплуатационных параметров ВВЭР-1000.

Вместе с тем, в открытой литературе приводятся соответствующие данные модели MATPRO-A для циркониевого сплава циркалой-4 [22]. По сравнению со сплавом Э-110, циркалой-4 обладает в условиях АКЗ РУ с ВВЭР-1000 худшими деформационными и коррозионными свойствами [23]. Исходя из перечисленных факторов, выбраны выражения MATPRO-A [22], учитывающие многоосное напряженное состояние оболочки и радиационные эффекты, применимые во всех диапазонах изменения эксплуатационных параметров ВВЭР-1000 и обеспечивающие консервативность оценки долговечности оболочки, изготовленной из циркониевого сплава Э-110 [23]. Эмпирическое соотношение MATPRO-A для скорости эквивалентной деформации ползучести оболочки \dot{p}_e (с^{-1}) после исключения времени имеет вид:

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

где $K = 5,129 \cdot 10^{-29}$; $B = 7,252 \cdot 10^2$; $C = 4,967 \cdot 10^{-8}$ (размерность K, B, C опущена); Φ – плотность потока быстрых ($E > 1$ МэВ) нейтронов, $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; σ_e – эквивалентное напряжение, Па; R – газовая постоянная; T – температура оболочки, К.

Эквивалентное напряжение σ_e выражалось через тангенциальную σ_θ и аксиальную σ_z компоненты на основе модели тонких цилиндрических оболочек,

при допущении изотропности материала оболочки и неучете напряжения сдвига, следующим образом:

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

где σ_θ , σ_z – напряжение в направлениях θ и z , соответственно.

Тангенциальная и аксиальная компоненты напряжения в оболочке представлялись на основе модели тонких цилиндрических оболочек в виде функций от контактного давления между таблеткой и оболочкой $P_{\text{кон}}$, внутреннего и внешнего диаметра оболочки, внутреннего давления газа под оболочкой и давления охлаждающей воды. Методика расчета $P_{\text{кон}}$ подробно описана в монографии [9].

2.12. Соотношение для скорости коррозии оболочки

В открытой литературе не приводятся соотношения, пригодные во всех возможных диапазонах изменения эксплуатационных параметров ВВЭР-1000, для расчета изменения со временем толщины окисного слоя на внешней поверхности оболочки, изготовленной из сплава Э-110. Исходя из этого, для моделирования изменения со временем толщины окисного слоя на внешней поверхности оболочки выбрано соотношение модели MATPRO-A, согласно которому толщина окисного слоя $S_{\text{ок}}$ (м) до перехода от пузырькового кипения к пленочному находится так [22]:

$$S_{\text{ок}} = (4,976 \cdot 10^3 \cdot A \cdot t \cdot \exp(-15660/T) + S_o^3)^{1/3} \cdot (1 + k_{\text{cor}}), \quad (2.8)$$

где t – время, сут; T – температура на поверхности контакта окиси и металла, К; $A = 1,5$ (для реактора типа ВВЭР); k_{cor} – корректирующий параметр модели.

2.13. Замыкающие соотношения модели расчета температуры

В качестве замыкающих соотношений модели расчета распределения температуры, напряжений и деформаций в твэле использованы соотношения

следующих моделей [9]:

- МВТО;
- миграции трещин в топливной таблетке;
- восстановления жесткости треснувшей таблетки;
- контактного давления между таблеткой и оболочкой;
- генерации и испускания газообразных ПД в таблетке;
- ослабления термических напряжений в таблетке;
- испускания газообразных ПД из периферийной зоны таблетки;
- диффузии и течения газа в зазоре между таблеткой и оболочкой;
- расчета давления газа под оболочкой.

2.14. Модель перестановок ТВС

При моделировании перестановок ТВС в АКЗ рассматривался сегмент АКЗ, содержащий 1/6 всех ТВС (без учета центральной), а также 1/6 всех ОР, используемых при маневрировании N (см. рис. 2.3). В соответствии с определяемым на начало каждой кампании распределением долгоживущих и стабильных ПД, вызывающих шлакование АКЗ, находилось распределение ТВС в сегменте АКЗ по годам кампании. В выделенном сегменте АКЗ присутствует максимум 7 ТВС каждого года кампании. Обозначив числом номер ячейки АКЗ, а римской цифрой I, II, III и IV – 1, 2, 3 и 4-й год кампании, соответственно, найдено распределение ТВС каждого года по ячейкам (рис. 2.4).

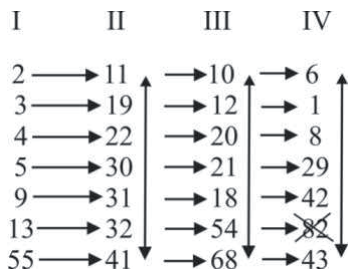


Рис. 2.4. Схема распределения ТВС по ячейкам АКЗ

Принято, что в начале каждой кампании ТВС 1-го, 2-го, 3-го и 4-го года размещены в ячейках выделенного сегмента АКЗ в соответствии с показанным на рис. 2.4 распределением, рассчитанным по имеющейся в ОЯБ энергоблоков с ВВЭР-1000 штатной программе оптимизации размещения ТВС в ячейках АКЗ на основе минимизации коэффициента радиальной неравномерности энерговыделения [18, 24, 25].

В результате анализа подходов к перестановкам ТВС в пределах сегмента АКЗ выявлено, что только в одном из имеющихся шести сегментов для ТВС каждого года выделяется по 7 ячеек, а в остальных пяти сегментах для ТВС 1-го, 2-го и 3-го года выделяется по 7 ячеек, тогда как для ТВС 4-го года выделяется 6 ячеек [26]. При этом применяются два основных подхода:

- 1) в центральной ячейке 82 размещается ТВС 4-го года;
- 2) в ячейке 82 размещается ТВС 1-го либо 2-го года.

Последний подход обеспечивает оптимальное использование топлива при обеспечении необходимой длительности кампании, поэтому наиболее характерным вариантом перестановок ТВС в сегменте АКЗ является случай, когда ячейка 82 не рассматривается при моделировании перестановок ТВС в пределах сегмента АКЗ, и для ТВС каждого года выделяется по 7 ячеек, за исключением ТВС 4-го года, для которых выделяется 6 ячеек (рис. 2.4).

2.15. Основной процесс накопления поврежденности оболочки

Развитие деформированного состояния в тонкой оболочке твэла вплоть до ее разрушения при термомеханических условиях, близких к нормальным эксплуатационным условиям АКЗ ВВЭР, моделировалось в экспериментах [12]. Исследовалась циклически нагружаемая тонкая оболочка из сплава циркалой-4 SR. Давление пилообразного профиля прикладывалось к оболочке с разными частотами нагружения ν , максимальное и минимальное тангенциальное напряжение σ_{θ} в оболочке – 310...470 и 78 МПа, соответственно. Используя диа-

грамму зависимости σ_{θ}^{\max} от n_i^{\lim} , а также анализируя структуру металла и наличие бороздок усталости на поверхности разрушения, обнаружено, что при $\nu \ll 1$ Гц основным механизмом деформации тонкой оболочки является ползучесть, тогда как усталостная составляющая деформации пренебрежимо мала [12].

Методология экспериментов [27], проводившихся с оболочками из разных сплавов, включая титановые, отличалась от методологии [12] (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Сопоставление методологии проведения экспериментов [27] и [12]

Условия	[27]	[12]
Температура оболочки, °С	400...500	350
Внешний диаметр оболочки, мм	20	9,5
Толщина оболочки, мм	1	0,57
Частота нагружения	переменная	переменная
Профиль давления	ступенчатый	пилообразный
Материал оболочки	различный	циркалой-4
Методы анализа	– анализ $\sigma_{\theta}^{\max} (n_i^{\lim})$; – контроль деформаций; – ЭВТП.	– анализ $\sigma_{\theta}^{\max} (n_i^{\lim})$; – контроль деформаций; – анализ микроструктуры металла.
Вывод	Зависимости $A(\tau)$ для переменных режимов нагружения тонкой оболочки при $\nu \ll 1$ Гц подобны $A(\tau)$ для стационарного нагружения и характеризуются одной величиной A_0 .	При $\nu \ll 1$ Гц основным механизмом деформации тонкой оболочки является ползучесть, усталостная составляющая деформации пренебрежимо мала.

Основные источники высокой неопределенности оценки $\omega(\tau)$ по критерию SC4, выражающейся в величине $K_{\text{норм}}$, более чем в 5 раз превышающей $K_{\text{норм}}$ для остальных критериев приемки твэла, следующие [10, 16]:

1) Неполнота модели разгерметизации оболочки вследствие пренебрежения зависимостью ограничивающих компонентов SC4 от последовательности совокупностей факторов эксплуатации твэла;

2) Неадекватность модели разгерметизации оболочки вследствие противоречия между основным процессом накопления поврежденности оболочки, заложенным в SC4 (усталость при $\nu \geq 1$ Гц), и характерным для эксплуатации твэла (ползучесть при $\nu \ll 1$ Гц).

Согласно SC4, уже после 2 лет эксплуатации ВВЭР-1000 в маневренном режиме усталостная составляющая деформации превосходит составляющую деформации вследствие ползучести, а после 4 лет – в 4,6 раз превосходит составляющую деформации вследствие ползучести [11].

2.16. Соотношения для описания накопления поврежденности

Метод оценки эксплуатационного ресурса оболочки твэла в нормальных условиях эксплуатации ВВЭР, учитывающий ползучесть как основной физический процесс накопления $\omega(\tau)$, может рассматриваться как развитие метода работы [8]. Энергетический вариант теории ползучести (ЭВП) применялся для оценки момента разрушения оболочки при развитии в ВВЭР-1000 тяжелой аварии с потерей теплоносителя, сопровождаемой высокотемпературной ползучестью и разрушением корпуса реактора. Уравнения механического состояния оболочки записывались в виде [8]:

$$\dot{p}_e = f(k_i, T, \sigma_e, \omega(\tau)), \quad (2.9)$$

$$\dot{\omega}(\tau) = \sigma_e \cdot \dot{p}_e / A_0, \quad (2.10)$$

где \dot{p}_e – скорость эквивалентной деформации ползучести, с^{-1} ; k_i – параметры материала, определяемые опытным путем на основе испытаний микрообразцов, вырезаемых из оболочек вдоль направлений ортотропии; T – абсолютная температура, К; σ_e – эквивалентное напряжение, Па; $\omega(\tau)$ – безразмерный параметр поврежденности материала оболочки; A_0 – удельная энергия рассеяния,

характерная для начала разрушения оболочки и известная для данного материала либо из эксперимента, либо из расчета, Дж/м³.

Для тяжелых аварий с потерей теплоносителя, используя условие разрушения оболочки твэла $\omega = 1$, из системы (2.9)–(2.10) находилась удельная энергия рассеяния A_0 , накопленная к моменту разрушения оболочки и зависящая только от температуры. При этом принимался как экспериментально доказанный факт, что величина A_0 при анализе высокотемпературной ползучести оболочки в аварии с потерей теплоносителя может считаться независимой от предыстории нагружения РУ.

В отличие от метода работы [8], при оценке времени целостности оболочки в нормальных условиях ее нагружения, включая режим переменных нагрузок, необходимо учитывать всю историю нагружения, поскольку развитие напряженно-деформированного состояния в оболочке сильно зависит от последовательности параметров ее нагружения [14–16]. Если не анализировать аварийные режимы, приводящие к пластической деформации оболочки за счет снижения предела текучести при аварийном повышении температуры, для оценки времени целостности оболочки при многократных циклических изменениях мощности РУ с $\nu \ll 1$ Гц достаточно вычислить работу (удельную энергию рассеяния), накопленную в процессе ползучести к моменту разрушения оболочки и затраченную на разрушение.

Развивая метод расчета поврежденности оболочки твэла в тяжелых авариях с потерей теплоносителя [8], в публикации [10] впервые предложено использовать ЭВТП для учета ползучести как основного физического механизма разгерметизации оболочки твэла в нормальных условиях эксплуатации ВВЭР. ЭВТП-критерий разгерметизации оболочки записан в виде [10]:

$$\omega(\tau) = A(\tau) / A_0 = 1; \quad A(\tau) = \int_0^{\tau} \sigma_e \cdot \dot{p}_e \cdot d\tau, \quad (2.11)$$

где $\omega(\tau)$ – поврежденность оболочки; $A(\tau)$, A_0 – удельная энергия рассеяния в момент времени τ и при разрушения оболочки (Дж/м³), соответственно;

$\sigma_e(\tau)$, $\dot{p}_e(\tau)$ – эквивалентное напряжение (Па) и скорость эквивалентной деформации ползучести (c^{-1}), соответственно.

Величина ограничивающего компонента A_0 в критерии разрушения оболочки не зависит от последовательности совокупностей факторов эксплуатации твэла и определяется только свойствами материала оболочки [27].

2.17. Алгоритм расчета поврежденности оболочки

Согласно ЭВТП-модели изменения свойств твэла, развитие деформаций в твэле определяется по МКЭ, а накопление $\omega(\tau)$ – на основе ЭВТП, что обеспечивает:

- учет влияния изменения зазора δ между оболочкой и топливной таблеткой, а также толщины окисного слоя на наружной поверхности оболочки, на термомеханическое состояние оболочки;

- учет ползучести как основного физического процесса накопления $\omega(\tau)$ в нормальных условиях эксплуатации ВВЭР;

- независимость ограничивающего компонента в критерии разгерметизации оболочки от условий эксплуатации оболочки, что снимает проблему несоответствия между условиями, для которых получены ограничивающие компоненты в критерии SC4, и реальными условиями эксплуатации оболочки;

- учет влияния на $\omega(\tau)$ реальной последовательности совокупностей эксплуатационных условий твэла.

Модель расчета распределения энерговыделения в твэле, выполняемого на основе двухгруппового диффузионного приближения, в качестве входных данных использует: конструкционные параметры твэла; режимные параметры ВВЭР-1000; характеристики программы изменения N ; координаты расположения ОР СУЗ. Выходные данные – значения $\langle q_{l,i,j} \rangle$ в условно выделенных аксиальных слоях ТВС (i), расположенных в ячейках АКЗ (j).

Модель расчета распределения температуры, напряжений и деформаций в

твэла по МКЭ в качестве входных данных использует: значения $\langle q_{l,i,j} \rangle$; конструкционные параметры твэла; режимные параметры ВВЭР-1000; характеристики программы изменения N . Выходные данные – температуры, напряжения и деформации в АС твэла (длина одного АС принималась равной длине двух аксиальных слоев).

Модель расчета $\omega(\tau)$ в качестве входных данных использует напряжения и деформации в АС оболочки твэла, а выходными данными являются значения $A(\tau)$ и $\omega(\tau)$ в АС оболочки. На временном шаге Δt_{n+1} эквивалентная деформация ползучести оболочки p_e определяется как

$$p_{e,n+1} = p_{e,n} + \Delta t_{n+1} \cdot \dot{p}_{e,n+1}. \quad (2.12)$$

Для расчета $p_e(\tau)$ и $\sigma_e(\tau)$ выполнялись итерации между расчётами температуры и температурозависимых величин, расчет зазора δ использовался для достижения конвергенции в конце каждого шага по времени (рис. 2.5).

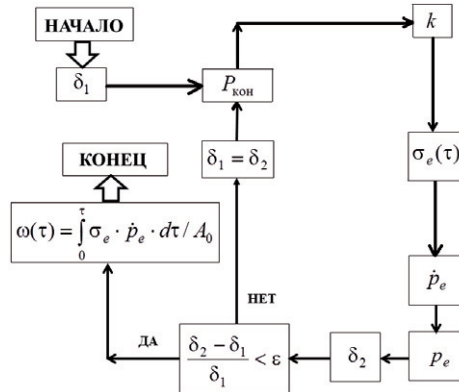


Рис. 2.5. Схема расчета $\omega(\tau)$: $P_{\text{кон}}$ – контактное давление между таблеткой и оболочкой; k – коэффициент теплопроводности зазора

2.18. Выводы по второй главе

1. В модели изменения свойств твэла ВВЭР-1000 для расчета изменения напряженного состояния в оболочке твэла с учетом радиационных эффектов, а также изменения со временем толщины окисного слоя на внешней поверхности

оболочки, целесообразно использовать зависимости модели MATPRO-A для сплава циркалой-4, поскольку они пригодны для всех диапазонов возможных изменений эксплуатационных параметров ВВЭР-1000, доступны через международную базу данных NEA Data Bank стран ОЭСР, и их использование отвечает принципу консервативности.

2. При моделировании накопления $\omega(\tau)$ для произвольной комбинации переменного и стационарного режимов нагружения ВВЭР-1000 целесообразно использовать ЭВТП, поскольку в этом подходе учитывается ползучесть как основной процесс разгерметизации тонкой оболочки твэла в комбинированном режиме нагружения, и ЭВТП экспериментально обоснован для стационарных и переменных режимов нагружения материала.

3. Благодаря тому, что компоненты ЭВТП-критерия разгерметизации оболочки рассчитываются с учетом последовательности совокупностей условий эксплуатации оболочки, а лимитирующая величина, входящая в состав ЭВТП-критерия, не зависит от условий нагружения оболочки и определяется только свойствами материала оболочки, ЭВТП-критерий возможно применять для управления свойствами твэлов.

4. ЭВТП-модель изменения свойств твэла ВВЭР-1000 пригодна для любых режимов нормальной эксплуатации ВВЭР-1000, поскольку

- учитывает влияние на долговечность оболочки последовательности совокупностей условий нормальной эксплуатации твэла, включая конструкционные и режимные параметры, размещение ОР СУЗ в АКЗ, распределение физических параметров в АКЗ ВВЭР-1000, перестановки ТВС в АКЗ;

- учитывает физический процесс накопления $\omega(\tau)$ при частотах переменного нагружения твэла $\nu \ll 1$ Гц, характерных для ВВЭР-1000;

- использует МКЭ для расчета напряжений и деформаций в оболочке твэла;

- учитывает многоосное напряженное состояние и радиационные явления при решении уравнения деформации оболочки;

- учитывает влияние изменения толщины окисного слоя на внешней поверхности оболочки на механические свойства оболочки;

5. Для определения условий разгерметизации оболочки твэла необходимо разработать ЭВП-метод расчета $\omega(\tau)$ и установить основные факторы, определяющие $\omega(\tau)$ в нормальных условиях эксплуатации ВВЭР.

Глава 3.

ЭВТП-метод расчета поврежденности оболочки твэла

3.1. Положения ЭВТП-метода

ЭВТП-метод расчета $\omega(\tau)$ позволяет для нормальных условий эксплуатации твэла ВВЭР учесть основной процесс накопления $\omega(\tau)$ и определяющие поврежденность параметры. Положения ЭВТП-метода [10, 14–16]:

– при управлении свойствами твэла в нормальных условиях эксплуатации ВВЭР влияние на долговечность оболочки таких факторов, как МВТО при малых выгораниях топлива, механическое повреждение оболочки вследствие КРН, коррозия в области глубоких выгораний, пластическая деформация оболочки может быть минимизировано путем оптимизации регламента эксплуатации РУ и технологии производства твэла на основе уже известных методов;

– наиболее существенным для дальнейшего повышения безопасности эксплуатации твэлов путем управления их свойствами является корректное описание процесса разгерметизации оболочки, вызванного комбинацией многократных циклических и долговременных стационарных нагружений;

– для управления свойствами твэлов необходимо контролировать поврежденность оболочек $\omega(\tau)$, накопленную в нормальных условиях эксплуатации РУ и вызванную совместным действием ползучести и усталости;

– поскольку ползучесть определяет процесс деформации оболочки твэла при стационарных и переменных (с частотой циклического нагружения оболочки $\nu \ll 1$ Гц) режимах нормальной эксплуатации, метод расчета условий разгерметизации оболочки должен быть построен на основе учета ползучести как основного процесса деформации оболочки с помощью ЭВТП, согласно которому процессы разрушения и ползучести в оболочке протекают совместно и влияют друг на друга;

– в любой момент времени τ интенсивность разрушения оболочки оцени-

вается через удельную энергию рассеяния $A(\tau)$, накопленную на данный момент в процессе ползучести;

– лимитирующий компонент A_0 критерия разрушения оболочки не зависит от последовательности совокупностей условий нагружения оболочки, в том числе от метода маневрирования мощностью РУ N , последовательности уровней N , размещения регулирующих органов СУЗ в АКЗ, алгоритма перестановок ТВС в АКЗ, и определяется исключительно свойствами материала оболочки;

– A_0 находится как $A(\tau)$, рассчитанная на основе ЭВТП-модели изменения свойств твэла в момент начала разрушения оболочки τ_0 , при выполнении предельного условия для самого внутреннего радиального элемента в анализируемом АС оболочки, являющегося самым напряженным (рис. 3.1):

$$\lim(dA/d\tau)^{-1} \rightarrow 0 \text{ при } \tau \rightarrow \tau_0. \quad (3.1)$$

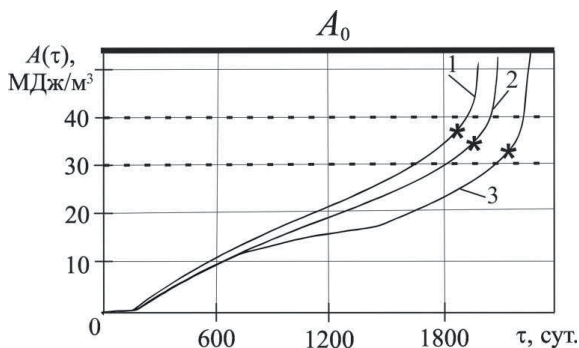


Рис. 3.1. Изменение $A(\tau)$: (1) № 55 ($N=100\%$); (2) № 44 (дневной цикл); (3) № 55-44-10-43-44-44 (дневной цикл); (*) τ_0 по SC2; “№” обозначает номер ячейки АКЗ, в которой размещена ТВС ВВЭР-1000

В результате расчетов $A(\tau)$ по ЭВТП-методу, для различных условий нагружения циркалоевой оболочки твэла ТВС-А в условиях АКЗ ВВЭР-1000, сформулированы следующие выводы [15, 16, 29]:

– расчетные зависимости $A(\tau)$ в оболочке (рис. 3.1) подобны экспериментальным зависимостям, полученным для различных условий нагружения различных сплавов в работе [27] – рис. 3.2;

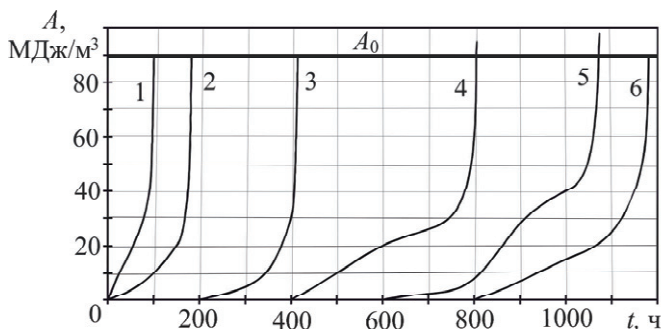


Рис. 3.2. Изменение $A(\tau)$ для титанового сплава ОТ-4 [27]. Случай одноосного нестационарного ступенчатого нагружения при разных условиях циклического нагружения с $\nu \ll 1$ Гц (линии 1...6): (толстая горизонтальная линия): $A_0 = 88$ МДж/м³

– величина A_0 , определенная по условию (3.1), составляет $A_0 = 55$ МДж/м³ и не зависит от последовательности совокупностей условий нагружения оболочки даже в случае их значительного отличия, что соответствует ЭВТП – рис. 3.1;

– при определении A_0 на основе критерия SC2

$$\sigma_e(\tau_0) = \eta \cdot \sigma_0(\tau_0), \quad (3.2)$$

где $\sigma_e(\tau_0)$ и $\sigma_0(\tau_0)$ – эквивалентное напряжение и предел текучести для самого внутреннего радиального элемента в анализируемом АС оболочки, соответственно; η – числовой параметр, $\eta \leq 1$, получено, что расчетная величина $A_0 = [30 \dots 40]$ МДж/м³ и значительно отличается для различных условий нагружения оболочки в случае их значительного отличия: 37,1; 34,4 и 31,9 МДж/м³. Более напряженным условиям эксплуатации оболочки соответствуют большие значения A_0 , со средним арифметическим $\langle A_0 \rangle = 34,5$ МДж/м³ и диапазоном изменения $\Delta A_0 = 7,6$ % от $\langle A_0 \rangle$ (рис. 3.1).

– несущественное отличие значений A_0 , рассчитанных по (3.2), служит определяющим признаком незначительного отличия альтернативных условий нагружения оболочки. На основе (3.2) невозможно для всех альтернативных совокупностей условий эксплуатации найти параметр η , чтобы одновременно выполнялись условия

$$\sigma_e(\tau_0) = \eta \cdot \sigma_0(\tau_0); \eta = \text{idem}; \omega \leq 1. \quad (3.3)$$

– оценка A_0 по условию (3.2) консервативнее оценки по (3.1), но не отвечает принципу независимости от условий нагружения оболочки, поэтому целесообразно определять A_0 на основе консервативной ЭВТП-оценки, т.е. совместного учета принципов независимости A_0 от условий нагружения и консервативности, принимая $A_0 = \text{const} = 30 \text{ МДж/м}^3$.

– коэффициент запаса консервативной ЭВТП-оценки $K = 55/30 \approx 2$, что в 5 раз меньше коэффициента запаса при расчете $\omega(\tau)$ по SC4.

– ЭВТП-метод позволяет достичь независимости ограничивающего компонента в критерии разрушения оболочки от условий ее нагружения, значительно снизить коэффициент запаса при расчете $\omega(\tau)$, предложить алгоритм управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации ВВЭР [29].

3.2. Программное средство для расчета деформации оболочки

При выборе программного средства (ПС) FEMAXI [30] для расчетного анализа развития напряжений и деформаций в оболочке твэла реактора типа ВВЭР учитывались такие важные достоинства ПС, как

– совместное решение уравнений теплопроводности и механической деформации;

– возможность определять реакцию твэла на комбинированное воздействие изменений линейной мощности в твэле, параметров теплоносителя, других факторов во всем диапазоне нормальных условий эксплуатации реактора типа ВВЭР, до глубин выгорания топлива $B > 50 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг}\cdot\text{У}$.

Согласно расчетной модели ПС, твэл условно разделен на 10 АС, в центральной точке каждого АС задается линейная мощность $q_{l,\text{max}}$, пропорциональная N . $q_{l,\text{max}}$ в других точках АС вычисляется путем экстраполяции значений, заданных для центральных точек. Распределение температуры в твэле предсказывается для одномерной радиальной геометрии на основе учета внут-

ренного тепловыделения, изменений теплопроводности таблетки и зазора, теплообмена между поверхностью твэла и теплоносителем. Расчет температуры топлива выполняется с разницей между численным и аналитическим решениями не более 0,1 %. Рассчитываются упругая и пластическая деформация, сила МВТО, деформация ползучести. Согласно принятой модели выхода газообразных ПД, рассчитывается их диффузия, формирование пузырьков с выходом на границы зерен и во внутреннее пространство твэла, рост внутреннего давления в твэле. Шаг по времени задается автоматически из условия обеспечения стабилизации численного решения и сходимости при расчете ползучести для всех АС [9].

Согласно ЭВТП-методу, для расчета $\omega(\tau)$ необходимо найти $A(\tau)$ для условий длительного переменного температурно-силового нагружения оболочки в радиационных условиях. Поэтому решающим фактором при выборе ПС было то, что ПС позволяет для заданной последовательности режимных параметров реактора типа ВВЭР корректно рассчитать по МКЭ, с учетом радиационных эффектов, σ_e и \dot{p}_e оболочки. Скорость эквивалентной деформации ползучести представлялась в следующем виде [9]:

$$\dot{p}_e = f(\sigma_e, \bar{\epsilon}^H, T, \Phi, F), \quad (3.4)$$

где $\bar{\epsilon}^H$ – безразмерный параметр упрочнения; T – температура, К; Φ – плотность потока быстрых нейтронов, $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; F – скорость делений, $1/\text{м}^3 \cdot \text{с}$.

3.3. Влияние характеристик цикла нагружения на поврежденность

Для двух различных режимов нагружения реактора типа ВВЭР рассчитывалась удельная энергия рассеяния $A(n)$ в циркалоевой оболочке твэла, в зависимости от числа недельных циклов нагружения n (рис. 3.3).

Кривая (1) соответствует следующему недельному циклу нагружения РУ: в течение 5 суток – $N=100\% N_{\text{ном}}$ → в течение 1 ч N снижается до $N=50\%$ → $N=50\%$ в течение 46 ч → в течение 1 ч N повышается до $N=100\%$.

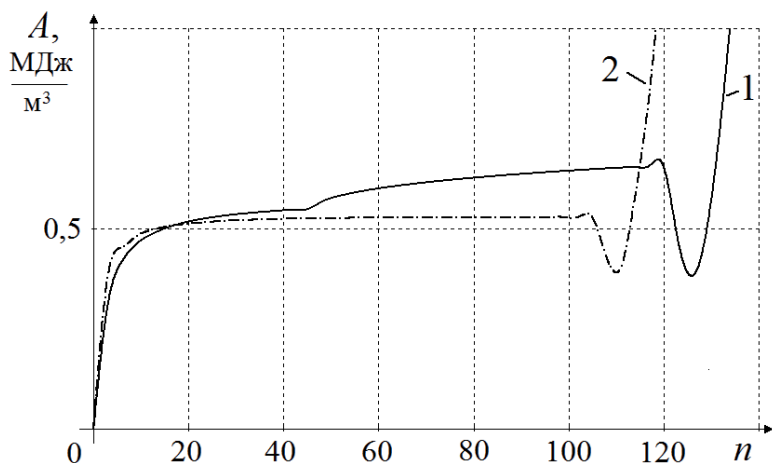


Рис. 3.3. Зависимость $A(n)$: 1 – цикл: (5 сут – 100 %; 46 ч – 50 %);
2 – стационарная эксплуатация РУ при $N=100\% N_{\text{ном}}$

Данный недельный цикл нагружения соответствует эксплуатации РУ на уровне мощности $N=50\%$ в выходные дни недели. Кривая (2) соответствует стационарной эксплуатации РУ в режиме базовой нагрузки.

Явление ползучести проявляется в виде трех характерных стадий: неустановившейся, установившейся и ускоренной ползучести (последняя стадия – стадия предразрушения) [27]. Участки кривых (1) и (2), соответствующие характерным стадиям ползучести, приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Характерные стадии ползучести

Кривая	Стадия ползучести циркалоевой оболочки		
	Неустановившаяся	Установившаяся	Ускоренная
1	$A_1(0) \dots A_1(15)$	$A_1(15) \dots A_1(118)$	$A_1(118) \dots A_1(140)$
2	$A_2(0) \dots A_2(10)$	$A_2(10) \dots A_2(102)$	$A_2(102) \dots A_2(140)$

Эквивалентная деформация ползучести p_e оболочки для обоих режимов нагружения постепенно увеличивается с течением времени, причем в начале последней стадии ползучести наблюдается характерное снижение p_e , после чего наступает значительный рост p_e с достижением недопустимо больших

значений с точки зрения надежности твэла: через 150 недельных циклов нагружения p_e достигает 5 % и 9,4 % при эксплуатации РУ в режиме (5 сут – 100 %, 46 ч – 50 %) и в режиме $N=100 \% N_{\text{ном}}$, соответственно.

Величина $A(n)$ перед наступлением стадии ускоренной ползучести

– для цикла (5 сут – 100 %, 46 ч – 50 %): $A_{01} = A_1(118) = 0,658 \text{ МДж/м}^3$;

– при $N=100 \%$: $A_{02} = A_2(102) = 0,529 \text{ МДж/м}^3$ (рис. 3.3).

Для недельного цикла нагружения продолжительность эксплуатации твэла до наступления ускоренной ползучести значительно больше соответствующей характеристики для эксплуатации РУ в режиме базовой нагрузки (табл. 3.1).

В практике эксплуатации РУ применяется понятие “эффективные сутки”, т.е. сутки эксплуатации РУ на уровне $N=100 \% N_{\text{ном}}$. В пересчете на эффективные сутки, число циклов нагружения до начала ускоренной ползучести для цикла (5 сут – 100 %, 46 ч – 50 %) составляет $n_{e,0,1} = 101,1$, что практически равно $n_{e,0,2} = 101,7$ для стационарной эксплуатации РУ. Таким образом, существует независимость $n_{e,0}$ от характеристик цикла нагружения РУ при малой частоте циклического нагружения твэла:

$$n_{e,0,1} = n_{e,0,2} = \text{const.} \quad (3.5)$$

Этот результат показывает, что при $v \ll 1$ Гц расчетная величина $\omega(\tau)$ определяется процессом ползучести, зависящим от максимальной линейной мощности в твэле, тогда как фактор усталости пренебрежимо мал.

Рассчитана зависимость $A(n)$ в оболочке твэла реактора типа ВВЭР от числа суточных циклов нагружения (16 ч – 100 %; 6 ч – $k \cdot 100 \%$), $k = 1; 0,75; 0,5$. Границы характерных стадий ползучести приведены в табл. 3.2 [23].

Таблица 3.2

Стадии ползучести для цикла (16 ч – 100 %; 6 ч – $k \cdot 100 \%$)

k	Стадия ползучести оболочки		
	Неустановившаяся	Установившаяся	Ускоренная
1	$A_1(0) \dots A_1(100)$	$A_1(100) \dots A_1(702)$	$A_1(702) \dots A_1(1200)$
0,75	$A_2(0) \dots A_2(100)$	$A_2(100) \dots A_2(760)$	$A_2(760) \dots A_2(1200)$
0,5	$A_3(0) \dots A_3(100)$	$A_3(100) \dots A_3(820)$	$A_3(820) \dots A_3(1200)$

Используя рассчитываемую по (2.1) величину КИУМ, в пересчете на эффективные сутки, число циклов нагружения $n_{e,0}$ до начала ускоренной ползучести определяется по выражению:

$$n_{e,0} = n_0 \cdot \text{КИУМ}, \quad (3.6)$$

где n_0 – число календарных суточных циклов нагружения до начала ускоренной ползучести.

Для $k = 1; 0,75; 0,5$ величины $p_e (n=1200)$, КИУМ, A_0 (в начале стадии ускоренной ползучести), n_0 и $n_{e,0}$ приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

p_e , КИУМ, A_0 , n_0 , $n_{e,0}$ в зависимости от k

k	$p_e, \%$	КИУМ	$A_0, \%$	$n_0, \text{сут}$	$n_{e,0}, \text{эф. сут}$
1	6,75	1	0,522	702	702
0,75	4,56	0,93	0,559	760	704
0,5	3,25	0,85	0,639	820	700

В пределах систематической погрешности расчета $\approx 1 \%$, $n_{e,0} = \text{idem}$ при $k = \text{var}$, что соответствует сделанному ранее выводу о независимости $n_{e,0}$ от характеристик цикла нагружения РУ при $v \ll 1$ Гц.

На рис. 3.4 для оболочки твэла реактора типа ВВЭР представлена зависимость $A(n)$ от числа недельных циклов нагружения n .

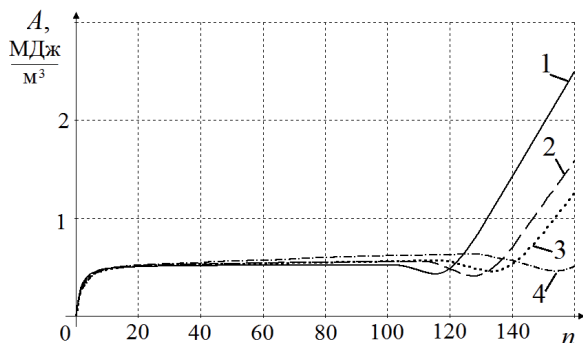


Рис. 3.4. Зависимость $A(n)$ от числа недельных циклов нагружения: 1 – $N=100 \%$; 2 – цикл: (16 ч – 100%; 6 ч – 75%); 3 – цикл: (5 сут – 100%; 2 сут – 50%); 4 – цикл: (5 сут – 100% + 75%; 2 сут – 50%)

Рассматривались следующие варианты нагружения РУ:

- 1) $N=100\% N_{\text{ном}}$;
- 2) Суточный цикл (16 ч – 100 %; 6 ч – 75 %);
- 3) Недельный цикл (5 сут – 100 %; 46 ч – 50 %);
- 4) Комбинированный цикл (5 сут – 100 % + 75 %; 2 сут – 50 %).

Используя выражение (3.6), определены параметры n_0 и $n_{e,0}$ – табл. 3.4.

Таблица 3. 4

n_0 и $n_{e,0}$ в зависимости от режима нагружения РУ

Параметр	Режим нагружения			
	100 %	Нед. цикл	Сут. цикл	Комб. цикл
КИУМ	1	0,86	0,927	0,805
n_0 , нед.	100	117	109,9	127,1
$n_{e,0}$, эф. нед.	100	100,6	101,9	102,3

В пределах систематической погрешности расчета $\approx 1\%$, $n_{e,0}=\text{idem}$ для четырех различных режимов нагружения, что подтверждает вывод о независимости $n_{e,0}$ от характеристик цикла нагружения РУ при $\nu \ll 1$ Гц.

3.4. Влияние режимных характеристик РУ на поврежденность

Удельная энергия рассеяния $A(\tau)$ в оболочке твэла зависит от режимных характеристик РУ. Например, рассматривая недельный цикл нагружения (5 сут – 100 %, 46 ч – 50 %) реактора типа ВВЭР, с уменьшением средней по длине твэла температуры теплоносителя $\langle t_{\text{тн}} \rangle$ (остальные параметры фиксированы), момент наступления ускоренной ползучести оболочки значительно сдвигается вправо по шкале числа недельных циклов нагружения n (рис. 3.5). С уменьшением средней по длине твэла линейной мощности $\langle q_l \rangle$ (остальные параметры фиксированы), момент наступления ускоренной ползучести оболочки также значительно сдвигается вправо по шкале n (рис. 3.6).

Кроме того, $A(\tau)$ в оболочке твэла сильно зависит от конструктивных характеристик твэла и ТВС [14, 16, 23].

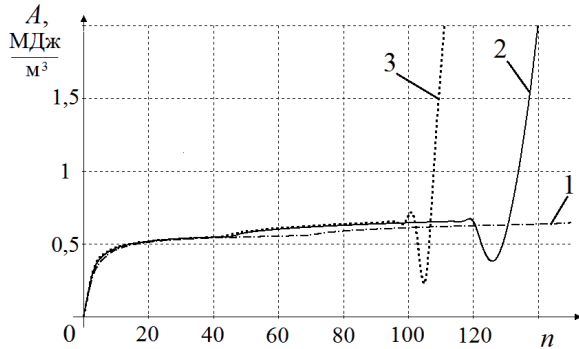


Рис. 3.5. Влияние $\langle t_{v/n} \rangle$ на $A(n)$: 1 – $\langle t_{v/n} \rangle = 295$ °С;
2 – $\langle t_{v/n} \rangle = 305$ °С; 3 – $\langle t_{v/n} \rangle = 310$ °С.

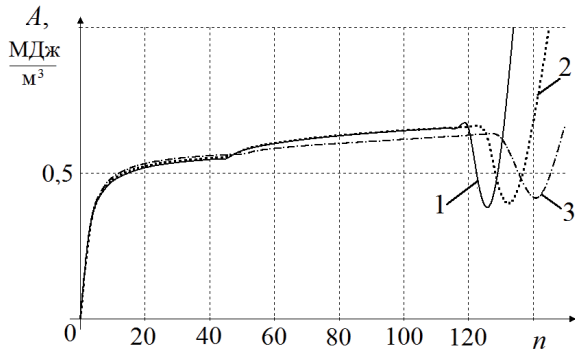


Рис. 3.6. Влияние $\langle q_l \rangle$ на $A(n)$: 1 – $\langle q_l \rangle = 180$ Вт/см;
2 – $\langle q_l \rangle = 175$ Вт/см; 3 – $\langle q_l \rangle = 170$ Вт/см

Для корректного расчета долговечности оболочки твэла необходимо в качестве входных данных имитационной модели задавать конструкционные характеристики твэла, ТВС и последовательность совокупностей условий эксплуатации твэла, определяемых такими факторами, как режимные параметры РУ, алгоритм перестановок ТВС в АКЗ, схема размещения и амплитуда перемещения ОР СУЗ, и т.д.

ЭВТП-метод расчета $\omega(\tau)$ может оказаться незаменимым ввиду невозможности определения $\omega(\tau)$ путем точного аналитического решения задачи о ползучести материала оболочки или путем натурального эксперимента.

3.5. Гистерезисное снижение деформации ползучести оболочки

Характерное кратковременное снижение p_e перед началом ускоренной ползучести показано на примере зависимости p_e от числа недельных циклов нагружения n_e , выраженного в эффективных сутках (рис. 3.7).

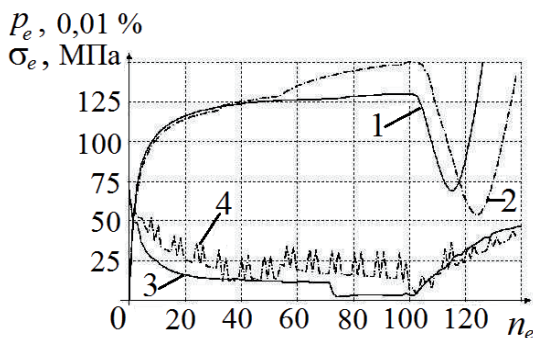


Рис. 3.7. $p_e(n_e)$, $\sigma_e(n_e)$: линии 1, 3 – p_e, σ_e для режима $N=100\% N_{\text{ном}}$, соответственно; линии 2, 4 – p_e, σ_e для цикла (5 сут – 100 % + 75 %; 2 сут – 50 %), соответственно

Это снижение p_e в работах [23, 28] названо гистерезисным ввиду того, что в начале стадии ускоренной ползучести тенденция снижения σ_e сменяется тенденцией роста, при этом незначительно уменьшается p_e , что означает гистерезис, при котором рост $p_e(n_e)$ отстает от роста $\sigma_e(n_e)$ по фазе (рис. 3.8).

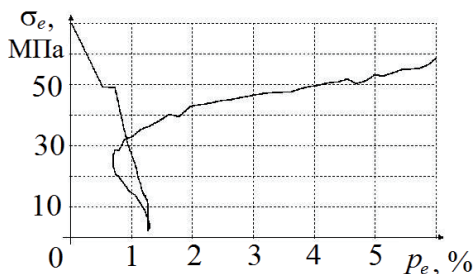


Рис. 3.8. Зависимость $\sigma_e(p_e)$ для стационарной эксплуатации РУ

Момент начала характерного незначительного снижения p_e примерно совпадает с моментом начала МВТО, поэтому можно предположить, что явление гистерезиса связано с эффектом релокации трещин в топливной таблетке. Однако, подробно данное явление в работе не изучалось.

3.6. Принцип совместного учета поврежденности и стабильности АО

Известны четыре основные программы регулирования (ПР) энергоблоков с ВВЭР [18, 31]:

– ПР с постоянной средней температурой теплоносителя в 1-м контуре $\langle t_1 \rangle = \text{const}$ (П1). Наряду с благоприятными условиями для оборудования 1-го контура, использованием температурного эффекта реактивности для регулирования N и минимальным воздействием на ОР СУЗ, характеризуется повышением начального давления пара p_{II} во 2-м контуре при снижении N .

– ПР с $p_{II} = \text{const}$ (П2). Наряду с благоприятными условиями для оборудования 2-го контура и использованием пара более высоких начальных параметров в номинальном режиме, характеризуется увеличением размера компенсатора давления, повышением температурных напряжений в корпусе реактора и оболочках твэлов, необходимостью воздействия на ОР СУЗ для компенсации температурного эффекта реактивности.

– Компромиссная ПР с умеренным изменением $\langle t_1 \rangle$ и p_{II} (П3). Наряду с возможностью оптимального выбора параметров 1-го и 2-го контура, имеет недостатки П1 и П2.

– Комбинированная ПР (П4) – в диапазоне $N=100-80 \% N_{\text{ном}}$ блок работает по П1, а при $N < 80 \%$ – используется П2. Чтобы сохранять $\langle t_1 \rangle = \text{const}$ в диапазоне $N=100-80 \% N_{\text{ном}}$, давление в парогенераторе необходимо удерживать в диапазоне 62–64 бар [31].

Задача контролируемого перевода ВВЭР с одного уровня N на другой тесно связана с проблемой сохранения стабильности АО и целостности оболочек твэлов. Известны следующие основные способы устойчивого управления

реактивностью [31]:

– Ввод-вывод твёрдого поглотителя. Наряду с быстроедействием и лёгкостью автоматизации, характеризуется деформацией поля энерговыделения при вводе ОР СУЗ в АКЗ, а при выводе ОР – значительными скачками мощности в оболочках твэлов, расположенных вблизи ОР.

– Изменение концентрации поглотителя в теплоносителе. Не изменяет аксиальный профиль энерговыделения, однако, характеризуется низким быстроедействием и образованием дебалансных вод, требующих переработки.

– Использование температурного коэффициента реактивности. Также не изменяет аксиальный профиль энерговыделения, однако, характеризуется небольшим диапазоном регулирования из-за ограничения по p_{II} и температуре входа теплоносителя t_1 в реактор.

– Отравление-разотравление реактора. Если правильно выбрано время разгрузки блока, реактивность в процессе отравления-разотравления будет повторять график мощности энергосистемы. Характеризуется низким быстроедействием [34].

С целью определения оптимального алгоритма суточного маневра мощностью АКЗ ВВЭР-1000, в диссертационной работе [34], а также в патентах [35–36] предложен компромиссно-комбинированный метод регулирования мощности РУ, который в дальнейшем использовался при разработке методов управления свойствами твэлов [14–16, 29]. Согласно компромиссно-комбинированному методу полагается, что при $N=N_{ном}$ ксеноновые колебания подавлены перемещением регулирующей группы СУЗ. Снижение N до 90 % $N_{ном}$ осуществляется вводом раствора борной кислоты, поддерживая при этом неизменную входную температуру теплоносителя ($t_1 = const$) за счет повышения давления p_{II} в главном паровом коллекторе (ГПК). Вводом рабочей группы ОР поддерживается оптимальный мгновенный АО как гарантия невозникновения ксеноновых колебаний. В дальнейшем снижение N происходит за счёт отравления. Оптимальный мгновенный АО удерживается за счет изменения положения рабочей группы. Приблизительно через 2–3 ч N достигнет 80 % $N_{ном}$ и

вводом «чистого дистиллята» будет стабилизирована. После прохождения максимума «йодной ямы» N частично восстановится за счёт разотравления. Для восстановления $N_{\text{ном}}$ вводится «чистый дистиллят» в 1-й контур с одновременным снижением $p_{\text{п}}$, что позволяет сохранить $t_1 = \text{const}$. Регулирующая группа СУЗ извлекается из АКЗ для поддержания оптимального мгновенного АО. После достижения $N_{\text{ном}}$ автоматический регулятор поддерживает его на заданном уровне. Подавление возникающих ксеноновых колебаний осуществляется перемещением регулирующей группы.

Таким образом, предложен алгоритм с умеренным изменением $\langle t_1 \rangle$ и $p_{\text{п}}$ при $N = 100\text{--}80\% N_{\text{ном}}$, тогда как при $N < 80\% N_{\text{ном}}$ используется П2. Этот алгоритм характеризуется сравнительно небольшим числом переключений, уменьшением расхода чистого дистиллята и борного концентрата, уменьшенным количеством дебалансных вод и улучшением условий работы топлива. За счет поддержания $t_1 = \text{const}$ при $p_{\text{п}} = 58\text{--}60$ бар, алгоритм имеет преимущества, но лишен недостатков П1 [34–36].

Принцип совместного учета поврежденности оболочек твэлов и стабильности АО был предложен в методе сравнения эффективности двух алгоритмов точного манёвра мощностью энергоблока с ВВЭР-1000: альтернативного алгоритма, разработанного на основе компромиссно-комбинированного метода, и апробированного алгоритма, прошедшего испытания на Хмельницкой АЭС 18.04.2006 г. [37].

1. Альтернативный алгоритм: 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.

2. Апробированный алгоритм: снижение N от $N_{\text{ном}}$ до $80\% N_{\text{ном}}$ в течение 1 ч → $N = 80\%$ в течение 7 ч → повышение N до $N_{\text{ном}}$ в течение 2 ч.

С помощью ПС ИР [38] выполнено сравнение этих двух алгоритмов. Высотная неравномерность поля энерговыделения описывается аксиальным офсетом (АО), рассчитываемым как процентное отношение разности мощ-

ностей верхней $N_{\text{в}}$ и нижней $N_{\text{н}}$ половин АКЗ к полной мощности АКЗ [32]:

$$AO = \frac{N_{\text{в}} - N_{\text{н}}}{N_{\text{в}} + N_{\text{н}}} \cdot 100\% . \quad (3.7)$$

Мгновенный АО соответствует текущему распределению концентрации ксенона, а равновесный АО отвечает равновесному распределению концентрации ксенона.

В диссертации [34] с помощью ПС ИР для апробированного и альтернативного алгоритмов были рассчитаны в зависимости от времени τ мощность реактора $N(\tau)$, положение регулирующей группы стержней $H(\tau)$, мгновенный и равновесный АО(τ). Автор отметил, что для альтернативного алгоритма в два раза уменьшается амплитуда необходимого движения регулирующей группы ОР СУЗ. Кроме того, для апробированного алгоритма, в отличие от альтернативного, характерна значительная дивергенция мгновенного и равновесного АО: амплитуда изменения АО в ходе маневра (ΔAO) для апробированного алгоритма в 10 раз больше, чем для альтернативного [34]. Применяя ЭВТП-метод, для апробированного и альтернативного алгоритмов получена зависимость удельной энергии рассеяния A в оболочке твэла реактора типа ВВЭР от числа эффективных суточных циклов нагружения n_e – рис. 3.9 [37].

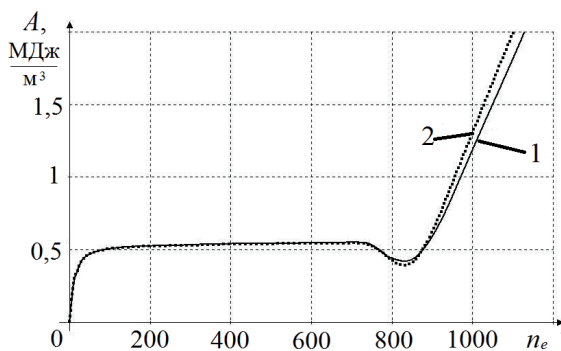


Рис. 3.9. Зависимость $A(n_e)$: 1, 2 – апробированный и альтернативный алгоритм суточного маневра мощностью, соответственно

Результаты сравнительного анализа эффективности апробированного и альтернативного алгоритмов суточного маневра мощностью приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Сравнение эффективности алгоритмов маневрирования

Алгоритм	$\Delta A O$	КИУМ	$n_{e,0}$, эф. сут. циклов
альтернативный	$\Delta A O_1$	0,942	705,9
апробированный	$\Delta A O_2 = 10 \cdot \Delta A O_1$	0,929	704,6

В публикации [37] сделан вывод, что альтернативный алгоритм эффективнее апробированного, поскольку альтернативный алгоритм характеризуется:

- меньшим числом переключений для ввода жидкого поглотителя и чистого дистиллята;
- незначительной дивергенцией графиков мгновенного и равновесного АО;
- меньшей амплитудой изменения линейной мощности в твэлах, лежащих вблизи от ОР;
- более высоким КПД-брутто турбоустановки;
- не меньшим временем эксплуатации оболочки твэла, оцениваемым по числу эффективных суточных циклов $n_{e,0}$ до начала ускоренной ползучести.

Оценка долговечности оболочки на основе расчета $n_{e,0}$, применявшаяся в ранних работах по ЭВП-методу, в дальнейшем показала свою неэффективность ввиду независимости $n_{e,0}$ от характеристик цикла нагружения РУ при $v \ll 1$ Гц. В поздних публикациях использовался критерий разгерметизации оболочки на основе выражений (2.11) и (3.1) [15, 16, 29, 39]:

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

3.7. Сравнение долговечности оболочек твэлов ТВС разных типов

Хотя традиционно в РУ ВВЭР-1000 проекта В-320 НАЭК “Энергоатом” эксплуатируются ТВС производства корпорации “Твэл”, стратегия развития ядерной отрасли Украины предполагает диверсификацию поставок топлива.

Таким образом, необходимо учитывать возможность поставок ТВС других производителей, например ТВС-W производства корпорации "Westinghouse".

Производители ТВС обосновывают надежность и безопасность эксплуатации своих ТВС в различных режимах, однако не предоставляют полной информации по своим методикам, не открывают свободный доступ к используемым ПС. Поэтому важно иметь независимую, альтернативную методику определения того, какой тип ТВС будет ограничивать ресурс АКЗ в случае ее смешанной топливной загрузки, при работе РУ не только в базовом, но и в переменном режимах.

Согласно расчетной модели, длина твэла делилась на 10 АС, для центральной точки каждого из которых задавалась своя величина линейной мощности q_l , пропорциональная текущему уровню N . В других точках АС q_l находилась экстраполяцией значений в центральных точках. Результаты расчетов эквивалентной деформации ползучести p_e и удельной энергии рассеяния $A(\tau)$ будут приводиться для АС 5 оболочки твэла.

ПС FEMAXI [30], используемому для расчета развития напряженно-деформированного состояния в оболочке твэла, присущи общие недостатки всех ПС, анализирующих поведение топлива:

- в моделях используются эмпирические корреляции, ненадежные экстраполяции;
- модели привязаны к избранным материалам;
- нет оценки неопределенности результатов расчета.

В качестве материала топливной таблетки в FEMAXI выбрана двуокись урана. Следовательно, если пренебречь различиями между технологиями изготовления топлива, влияющими на его свойства, модели физических процессов в топливе, используемые в ПС, адекватны топливу, применяемому как в ТВС-W, так и в УТВС, ТВС-А. Однако, в качестве материала оболочки в ПС рассматривается циркониевый сплав циркалой, что не соответствует ни материалу, применяемому в ТВС-W (циркониевый сплав ZIRLO), ни материалу, применя-

емому в УТВС и ТВС-А (циркониевый сплав Э-110). Таким образом, при использовании ПС FEMAXI для оценки долговечности оболочки твэла возникает проблема корректного задания в качестве исходных данных свойств материала оболочки.

С учетом этого ограничения, присущего ПС, выполнялось сравнение долговечности оболочек твэлов различных типов ТВС принимая во внимание только различия в их конструктивной реализации. В качестве материала топливных таблеток для всех типов ТВС принималась спеченная двуокись урана, а в качестве материала оболочки – циркалой-4 марки SR.

В соответствии с методикой [9], задавались следующие константы, а также свойства материалов топливной таблетки и оболочки, зависящие от температуры: коэффициент Пайлинга-Бедворта для оболочки; начальная теоретическая плотность и пористость топлива; константа упругости и коэффициент термического расширения пружины верхней камеры; коэффициент трения между таблеткой и оболочкой; скорость коррозии оболочки; коэффициент теплопроводности таблетки, оболочки, окисной пленки, зазора; профиль плотности энерговыделения таблетки в радиальном направлении; уровень выгорания, при котором начинается и заканчивается миграция трещин в таблетке топлива; испускание газообразных ПД; коэффициент диффузии атомов газа в сферической твердой матрице; рост зерна топлива; испускание газообразных ПД из-за формирования ободочной области; параметры пластической анизотропии топлива и оболочки; модуль Юнга материала оболочки, топлива, таблетки с трещинами, окисной пленки; предел текучести материала оболочки; удельная теплоемкость топлива, оболочки, окисной пленки; выражения, описывающие горячее прессование, ползучесть, распухание, уплотнение, пластичность топлива; точка плавления таблетки; коэффициент температурного расширения топлива, оболочки, окисной пленки; ползучесть, пластичность, радиационный рост материала оболочки; константы диффузии газообразных ПД и встречной диффузии газов He-He.

Для сравнительного анализа долговечности оболочки твэла различных топ-

ливных загрузок ВВЭР-1000 выбраны УТВС (ТВС В-320), ТВС-А и ТВС-В. Конструктивные характеристики твэлов ТВС и режимные характеристики РУ, принятые в качестве исходных данных, приведены в табл. 2.1–2.3.

Для средненагруженного твэла ТВС трех типов рассчитана зависимость A от числа эффективных суток n_e при комбинированном цикле нагружения (5 сут – (100 % + 75 %), 2 сут – 50 %) – рис. 3.10 [23].

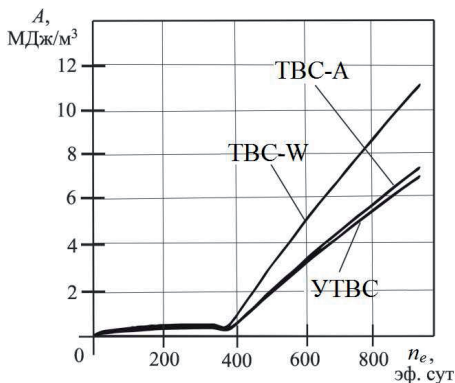


Рис. 3.10. Зависимость $A(n_e)$ для оболочки твэла УТВС, ТВС-А и ТВС-В при комбинированном цикле нагружения

Максимальное значение $A(\tau)$ достигается для твэла ТВС-В с топливной таблеткой без центрального отверстия. На рис. 3.11 для ТВС трех типов представлена расчетная зависимость $A(n_e)$ при $N=N_{\text{ном}}$ [23].

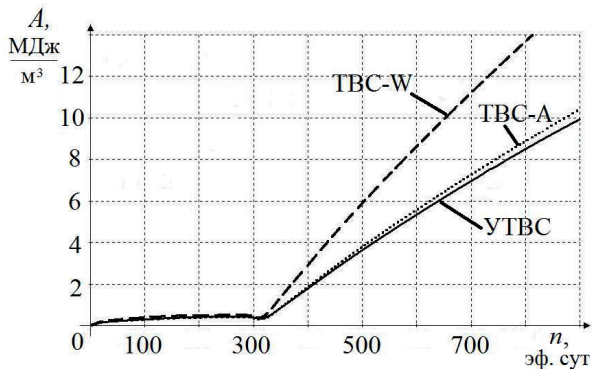


Рис. 3.11. Зависимость $A(n_e)$ для оболочки твэла УТВС, ТВС-А, ТВС-В при базовом режиме нагружения РУ

Принимая $A_0=30$ МДж/м³, рассчитана поврежденность оболочек твэлов $\omega(\tau)$ в базовом и переменном режимах нагружения, достигнутая после эксплуатации ТВС в течение 900 эф. сут (табл. 3.6).

Таблица 3.6

$\omega(900 \text{ эф. сут})$ для УТВС, ТВС-А, ТВС-В

Параметр	$N=N_{\text{ном}}$			Комбинированный цикл		
	УТВС	ТВС-А	ТВС-В	УТВС	ТВС-А	ТВС-В
$p_e, \%$	10,06	10,32	12,52	7,648	7,862	9,402
$A, \text{МДж/м}^3$	9,933	10,42	16,03	7,313	7,721	11,51
$\omega(\tau), \%$	33,1	34,7	53,4	24,4	25,7	38,4

Поскольку в паспортных данных на ТВС не содержится исходных данных по свойствам материалов топлива и оболочки, необходимых для корректного расчета поврежденности оболочки твэла ТВС различных типов, НАЭК “Энергоатом” целесообразно требовать от производителей ТВС предоставления полной информации по свойствам топлива.

3.8. Чувствительность модели расчета поврежденности

Выполнен анализ чувствительности модели расчета $\omega(\tau)$ для реактора ВВЭР-1000 к неопределенности в задании основных параметров твэла и АКЗ [23]. Режимные характеристики АКЗ и конструктивные характеристики твэла ТВС-А задавались в соответствии с [19], за исключением материала оболочки (циркалой-4 SR) [9]. Длина твэла делилась на 10 АС, анализировался АС 5. Зависимости A от числа эффективных суток n_e построены для комбинированного цикла (5 сут – 100 % +75 %, 2 сут – 50 %). Величина A_0 определялась по критерию (3.2) при $\eta=1$.

На рис. 3.12 показана зависимость $A(n_e)$ при трех значениях диаметра центрального отверстия $d_{\text{отв}}$ таблетки: базовом – в соответствии с [19], увеличенном на 20 % и уменьшенном на 20 %.

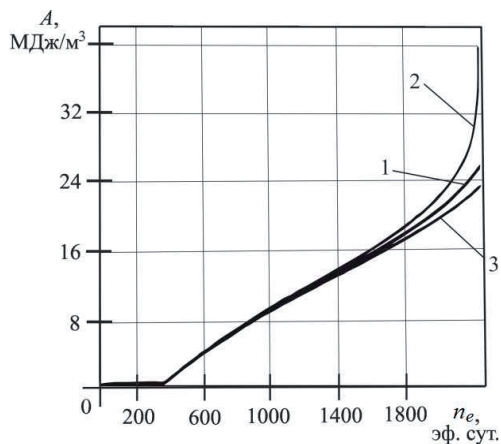


Рис. 3.12. Зависимость $A(n_e)$ для $d_{отв}$: 0,14 см – базовый (1), 0,112 см (2) и 0,168 см (3)

При уменьшении $d_{отв}$ (остальные режимные параметры АКЗ и конструктивные параметры ТВС фиксированы) $A(n_e)$ значительно увеличивается в области глубоких выгораний (больших n_e). На рис. 3.13 показано достижение условия (3.2) в момент $\tau_0 = 2074$ эф. сут для случая, когда $d_{отв}$ уменьшен на 20 % по сравнению с проектным значением.

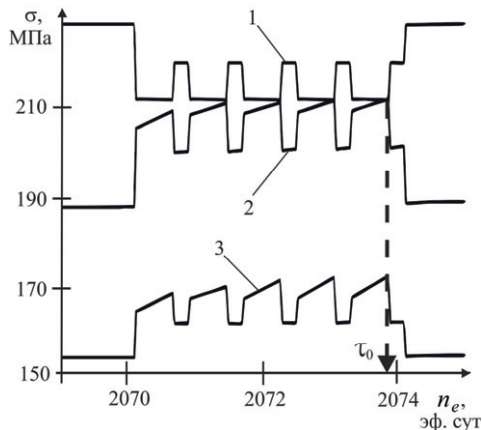


Рис. 3.13. Определение τ_0 для уменьшенного на 20 % $d_{отв}$:

- 1 – $\sigma_0^{\max}(\tau)$; 2 – $\sigma_e^{\max}(\tau)$ для $d_{отв} = 0,112$ см (-20 %);
- 3 – $\sigma_e^{\max}(\tau)$ для $d_{отв} = 0,168$ см (+20 %)

Видно, что условие (3.2) для случая, когда $d_{\text{отв}}$ увеличен на 20 % по сравнению с проектным значением, в момент времени $n_e = 2074$ эф. сут не выполняется. Получив для $d_{\text{отв}} = 0,112$ см (-20 %) $\tau_0 = 2074$ эф. сут, соответствующая величина $A_0 = 25,5$ МДж/м³ определяется на основе зависимости $A(n_e)$ – рис. 3.14.

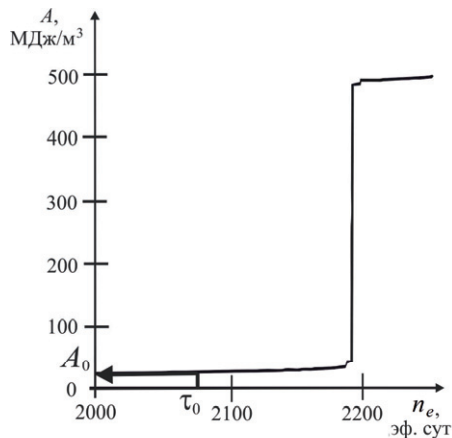


Рис. 3.14. Определение A_0 для уменьшенного на 20 % $d_{\text{отв}}$

Определив $A(\tau)$ и A_0 для конкретного набора параметров, можно для любого момента τ определить $\omega(\tau)$. Относительная разница $\Delta A_i(n_e)$ между удельной энергией рассеяния $A_i(n_e)$ для набора параметров $\{X_{1,Б}, X_{2,Б}, \dots, X_{i,Б} + \Delta X_i, \dots, X_{k,Б}\}$ и удельной энергией рассеяния $A_B(n_e)$ для базового набора параметров $\{X_{1,Б}, X_{2,Б}, \dots, X_{i,Б}, \dots, X_{k,Б}\}$, зависящая от числа эффективных суток n_e и отклонения ΔX_i i -го варьируемого параметра, определялась выражением [23]:

$$\Delta A_i(n_e) = \frac{A_i(n_e) - A_B(n_e)}{A_B(n_e)}. \quad (3.8)$$

В табл. 3.7–3.9 приведены значения $\Delta A_i(n_e)$ после непрерывной работы РУ в течение $n \times 250$ эф. сут, где $n = 1, 2, \dots, 9$. По степени чувствительности $\omega(\tau)$ к неопределенности в задании исходных данных, параметры условно разделены на 3 группы. К 1-й группе относятся параметры, неопределенность в задании которых практически не влияет на оценку $\omega(\tau)$ – табл. 3.7.

Таблица 3.7

 $\Delta A_i(n_e)$, % при варьировании параметров 1-й группы

n_e , эф. сут		250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250
$\Delta(t_{\text{КО}} - t_{\text{ТН}}) \equiv \Delta X_1$, %	+20	-0,01	+0,25	-0,03	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0
	-20	0	-0,04	-0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
$\Delta R_{\text{GR}} \equiv \Delta X_2$, %	+20	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,03
	-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0,12
$\Delta U_{235} \equiv \Delta X_3$, %	+20	0,25	-1	-0,64	-0,53	-0,5	-0,44	-0,41	-0,3	-0,12
	-20	-0,24	1,28	0,63	0,55	0,49	0,43	0,37	0,28	0,11
$\Delta V_{\text{КО}} \equiv \Delta X_4$, %	+20	-0,19	0,12	-0,02	0,03	0,03	0,02	0	-0,02	-0,09
	-20	0,19	-0,14	-0,16	-0,06	-0,05	-0,03	0	0,02	0,1

Итак, получено $\Delta A_i(n_e)$, $i=(1, \dots, 4)$ при варьировании соответственно разницы температур газа верхнего компенсационного объема (КО) и теплоносителя (ТН) $\Delta(t_{\text{КО}} - t_{\text{ТН}}) \equiv \Delta X_1$, начального размера зерна таблетки $\Delta R_{\text{GR}} \equiv \Delta X_2$, обогащения топлива по U-235 $\Delta U_{235} \equiv \Delta X_3$, верхнего КО твэла $\Delta V_{\text{КО}} \equiv \Delta X_4$.

Ко 2-й группе относятся параметры, неопределенность в задании которых слабо влияет на оценку $\omega(\tau)$ – табл. 3.8.

Таблица 3.8

 $\Delta A_i(n_e)$, % при варьировании параметров 2-й группы

n_e , эф. сут		250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250
$\Delta a \equiv \Delta X_5$, %	+6	-46,9	-10,2	-11,1	-12,1	-12,5	-12,4	-12	-11,3	-8,96
	-6	17,1	8,11	11,5	9,88	10,3	10,8	10,8	10,5	9,36
$\Delta P_{\text{He},0} \equiv \Delta X_6$, %	+20	-23,8	6,59	5,85	5,11	5,06	5,29	5,34	5,81	7,56
	-20	26,1	-5,42	-4,81	-4,88	-4,66	-4,71	-4,76	-5,05	-6,03
$\Delta \text{He}_0 \equiv \Delta X_7$, %	-20	-6,03	1	0,64	0,38	0,36	0,41	0,44	0,67	1,76
$\Delta k_{\text{UO}_2} \equiv \Delta X_8$, %	+3	2,77	-0,69	-0,69	-0,55	-0,48	-0,55	-0,62	-0,81	-1,5
	-3	-3,21	0,99	0,59	0,54	0,45	0,56	0,66	0,97	3,09
$\Delta P_{\text{ВХ}} \equiv \Delta X_9$, %	+6	19,8	8,53	2,15	1,03	0,53	0,14	-0,12	-0,55	-1,52
	-6	-18,3	-8,2	-1,63	-0,74	-0,21	0,25	0,53	0,99	2,33
$\Delta W_{\text{ВХ}} \equiv \Delta X_{10}$, %	+6	-1,49	-19,9	-9,02	-6,58	-5,43	-4,86	-4,44	-4,18	-4,21
	-6	1,61	21,8	9,59	7,18	6,03	5,43	4,97	4,7	4,78
$\Delta \delta \equiv \Delta X_{11}$, %	+3	-0,68	-11,7	-4,97	-3,52	-2,9	-2,56	-2,34	-2,2	-2,29
	-3	0,84	13,4	5,82	4,44	3,6	3,19	2,9	2,76	2,89
$\Delta d_{\text{отв}} \equiv \Delta X_{12}$, %	+20	2,32	-1,39	-1,87	-1,98	-2,13	-2,64	-3,49	-5,42	-10,7
	-20	-2,12	1,82	1,94	2,05	2,33	3,14	4,53	8,46	1681

В табл. 3.8: $a \equiv X_5$ – толщина оболочки; $P_{\text{He},0} \equiv X_6$ – начальное давление ге-

лия под оболочкой; $He_0 \equiv X_7$ – начальное содержание гелия в газовой смеси под оболочкой; $k_{UO_2} \equiv X_8$ – коэффициент теоретической плотности UO_2 ; $P_{вх} \equiv X_9$ – давление теплоносителя на входе в реактор; $w_{вх} \equiv X_{10}$ – скорость теплоносителя на входе в реактор; $\delta \equiv X_{11}$ – шаг твэлов; $d_{отв} \equiv X_{12}$ – диаметр центрального отверстия таблетки.

Следует отметить, что относительная разница $\Delta A_{12}(2250) = 1681 \%$, соответствующая варьированию $\Delta d_{отв} \equiv \Delta X_{12} = -20 \%$ (табл. 3.8), относится к моменту времени $\tau \gg \tau_0 = 2074$ эф. сут.

К 3-й группе относятся параметры, неопределенность в задании которых сильно влияет на оценку $\omega(\tau)$ – табл. 3.9.

Таблица 3.9

$\Delta A_i(n_e)$, % при варьировании параметров 3-й группы

N , эф. сут		250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250
$\Delta d_{об}^n \equiv$	+1	6,99	-14,4	-7,42	-6,99	-6,33	-5,72	-5,49	-5,81	-8,06
ΔX_{13} , %	-1	-48,7	9,04	4,11	2,19	1,55	1,48	1,75	2,57	12,6
$\Delta d_{таб} \equiv$	+1	-34,4	5,67	3,42	1,96	1,25	1,11	1,36	2,06	6,61
ΔX_{14} , %	-1	6,55	-7,63	-2,8	-2,85	-2,48	-1,97	-1,87	-2,23	-4,36
$\Delta q_l^{max} \equiv$	+20	192	288	167	136	127	132	326	689	862
ΔX_{15} , %	-20	-16,9	-84	-81,8	-69,4	-63,6	-61	-60	-60,5	-63,5
$\Delta t_{вх} \equiv$	+6	147	147	70,8	52,3	44,9	40,6	37,3	35,7	37,7
ΔX_{16} , %	-6	-12,7	-84,8	-75,9	-52,8	-43,8	-38,1	-34,3	-31,5	-30,3

В табл. 3.9: $d_{об}^n \equiv X_{13}$ – наружный диаметр оболочки; $d_{таб} \equiv X_{14}$ – диаметр таблетки; $q_l^{max} \equiv X_{15}$ – максимальная линейная мощность в твэле; $t_{вх} \equiv X_{16}$ – температура теплоносителя на входе в реактор.

Влияние неопределенности в задании параметров 1-й, 2-й и 3-й групп на величины τ_0 и A_0 показано в табл. 3.10, 3.11 и 3.12 соответственно. В табл. 3.12 также дано сравнение величин τ_0 и A_0 для двух типов циркалоя: SR и RA.

Исходные параметры по степени влияния неопределенности их задания на оценку $\omega(\tau)$ условно делятся на три группы [23]. К группе практически не влияющих параметров, неопределенность задания каждого из которых величиной 20 % приводит к неопределенности τ_0 не более 0,1 %, относятся: разница между

температурами газа верхнего КО и теплоносителя; начальный размер зерна таблетки; обогащение топлива по U-235; верхний КО твэла (табл. 3.10).

Таблица 3.10

Влияние неопределенности задания параметров 1-й группы на τ_0 и A_0

Параметр исходных данных	Численная величина параметра	τ_0 , эф. сут	A_0 , МДж/м ³
Разница температур газа верхнего КО и теплоносителя ($t_{КО} - t_{ТН}$), °С	25 (базовая величина)	2246	27,36
	30 (увеличение на 20 %)	2246	27,36
	20 (уменьшение на 20 %)	2246	27,36
Начальный размер зерна таблетки R_{GR} , мк	10 (баз.)	2246	27,36
	12 (+20 %)	2247	27,42
	8 (-20 %)	2240	27,2
Обогащение топлива по U-235 U_{235}	0,044 (баз.)	2246	27,36
	0,053 (+20 %)	2243	27,25
	0,035 (-20 %)	2247	27,46
Верхний КО твэла $V_{КО}$, см ³	0,21 (баз.)	2246	27,36
	0,25 (+20 %)	2247	27,37
	0,17 (-20 %)	2243	27,31

К группе слабо влияющих параметров, неопределенность в задании каждого из которых величиной 3 % приводит к неопределенности τ_0 не более 2 %, относятся: толщина оболочки; начальное давление гелия под оболочкой; начальное содержание гелия в газовой смеси под оболочкой; коэффициент теоретической плотности UO_2 ; давление теплоносителя на входе в реактор; скорость теплоносителя; шаг твэлов; диаметр центрального отверстия таблетки (табл. 3.11).

К группе сильно влияющих параметров, неопределенность в задании каждого из которых величиной 3 % приводит к неопределенности оценки τ_0 более 2 %, относятся: наружный диаметр оболочки твэла; диаметр таблетки; максимальная линейная мощность; температура теплоносителя на входе в реактор (табл. 3.12). Выбор материала оболочки сильно влияет на расчетную долговечность оболочки в режиме переменных нагрузок. В этой связи, для более точной оценки долговечности оболочки твэла ВВЭР-1000 необходимо выполнить адаптацию ПС FEMAXI к сплаву Э-110, применяемому в качестве материала оболочки твэла в ТВС ВВЭР-1000.

Таблица 3.11

Влияние неопределенности задания параметров 2-й группы на τ_0 и A_0

Параметр исходных данных	Численная величина параметра	τ_0 , эф. сут	A_0 , МДж/м ³
Толщина оболочки a , см	0,069 (базовая величина)	2246	27,36
	0,073 (увеличение на 6 %)	2230	24,26
	0,065 (уменьшение на 6 %)	2230	29,44
Начальное давление гелия под оболочкой $P_{He,0}$, МПа	2,0 (баз.)	2246	27,36
	2,4 (+20 %)	2201	27,80
	1,6 (-20 %)	> 2250	—
Начальное содержание гелия под оболочкой He_0 , %	100 (баз.)	2246	27,36
	80 (-20 %, доля азота: 20 %)	2223	27,05
Коэффициент теоретической плотности UO_2 k_{UO_2}	0,95 (баз., $\rho_{UO_2} = 10,41$ г/см ³)	2246	27,36
	0,92 (-3 %, $\rho_{UO_2} = 10,08$ г/см ³)	2206	26,72
	0,98 (+3 %, $\rho_{UO_2} = 10,74$ г/см ³)	> 2250	—
Давление теплоносителя на входе в реактор $P_{вх}$, МПа	15,84 (баз.)	2246	27,36
	16,79 (+6 %)	> 2250	—
	14,89 (-6 %)	2218	27,01
Скорость теплоносителя на входе в реактор $w_{вх}$, м/с	5,64 (баз.)	2246	27,36
	5,98 (+6 %)	> 2250	—
	5,3 (-6 %)	2230	28,14
Шаг твэлов δ , см	1,275 (баз.)	2246	27,36
	1,313 (+3 %)	> 2250	—
	1,237 (-3 %)	2235	27,81
Диаметр центрального отверстия таблетки $d_{отв}$, см	0,14 (баз.)	2246	27,36
	0,168 (+20 %)	> 2250	—
	0,112 (-20 %)	2074	25,52
	0,136 (-3 %)	2215	26,98

3.9. Уточненный анализ чувствительности модели поврежденности

В работе [29] выполнен уточненный анализ чувствительности оценки поврежденности $\omega(\tau)$ оболочки твэла к неопределенности в задании входных параметров модели. Основные факторы, определяющие $\omega(\tau)$, найдены для комбинированного цикла нагружения ВВЭР-1000 вычислив усредненную относительную разницу $\delta A_{i,\pm}(\tau)$ между удельной энергией рассеяния $A_{i,\pm}(\tau)$ для

Таблица 3.12

Влияние неопределенности параметров 3-й группы на τ_0 и A_0

Параметр исходных данных	Численная величина параметра	τ_0 , эф. сут	A_0 , МДж/м ³
Наружный диаметр оболочки $d_{об}^н$, см	0,91 (базовая величина)	2246	27,36
	0,919 (увеличение на 1 %)	> 2250	—
	0,901 (уменьшение на 1 %)	2167	26,27
Диаметр таблетки $d_{таб}$, см	0,757 (баз.)	2246	27,36
	0,765 (+ 1 %)	2186	26,58
	0,749 (-1 %)	> 2250	—
Максимальная линейная мощность q_l^{max} , Вт/см (100 % мощности)	248 (баз.), средняя плотность потока быстрых нейтронов: $\langle \Phi \rangle = 1 \cdot 10^{14} \text{ 1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})}$	2246	27,36
	298 (+20 %), $\langle \Phi \rangle = 1,2 \cdot 10^{14} \text{ 1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})}$	1576	37,69
	198 (-20 %), $\langle \Phi \rangle = 0,8 \cdot 10^{14} \text{ 1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})}$	> 2250	—
Температура теплоносителя на входе в реактор $t_{вх}$, °C	290 (баз.)	2246	27,36
	307 (+6 %)	2136	33,05
	273 (-6 %)	> 2250	—
	299 (+3 %)	2190	30,37
Материал оболочки	SR-циркалой (баз.)	2246	27,36
	RA- циркалой	1447	10,09

набора параметров $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{i,0} \pm \Delta X_i, \dots, X_{k,0}\}$ и удельной энергией рассеяния $A_B(\tau)$ для базового набора параметров $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{i,0}, \dots, X_{k,0}\}$:

$$\delta A_{i,\pm}(\tau) = \frac{|A_{i,+}(\tau) - A_B(\tau)| + |A_{i,-}(\tau) - A_B(\tau)|}{2 \cdot A_B(\tau) \cdot \Delta X_i}, \quad (3.9)$$

где τ – время (эф. сут); ΔX_i – отклонение i -го варьируемого параметра, %.

Вычислив $\delta A_{i,\pm}(\tau)$ для центрального АС средненагруженного твэла после эксплуатации РУ в течение 5,48 эф. лет, выделены детерминирующие факторы (ДФ) с $\delta A_{i,\pm} > 0,1$ (табл. 3.13). Главными ДФ являются $q_{l,max}$ и $T_{вх}$, что создает предпосылку для управления свойствами твэлов [29]. После эксплуатации РУ по комбинированному циклу нагружения в течение 4,32 эф. лет, $A(\tau)$ в центральном АС оболочки средненагруженного твэла ТВС-А увеличивается с 15,6 до 37,69 МДж/м³, если $q_{l,max}$ увеличивается с 248 до 298 Вт/см (табл. 3.14) [23].

Таблица 3.13

Основные ДФ

№	ДФ	$\delta A_{i,\pm}$	Направленность
1	максимальная линейная мощность в твэле $q_{l,\max}$	18,7	при $q_{l,\max} \uparrow, \omega(\tau) \uparrow$
2	температура теплоносителя на входе ВВЭР $t_{\text{вх}}$	5,6	при $t_{\text{вх}} \uparrow, \omega(\tau) \uparrow$
3	наружный диаметр оболочки $d_{\text{об}}^n$	4,19	при $d_{\text{об}}^n \uparrow, \omega(\tau) \downarrow$
4	диаметр таблетки $d_{\text{таб}}$	2,15	при $d_{\text{таб}} \uparrow, \omega(\tau) \uparrow$
5	толщина оболочки a	1,8	при $a \uparrow, \omega(\tau) \downarrow$
6	шаг решетки твэлов δ	0,83	при $\delta \uparrow, \omega(\tau) \downarrow$
7	скорость теплоносителя на входе ВВЭР $w_{\text{вх}}$	0,74	при $w_{\text{вх}} \uparrow, \omega(\tau) \downarrow$
8	диаметр центрального отверстия таблетки $d_{\text{отв}}$	0,35	при $d_{\text{отв}} \uparrow, \omega(\tau) \downarrow$
9	коэффициент теоретической плотности UO_2 k_{UO_2}	0,3	при $k_{\text{UO}_2} \uparrow, \omega(\tau) \downarrow$
10	начальное давление He под оболочкой $P_{\text{He},0}$	0,27	при $P_{\text{He},0} \uparrow, \omega(\tau) \uparrow$
11	давление теплоносителя на входе ВВЭР $P_{\text{вх}}$	0,13	при $P_{\text{вх}} \uparrow, \omega(\tau) \downarrow$

Таблица 3.14

A(τ) для стационарного и комбинированного нагружения РУ

Нагружение	$q_{l,\max}$, Вт/см				
	248	258	263	273	298
Стационарное	20,02	23,18	25,07	29,41	44,78
Комбинированное	15,6	18,65	20,13	23,75	37,69

Комбинированный цикл имеет преимущество с точки зрения долговечности оболочек по сравнению со стационарной эксплуатацией РУ. Для управления свойствами твэлов большое значение также имеют ДФ, задаваемые на стадии проектирования АКЗ (табл. 3.13).

3.10. Принцип совместного учета безопасности и экономичности

Для определения наиболее эффективного режима эксплуатации твэлов ВВЭР необходим критерий эффективности, конструируемый на основе системного подхода. Состояние ВВЭР как системы характеризуется [37]:

- состоянием отдельных элементов;

– структурой системы, то есть динамическими и функциональными связями между элементами;

– интегральными технико-экономическими характеристиками системы;

– надежностью управления системой.

Следовательно, для эффективности эксплуатации твэлов ВВЭР необходимо обеспечивать:

1) Целостность и безопасность ключевых элементов системы – целесообразно контролировать $\omega(\tau)$;

2) Стабильность динамических процессов, определяющих выполнение функций ВВЭР – целесообразно контролировать стабильность аксиального распределения энерговыделения в АКЗ, оцениваемую через стабильность АО;

3) Высокий уровень технико-экономических показателей эксплуатации ВВЭР – целесообразно контролировать КИУМ;

4) Высокий уровень надежности управления ВВЭР – целесообразно контролировать вероятность безотказной эксплуатации $P_{\text{в/о}}$ всех систем управления N .

Введем следующие параметры:

$$\omega^* = |\omega - 1|, \quad (3.10)$$

где ω , ω^* – поврежденность и приведенная поврежденность оболочки, соответственно.

$$AO^* = 1 - |\Delta AO|, \quad (3.11)$$

где $|\Delta AO|$ – амплитуда изменения АО при маневре; AO^* – приведенный АО.

$$КИУМ^* = КИУМ \cdot \frac{10}{N_{\text{пер}} + 10}, \quad (3.12)$$

где КИУМ* – приведенный КИУМ, учитывающий суммарное время простоев; $N_{\text{пер}}$ – число суток простоя РУ, приходящееся на каждые 10 суток эксплуатации ВВЭР-1000 при $N_{\text{ном}}$; КИУМ – коэффициент использования установленной мощности РУ без учета времени простоев.

$$P_{\text{в/о}}^* = \prod_{i=1}^m P_{\text{в/о},i}, \quad (3.13)$$

где $P_{6/o,i}$ – интегральная вероятность безотказной работы всех систем управления N (с учетом вероятности ошибок персонала), обеспечивающих маневрирование N в ходе i -го переключения (оперативного действия); m – число переключений при маневрировании N .

Используя параметры $\{\omega^*; AO^*; КИУМ^*; P_{6/o}^*\}$ в качестве компонентов критерия эффективности алгоритма маневрирования N , точка с координатами $(\omega^* = 1; AO^* = 1; КИУМ^* = 1; P_{6/o}^* = 1)$ соответствует предельному наилучшему режиму эксплуатации, а $(\omega^* = 0; AO^* = 0; КИУМ^* = 0; P_{6/o}^* = 0)$ – предельному наихудшему режиму. Принимая минимально допустимые значения $(\omega_{lim}^*; AO_{lim}^*; КИУМ_{lim}^*; P_{6/o,lim}^*)$, задаются диапазоны значений компонентов критерия $\{\omega^*; AO^*; КИУМ^*; P_{6/o}^*\}$:

$$\omega_{lim}^* \leq \omega^* \leq 1; AO_{lim}^* \leq AO^* \leq 1; КИУМ_{lim}^* \leq КИУМ^* \leq 1; P_{6/o,lim}^* \leq P_{6/o}^* \leq 1. \quad (3.14)$$

Для наглядности область допустимых значений компонентов $\{\omega^*; AO^*; КИУМ^*; P_{6/o}^*\}$ удобно представить без учета компонента $P_{6/o}^*$, что соответствует идеальному случаю $P_{6/o}^* = 1$ (рис. 3.15).

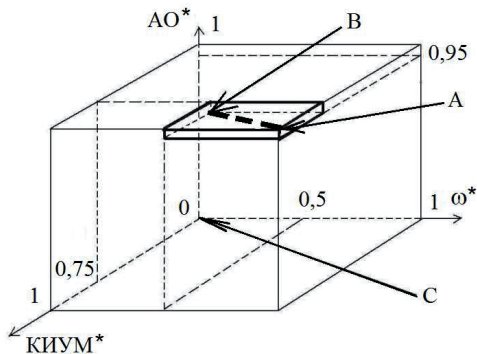


Рис. 3.15. Допустимая область эксплуатации ВВЭР-1000 в пространстве $\{\omega^*; AO^*; КИУМ^*\}$: А, В, С – предельные лучший (1; 1; 1), допустимый $(\omega_{lim}^*; AO_{lim}^*; КИУМ_{lim}^*)$ и худший (0; 0; 0) режимы, соответственно

На рис. 3.15 компоненты комплексного критерия ограничены следующими

минимально допустимыми значениями:

$$\omega_{\text{lim}}^* = 0,5; \text{AO}_{\text{lim}}^* = 0,95; \text{КИУМ}_{\text{lim}}^* = 0,75 . \quad (3.15)$$

Во всех допустимых переменных режимах эксплуатации точка $(\omega_i^*; \text{AO}_i^*; \text{КИУМ}_i^*; P_{6/o,i}^*)$ остается в пределах прямоугольного объема с диагональю АВ, при улучшении i -го алгоритма маневрирования эта точка стремится к точке А, а при ухудшении – к точке В. Мерой эффективности j -го алгоритма является близость точки $(\omega_j^*; \text{AO}_j^*; \text{КИУМ}_j^*; P_{6/o,j}^*)$ к точке А, определяемая

$$\text{Eff}_j = 1 - L_j / L_{\text{lim}} , \quad (3.16)$$

где
$$L_j = \sqrt{(1 - \text{КИУМ}_j^*)^2 + (1 - \omega_j^*)^2 + (1 - \text{AO}_j^*)^2 + (1 - P_{6/o,j}^*)^2} ; \quad (3.17)$$

$$L_{\text{lim}} = \sqrt{(1 - \text{КИУМ}_{\text{lim}}^*)^2 + (1 - \omega_{\text{lim}}^*)^2 + (1 - \text{AO}_{\text{lim}}^*)^2 + (1 - P_{6/o,\text{lim}}^*)^2} ; \quad (3.18)$$

Таким образом, критерий (3.16) позволяет численно оценивать эффективность алгоритма маневрирования N , анализируя состояние ВВЭР с учетом показателей состояния элементов, структуры, экономичности и надежности управления. Это позволяет одновременно учитывать требования целостности твэлов, стабильности АО, экономичности и управляемости ВВЭР. Используя (3.16), проведен модельный эксперимент по выбору наиболее эффективного алгоритма маневрирования N .

Рассматривались апробированный на Хмельницкой АЭС алгоритм суточного манёвра мощностью ($j=1$) и альтернативный алгоритм ($j=2$).

Апробированный алгоритм выполнялся по ПР с $p_{\text{П}} = \text{const}$ (П2). Для поддержания N при разгрузке, в процессе отравления реактора вводился чистый конденсат. За 3 часа (с 23.00 до 2.00) операторы 6 раз включали подпитку чистого конденсата. Количество переключений m_1 составило:

$$m_1 = 140. \quad (3.19)$$

Количество переключений m_2 по альтернативному алгоритму равно [34]:

$$m_2 = 40. \quad (3.20)$$

С учетом вероятности ошибок персонала, на Запорожской АЭС средняя вероятность отказа системы управления, обеспечивающей маневрирование N , в

ходе i -го переключения составляет 0,001 [34]. Тогда

$$P_{\delta/o,i} = 0,999, \quad (3.21)$$

где $i = \overline{1, m_j}$; j – номер алгоритма маневрирования N .

Используя выражения (3.13) и (3.21), имеем:

$$P_{\delta/o,1}^* \approx 0,869. \quad (3.22)$$

$$P_{\delta/o,2}^* \approx 0,961. \quad (3.23)$$

Пусть заданы следующие минимально допустимые значения:

$$\omega_{\text{lim}}^* = 0,5; \text{AO}_{\text{lim}}^* = 0,95; \text{КИУМ}_{\text{lim}}^* = 0,75; P_{\delta/o,\text{lim}}^* = 0,95 \quad (3.24)$$

Тогда по (3.18):

$$L_{\text{lim}} = 0,563. \quad (3.25)$$

Применяя ЭВТП-метод, получены зависимости $A(n_e)$ для рассматриваемых алгоритмов (рис. 3.16) [37].

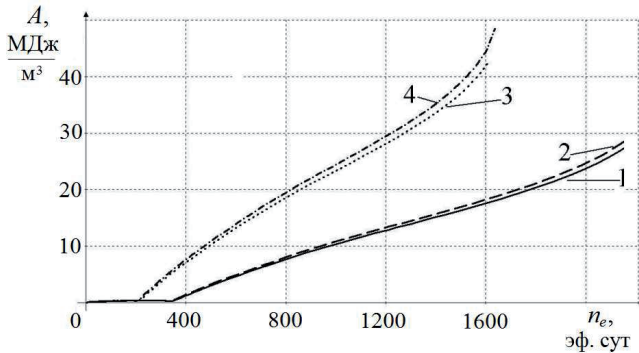


Рис. 3.16. Зависимость $A(n_e)$: 1, 3 – апробированный алгоритм для $q_{l,\text{max}} = 248$ и 298 Вт/см, соответственно; 2, 4 – альтернативный алгоритм для $q_{l,\text{max}} = 248$ и 298 Вт/см, соответственно

Определение момента потери устойчивости $\tau_{0,2}$ материала оболочки усредненного твэла ТВС-А при $q_{l,\text{max}} = 298$ Вт/см поясняется на рис. 3.17.

Для $q_{l,\text{max}} = 248$ и 298 Вт/см получены характеристики алгоритмов после 1000 эф. сут (КИУМ* рассчитывался при $N_{\text{пер}} = 2$) – табл. 3.15, 3.16.

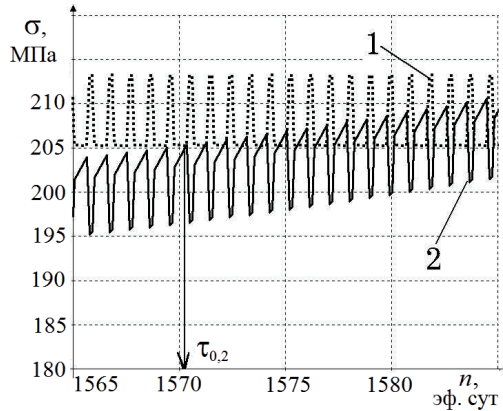


Рис. 3.17. Определение $\tau_{0,2}$ для альтернативного алгоритма:

1 – предел текучести $\sigma_0^{\max}(\tau)$; 2 – эквивалентное напряжение $\sigma_e^{\max}(\tau)$

Таблица 3.15

Характеристики апробированного и альтернативного алгоритмов

$q_{l,\max}$, Вт/см	Алгоритм	$ \Delta AO $, %	КИУМ	A_0 , МДж/м ³	τ_0 , эф. сут	ω
248	апробированный	3	0,929	29,59	2228	0,351
	альтернативный	0,3	0,942	30,29	2209	0,357
298	апробированный	3	0,929	41,15	1589	0,567
	альтернативный	0,3	0,942	42,43	1570	0,576

Таблица 3.16

Эффективность апробированного и альтернативного алгоритмов

$q_{l,\max}$, Вт/см	Алгоритм	ω^*	КИУМ*	АО*	$P_{\sigma/\sigma}^*$	Eff
248	апробированный	0,649	0,774	0,97	0,869	–
	альтернативный	0,643	0,785	0,997	0,961	0,256
298	апробированный	0,433	0,774	0,97	0,869	–
	альтернативный	0,424	0,785	0,997	0,961	–

Если при $q_{l,\max} = 248$ Вт/см точка (ω_j^* ; AO_j^* ; $КИУМ_j^*$; $P_{\sigma/\sigma,j}^*$) после 1000 эф. сут находится в пределах допустимой области для $j=2$, то при $q_{l,\max} = 298$ Вт/см оба алгоритма характеризуются выходом (ω_j^* ; AO_j^* ; $КИУМ_j^*$; $P_{\sigma/\sigma,j}^*$) за допустимые пределы, показанные на рис. 3.15.

Поскольку значение $q_{l,max}=298$ Вт/см соответствует максимально нагруженным твэлам в ТВС-А ВВЭР-1000, то в рамках ограничений (3.24) недопустима эксплуатация РУ в течение 1000 эф. сут по обоим рассмотренным алгоритмам. Этот подход, основанный на задании в качестве входного параметра модели расчета $\omega(\tau)$ величины $q_{l,max}$ в максимально нагруженных твэлах ТВС, позволяет определить допустимую длительность $T_{доп}$ эксплуатации ВВЭР. Задавая $q_{l,max} = 298$ Вт/см, $T_{доп, j}$ определяется исходя из требования нахождения точки $(\omega_j^*; AO_j^*; КИУМ_j^*; P_{6/o,j}^*)$ в допустимой области (табл. 3.17).

Таблица 3.17

Компоненты критерия эффективности алгоритма

j	T , эф. сут	ω^*	КИУМ*	АО*	$P_{6/o}^*$	L	Eff
2	500	0,744	0,785	0,997	0,961	0,337	0,401
	600	0,672	0,785	0,997	0,961	0,394	0,3
	700	0,604	0,785	0,997	0,961	0,452	0,197
	800	0,541	0,785	0,997	0,961	0,508	0,098
	870 ($T_{доп,2}$)	0,5	0,785	0,997	0,961	0,546	0,03
	882	0,493	0,785	0,997	0,961	—	—

В работе [37] был сделан вывод, что альтернативный алгоритм имеет преимущество перед апробированным, поскольку при сохранении долговечности оболочки на том же уровне, характеризуется более высокими показателями КИУМ, стабильности АО, надежности системы управления РУ.

В этой связи необходимо сделать следующее уточнение. Как уже отмечалось, подход к сравнению долговечности оболочки твэла в различных режимах нагружения РУ на основе расчета числа эффективных суток до начала стадии ускоренной ползучести, применявшийся в ранних работах по ЭВТП-методу, в дальнейшем показал свою несостоятельность.

Также нецелесообразно сравнивать долговечность оболочки твэла в различных режимах нагружения РУ на основе расчета числа эффективных суток до достижения некоторого предельно допустимого значения ω_{lim} . Например,

значение $\omega_{\text{lim}} = 0,5$ достигается для апробированного и альтернативного алгоритмов при $T_{\text{доп},1} = 882$ эф. сут и $T_{\text{доп},2} = 870$ эф. сут, соответственно. Это дает относительную разницу $(T_{\text{доп},1} - T_{\text{доп},2}) / T_{\text{доп},1}$ около 1 %, находящуюся в пределах численной погрешности расчетной модели. Поэтому, как отмечено в п. 3.6, при дальнейшем развитии ЭВП-метода для сравнительной оценки долговечности оболочки твэла в переменном режиме использовался критерий на основе выражений (2.11) и (3.1), где рассчитывалась величина $\omega(\tau)$ в виде функции от числа календарных, а не эффективных суток [15, 16, 29, 39].

3.11. Задача о максимально нагруженном АС оболочки

В первых работах по ЭВП-методу в качестве допущения принималось, что максимально нагруженным с точки зрения напряженно-деформированного состояния является центральный АС твэла, для которого и выполнялся расчет $\omega(\tau)$. При числе АС $n = 8$ центральным является АС 5.

Однако, из-за размещения ОР в верхней части АКЗ ВВЭР-1000 следует ожидать, что наиболее значительные относительные скачки $q_{l,\text{max}}$ при увеличении N будут в верхней части АКЗ. Кроме того, на величину $\omega(\tau)$ значительное влияние оказывает температура теплоносителя t , которая для АС 6 больше, чем для АС 5 (с ростом аксиальной координаты z номер АС увеличивается).

С одной стороны, стационарная величина $q_{l,\text{max}}$ в АС 5 больше, чем в АС 6. С другой стороны, величина t и относительные скачки $q_{l,\text{max}}$ в АС 5 меньше, чем в АС 6. Поскольку есть основания предположить, что максимум $\omega(\tau)$ находится не в АС 5, а в АС 6, для более корректного анализа $\omega(\tau)$ в переменном режиме необходимо найти аксиальное распределение $\omega(\tau)$ в оболочке твэла.

3.12. Определение амплитуды скачка мощности АС твэла

Амплитуда скачка мощности АС твэла ВВЭР-1000 при увеличении N от 80

до 100 % $N_{\text{ном}}$ определена для альтернативного алгоритма.

Допущения анализа:

1) При увеличении N от 80 до 100 % $N_{\text{ном}}$ изменяется положение лишь 10-й группы ОР, другие группы ОР при маневре N полностью выведены из АКЗ.

2) Используются У-алгоритм и альтернативный алгоритм.

3) Положение 10-й группы ОР для $N= 80$ и 100 % $N_{\text{ном}}$ задавалось 84 и 90 % от низа АКЗ, соответственно.

4) Используются верифицированные ПС: Имитатор реактора (ИР) – для расчета амплитуды скачка мощности АС твэла [38], FEMAXI – для расчета напряжений и деформаций в оболочке твэла [30].

Задавая режимные характеристики РУ ВВЭР-1000 в соответствии с [19], найдено, что все ТВС по амплитуде увеличения их мощности, при росте N от 80 до 100 % $N_{\text{ном}}$, условно делятся на три группы (табл. 3.18) [23].

Таблица 3.18

Увеличение мощности ТВС

Группа	Количество ТВС	Рост мощности ТВС, %	Порядковый номер ячейки АКЗ
1	6	28	31, 52, 58, 106, 112, 133
2	37	26–27	20, 42, 43, 46, 51, 53...57, 66...71, 80...84, 93...98, 107...111, 113, 118, 121, 122, 144
3	120	≤ 25	все остальные

В реакторе ВВЭР-1000 свежие ТВС и центральная ТВС находятся под регулированием только в том случае, если при маневрировании N , кроме 10-й группы ОР СУЗ, применяются 8-я и 9-я группы – рис. 3.18 [40]. Если при маневрировании N применяется только 10-я группа ОР, примером неблагоприятной для целостности оболочек последовательности перестановок ТВС может считаться следующая: в течение 1-го года ТВС стоит в ячейке 55 АКЗ – в составе 2-й группы ТВС; в течение 2-го года ТВС стоит под регулированием в ячейке 31 – 1-я группа; в течение 3-го года ТВС стоит в ячейке 69 – 2-я группа; в течение 4-го года ТВС стоит в центральной ячейке 82 – 2-я группа.

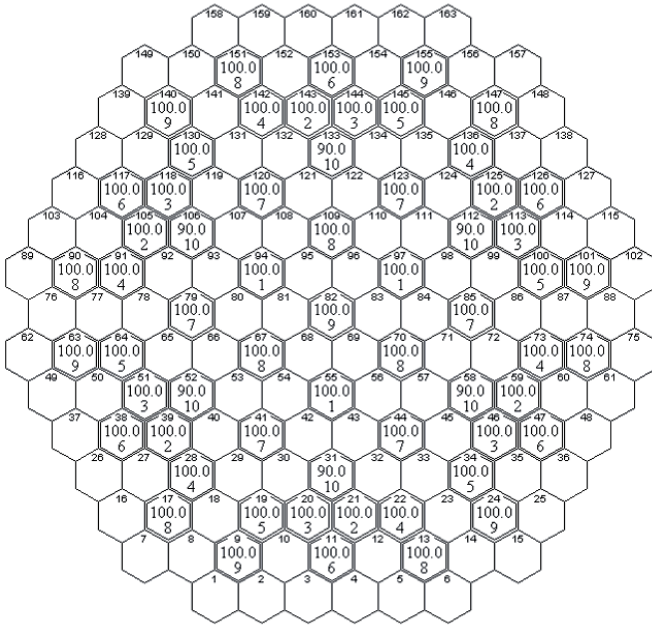


Рис. 3.18. Размещение ОР в АКЗ ВВЭР-1000 для У-алгоритма: верхняя, средняя и нижняя цифра – номер ТВС, положение группы ОР (% от низа АКЗ), номер группы ОР, соответственно

Для $N = 80$ и $100\% N_{\text{ном}}$ найдена средняя линейная мощность $\langle q_{l,j} \rangle$ ТВС ячеек 55, 31, 69, 82 – табл. 3.19.

Таблица 3.19

Средняя линейная мощность ТВС 55, 31, 69, 82 при $N = 80$ и 100%

j	55		31		69		82	
$N, \%$	80	100	80	100	80	100	80	100
$Q_j, \text{МВт}$	17,96	22,64	18,26	23,37	13,25	16,75	9,276	11,78
$\langle q_{l,j} \rangle, \text{Вт/см}$	164,5	207,3	167,2	214	121,4	153,4	84,95	107,9

На основе (2.2)–(2.4) рассчитано изменение $\langle q_{l,i,j} \rangle$ для всех аксиальных слоев ТВС при изменении N от 100 до $80\% N_{\text{ном}}$ (рис. 3.19–3.22). При уменьшении числа АС в твэле n от 12 до 8, расчетная оценка $\omega(\tau)$ менялась менее чем на 1%, поэтому было принято: $n = 8$, 1 АС содержит 2 аксиальных слоя.

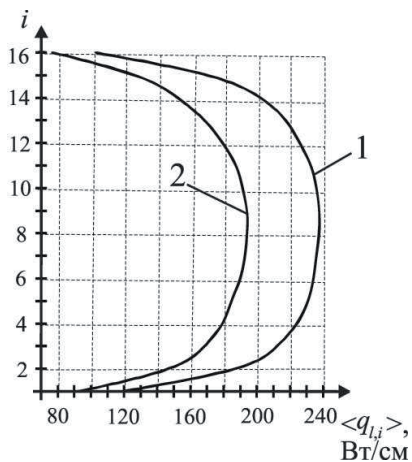


Рис. 3.19. Распределение $\langle q_{l,i,55} \rangle$ по аксиальным слоям ТВС 55:
1 – $N = 100\%$; 2 – $N = 80\%$

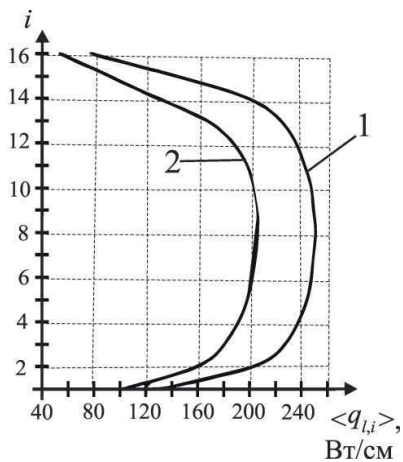


Рис. 3.20. Распределение $\langle q_{l,i,31} \rangle$ по аксиальным слоям ТВС 31:
1 – $N = 100\%$; 2 – $N = 80\%$

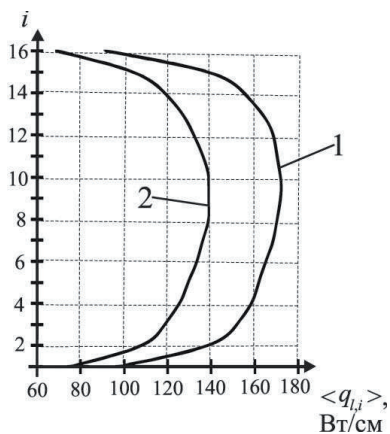


Рис. 3.21. Распределение $\langle q_{l,i,69} \rangle$ по аксиальным слоям ТВС 69:
1 – $N = 100\%$; 2 – $N = 80\%$

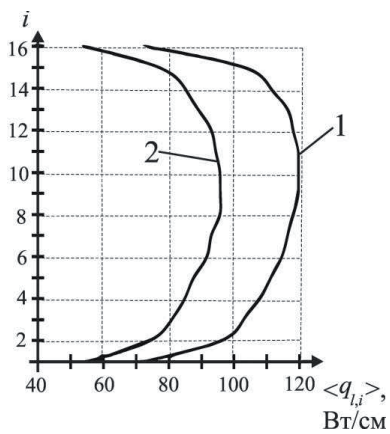


Рис. 3.22. Распределение $\langle q_{l,i,82} \rangle$ по аксиальным слоям ТВС 82:
1 – $N = 100\%$; 2 – $N = 80\%$

При $N=80$ и 100% $N_{\text{ном}}$ рассчитаны средние значения линейной мощности $\langle q_{l,i,j} \rangle$ в АС i ТВС j . Отношение $\langle q_{l,i,j} \rangle (100\%) / \langle q_{l,i,j} \rangle (80\%)$ для АС ТВС, размещенных в указанных ячейках АКЗ, приведено в табл. 3.20.

Таблица 3.20

Отношение $\langle q_{l,i,j} \rangle (100\%) / \langle q_{l,i,j} \rangle (80\%)$

j		55	31	69	82
i	8	1,341	1,517	1,328	1,340
	7	1,308	1,426	1,297	1,309
	6	1,250	1,241	1,263	1,268
	5	1,229	1,213	1,238	1,250
	4	1,224	1,217	1,232	1,242
	3	1,241	1,229	1,243	1,259
	2	1,255	1,251	1,271	1,270
	1	1,278	1,275	1,288	1,302

Для АС 1 и 8 максимум различия в $\langle q_{l,i,j} \rangle (100\%) / \langle q_{l,i,j} \rangle (80\%)$ был в ТВС ячейки 31, находящейся под регулированием.

3.13. Расчет аксиального распределения поврежденности оболочки

Распределение $q_l(z)$ при расчете аксиального распределения $\omega(\tau)$ задавалось по выражению (2.4). Коэффициенты относительной мощности k_i для АС приведены в табл. 3.21.

Таблица 3.21

Коэффициенты относительной мощности для АС

j	55		31		69		82	
$N, \%$	80	100	80	100	80	100	80	100
$q_{l,max}, \text{Вт/см}$	193,5	236,8	205,6	250,3	138,8	171,9	95,71	119,6
i	k_i							
8	0,526	0,576	0,354	0,441	0,622	0,667	0,683	0,733
7	0,829	0,886	0,721	0,845	0,884	0,926	0,908	0,952
6	0,948	0,968	0,938	0,956	0,966	0,985	0,979	0,993
5	0,996	1	0,997	0,993	1	1	1	1
4	1	1	1	1	0,991	0,985	0,986	0,980
3	0,968	0,982	0,974	0,983	0,947	0,951	0,937	0,944
2	0,899	0,921	0,905	0,929	0,879	0,902	0,866	0,880
1	0,620	0,647	0,636	0,666	0,660	0,686	0,676	0,705

ЭВТП-критерий разгерметизации оболочки твэла записывался в виде, поз-

воляющем учесть прочностной критерий приемки твэла SC2:

$$\omega(\tau) = A(\tau)/A_0 = 1; A(\tau) = \int_0^\tau \sigma_e \cdot \dot{p}_e \cdot dt; \sigma_e^{\max}(\tau_0) = \eta \cdot \sigma_0^{\max}(\tau_0). \quad (3.26)$$

Используя критерий (3.26) при $\eta = 1$, получено аксиальное распределение $\omega(\tau)$ при размещении ТВС в ячейке 55 в течение всего времени (алгоритм перестановок 55-55-55-55), а также при размещении в ячейке 55 только в течение первых 360 сут, а в течение последующего времени – в ячейке 31 (алгоритм перестановок 55-31-31-31) – рис. 3.23, 3.24.

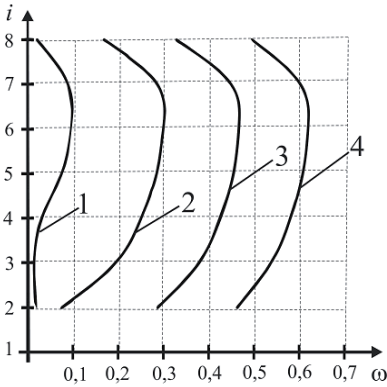


Рис. 3.23. Аксиальное распределение $\omega(\tau)$ при алгоритме 55-55-55-55: 1 – 360 сут; 2 – 720 сут; 3 – 1080 сут; 4 – 1440 сут

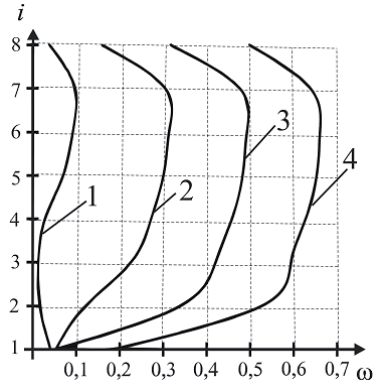


Рис. 3.24. Аксиальное распределение $\omega(\tau)$ при алгоритме 55-31-31-31: 1 – 360 сут; 2 – 720 сут; 3 – 1080 сут; 4 – 1440 сут

При алгоритмах перестановок 55-55-55-55 и 55-31-31-31 наибольшее значение $\omega(\tau)$ достигается для АС 6 и 5. При алгоритмах 55-31-69-69 и 55-31-69-82, наибольшее значение $\omega(\tau)$ достигается также для АС 6 и 5.

При алгоритме перестановок 55-55-55-55 потери устойчивости оболочки в соответствии с (3.26), $\eta = 1$ для АС 1 не происходит до $\tau = 2480$ сут. При размещении ТВС в течение первых 360 сут в ячейке 55, в течение следующих 360 сут – в ячейке 31, а в течение остального времени – в ячейке 69 (алгоритм перестановок 55-31-69-69), для всех АС потери устойчивости оболочки при $\eta = 1$ не происходит до $\tau = 2480$ сут (при $\tau > 2480$ сут расчет не выполнялся) – табл. 3.22.

Таблица 3.22

**Эквивалентное напряжение и предел текучести оболочки для
 $\tau = 2480$ сут при алгоритме 55-31-69-69**

АС	8	7	6	5	4	3	2	1
$\sigma_e^{\max}(\tau)$,	154,5	173,8	177,9	175,6	169,3	160,2	145,5	84,48
$\sigma_0^{\max}(\tau)$,	224,8	220	219,6	220,3	221,6	223,3	225,3	230,9

При алгоритме перестановок 55-31-69-82 для всех АС потери устойчивости оболочки при $\eta = 1$ также не происходит до $\tau = 2495$ сут (при $\tau > 2495$ сут расчет не выполнялся) – табл. 3.23.

Таблица 3.23

**Эквивалентное напряжение и предел текучести оболочки
для $\tau = 2495$ сут при алгоритме 55-31-69-82**

АС	8	7	6	5	4	3	2	1
$\sigma_e^{\max}(\tau)$, МПа	115,0	135,1	140,5	138,8	133,3	124,6	105,8	34,02
$\sigma_0^{\max}(\tau)$, МПа	230,2	227,4	227,5	228,1	229,1	230,4	232,0	235,3

Получено аксиальное распределение $\omega(\tau)$ в АС 4...7 при алгоритмах перестановок 55-31-69-69 ($\eta = 0,75$) и 55-31-69-82 ($\eta = 0,6$) – рис. 3.25 и 3.26.

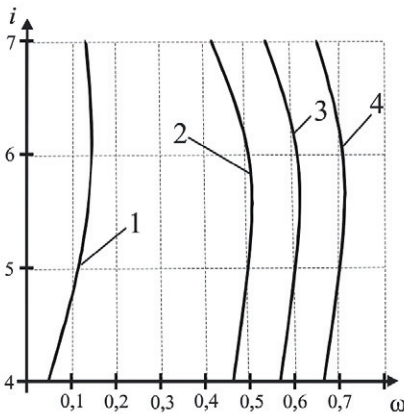


Рис. 3.25. Аксиальное распределение $\omega(\tau)$ при алгоритме 55-31-69-69: 1 – 360 сут; 2 – 720 сут; 3 – 1080 сут; 4 – 1440 сут

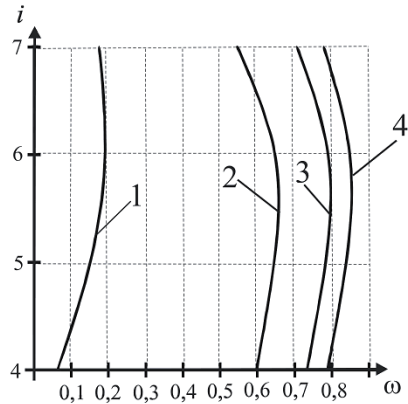


Рис. 3.26. Аксиальное распределение $\omega(\tau)$ при алгоритме 55-31-69-82: 1 – 360 сут; 2 – 720 сут; 3 – 1080 сут; 4 – 1440 сут

При $\eta = 0,75$ для АС 8, а также для АС 1...3, при алгоритме 55-31-69-69 момент τ_0 не достигался до $\tau = 2480$ сут. При $\eta = 0,6$ для АС 8, а также для АС 1...3, при алгоритме 55-31-69-82 момент τ_0 не достигался до $\tau = 2495$ сут.

Итак, при условном разбиении длины твэла на 8 равных АС, АС 6 и 5 характеризуются наибольшей вероятностью разгерметизации оболочки твэла. То есть, учитывая циклическое изменение N и режимных параметров ВВЭР-1000 для альтернативного алгоритма, принимая во внимание размещение ОР в АКЗ для У-алгоритма, учитывая перестановки ТВС в ходе 4-летнего топливного цикла, получено, что $\omega(\tau)$ максимальна в АС оболочки, расположенных между координатами $z = 1,8$ и $2,7$ м, считая от нижнего края нижней топливной таблетки твэла. Локализация АС с максимумом $\omega(\tau)$ создала предпосылку для разработки метода управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР [29].

Выполненные расчеты аксиального распределения $\omega(\tau)$ показали, что ЭВТП-критерий (3.26) требует модификации, поскольку

1) При учете алгоритма перестановок ТВС момент потери устойчивости материала оболочки по условию $\sigma_e^{\max}(\tau_0) = \sigma_0^{\max}(\tau_0)$ не достигается до $\tau \approx 6,8$ лет (при больших τ анализ не проводился), что вынуждает вводить числовой параметр $\eta \leq 1$;

2) На основе критерия (3.26) не удастся удовлетворить необходимое для управления ресурсом оболочек твэлов требование

$$\sigma_e(\tau_0) = \eta \cdot \sigma_0(\tau_0); \eta = \text{idem}; \omega \leq 1. \quad (3.3)$$

3.14. Влияние коррозии оболочки на поврежденность

При разработке ЭВТП-метода в качестве допущения принято, что существует устойчивая тенденция к снижению влияния коррозии оболочки со стороны теплоносителя на долговечность оболочки, за счет уже разработанных методов оптимизации состава и технологии производства материала оболочки. Тем не

менее, необходимо оценить влияние толщины окисного слоя оболочки со стороны теплоносителя на скорость накопления $\omega(\tau)$.

Для оценки скорости коррозии циркалоевой оболочки чаще всего используются модели EPRI и MATPRO-A [9]. Расчеты для условий АКЗ ВВЭР-1000 показали, что оценка скорости коррозии циркалоевой оболочки по модели MATPRO-A консервативнее аналогичной оценки по модели EPRI. Оценка скорости коррозии оболочки твэла, изготовленной из сплава Э-110, по моделям коррозии циркалоя-4 консервативна. Для варьирования модельной скорости коррозии использовался корректирующий параметр $k_{\text{cor}} = \text{var}$

$$\dot{S} = (1 + k_{\text{cor}}) \cdot \dot{S}, \quad (3.27)$$

где \dot{S} – скорость изменения толщины окисного слоя, мк/сут.

Используя модели коррозии MATPRO-A и EPRI, для алгоритма 55-31-69-82 и АС 6 получено, что время начала ускоренного роста ползучести при $k_{\text{cor}} = -0,4; 0; 1; 2$ существенно различное. При повышении скорости коррозии оболочки время начала ускоренной ползучести уменьшается (рис. 3.27) [14].

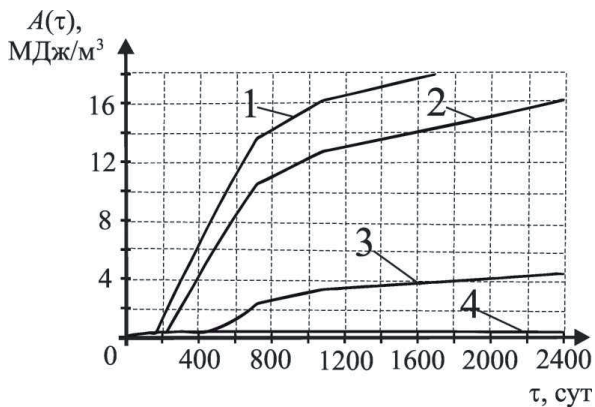


Рис. 3.27. Изменение удельной энергии рассеяния для АС 6, модель коррозии MATPRO-A: 1, 2, 3, 4 – $k_{\text{cor}} = 2, 1, 0, -0,4$, соответственно

Расчет для интервала времени $[0; 2400 \text{ сут}]$ средней температуры $\langle t_{\text{об,вн}} \rangle$ на внутренней поверхности оболочки (альтернативный алгоритм, АС 6, модель коррозии EPRI, алгоритм перестановок ТВС 55-31-69-82) позволил сделать вы-

вод, что зависимость $A(\tau)$ от скорости коррозии наружной поверхности оболоч-
ки коррелирует с зависимостью $\langle t_{об,вн} \rangle$ от скорости коррозии (табл. 3.24).

Таблица 3.24

$\langle t_{об,вн} \rangle$ в зависимости от $k_{кор}$

$k_{кор}$	2	1	0	-0,4
$\langle t_{об,вн} \rangle, ^\circ\text{C}$	396,2	394,5	390,7	381,8

В соответствии с моделью ползучести MATPRO-09, использованной в ПС FEMAXI, скорость эквивалентной деформации ползучести $\dot{p}_e(\tau)$ увеличивается при увеличении $\langle t_{об,вн} \rangle$. Следовательно, скорость коррозии оболочки со сто-
роны воды ($k_{кор}$) влияет на расчет $A(\tau)$ через $\dot{p}_e(\tau)$, зависящую от толщины
металлической фазы оболочки ($k_{кор}$).

Для $\Delta t = 11; 5; 2$ ч рассматривался цикл 100-80-100 % $N_{ном}$ (КИУМ=0,9):
снижение N от 100 до 80 % $N_{ном}$ в течение 1 ч $\rightarrow N = 80\%$ в течение Δt ч \rightarrow по-
вышение N до $N_{ном}$ в течение 1 ч $\rightarrow N = N_{ном}$ в течение Δt ч, что отвечает со-
ответственно $v=1; 2; 4$ цикл/сут ($v \ll 1$ Гц). Анализировался АС 6 среднена-
груженного твэла ТВС ячейки 55 (при $N = N_{ном}$ $q_l^{max} = 229,2$ Вт/см), модель кор-
розии EPRI ($k_{кор}=1, t_{вх}=\text{const}$). Расчет τ_0 в зависимости от v показал, что если
 $v \ll 1$ Гц и КИУМ=idem, то при увеличении v в 2-4 раза по сравнению со слу-
чаем $v=1$ цикл/сут, уменьшения τ_0 нет (увеличение τ_0 на 1–1,5 % характери-
зует систематическую погрешность расчета τ_0). При увеличении КИУМ от 0,9
до 1 получено значительное сокращение τ_0 – табл. 3.25.

Таблица 3.25

Изменение τ_0 для АС 6 в зависимости от v

$v, \text{цикл/сут}$	$\eta=0,4$		$\eta=0,6$	
	$A_0, \text{МДж/м}^3$	$\tau_0, \text{сут}$	$A_0, \text{МДж/м}^3$	$\tau_0, \text{сут}$
1	0,6341	542,6	10,05	1192
2	0,6466	545,8	10,09	1210
4	0,6428	549	–	–
0 (КИУМ=1)	0,8189	436,6	12,35	1026

Следовательно, результаты расчетов по ЭВТП-методу долговечности оболочки твэла в условиях АКЗ ВВЭР-1000 находятся в качественном соответствии с экспериментальными результатами [12, 27].

3.15. Достоверность расчета поврежденности по ЭВТП-методу

Результаты расчета $\omega(\tau)$ оболочки твэла ВВЭР по ЭВТП-методу являются достоверными, поскольку

1) Энергетический вариант теории ползучести является экспериментально подтвержденным [8, 27, 41, 42].

2) Преобладание процесса ползучести в деформационном разрушении тонкой оболочки при частоте ее циклического нагружения $\ll 1$ Гц, при термомеханических нагрузках, близких к характерным для АКЗ реактора типа ВВЭР, доказано несколькими независимыми экспериментами [12, 27].

3) ЭВТП-метод учитывает ползучесть как основной физический процесс деформационного разрушения оболочки твэла и последовательность совокупностей факторов, детерминирующих $\omega(\tau)$.

4) Коэффициент запаса для ЭВТП-критерия в 5 раз меньше коэффициента запаса для критерия SC4.

5) ЭВТП-метод подразумевает учет ограничений по всем существующим критериям приемки твэла, за исключением SC4.

6) Результаты расчетов $\omega(\tau)$ по ЭВТП-методу соответствуют экспериментальным результатам [12, 27] на качественном уровне.

7) В ЭВТП-методе используются верифицированные ПС.

8) Методология управления свойствами твэлов ВВЭР на основе учета $\omega(\tau)$ создана на примере широко применяемого в качестве материала оболочки твэла циркониевого сплава циркалой-4, для описания изменения свойств которого в условиях АКЗ реактора типа ВВЭР существуют универсальные и проверенные временем эмпирические зависимости.

Для обеспечения максимально высокой точности расчета $\omega(\tau)$ по ЭВТП-

методу требуется адаптация ПС, определяющего развитие напряженно-деформированного состояния в оболочке твэла, к конкретному материалу оболочки, применяемому в ТВС того или иного типа.

Необходимо подчеркнуть, что ЭВТП-метод подразумевает учет нормативных методов оценки долговечности оболочки твэла ВВЭР-1000, основанных на использовании лимитирующих зависимостей для критериев приемки твэла, разбитых на четыре группы (прочностные, деформационные, теплофизические и коррозионные критерии). Вместе с тем, главным препятствием к управлению поврежденностью $\omega(\tau)$ оболочек твэлов ВВЭР-1000 является принципиальная ошибочность прочностного критерия SC4, отражаемая в коэффициенте запаса $K=10$. Приняв вместо SC4 ЭВТП-критерий, имеющий $K=2$, сопоставимый с коэффициентами запаса для остальных критериев приемки твэла ($K=1 \dots 1,5$), становится возможным управлять величиной $\omega(\tau)$ ввиду не только уменьшения в 5 раз неопределенности расчета $\omega(\tau)$, но также в силу независимости лимитирующего компонента ЭВТП-критерия от условий нагружения твэла.

Использование критерия SC4, в принципе не позволяющего управлять поврежденностью оболочек, основано на сосредоточенной модели изменения $\omega(\tau)$. Напротив, внедрение ЭВТП-критерия обеспечивает переход к распределенной модели изменения $\omega(\tau)$. Это позволяет решить проблему управления поврежденностью оболочек твэлов при нормальной эксплуатации ВВЭР, с одновременным контролем выполнения ограничений по остальным критериям приемки твэла, имеющим коэффициент запаса в 5 и более раз меньше, чем SC4.

3.16. Сравнение оценок поврежденности по SC4 и ЭВТП-методу

В результате расчетов $A(\tau)$ в зависимости от скорости коррозии оболочки (модель МАТПРО-А) и алгоритма перестановок ТВС в АКЗ ВВЭР-1000 определено, что стадия ускоренного роста $A(\tau)$ наступает раньше, чем стадия ускоренного роста $\omega(\tau)$ для сплава Э-110 по данным работы [11] – рис. 3.28.

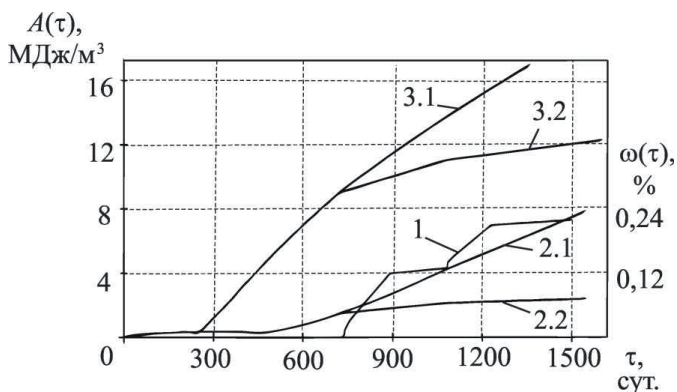


Рис. 3.28. Зависимости $A(\tau)$ [14] и $\omega(\tau)$ [11]: 1 – $\omega(\tau)$ для Э-110; 2.1, 2.2 – $A(\tau)$, $k_{\text{cor}}=0$; 3.1, 3.2 – $A(\tau)$, $k_{\text{cor}}=1$

На рис. 3.28: 2.1, 3.1– алгоритм перестановок ТВС 55-31-55-55; 2.2, 3.2 – алгоритм перестановок ТВС 55-31-69-82.

Однако, в работе [11] не приведены совокупность условий эксплуатации твэлов (алгоритм перестановок ТВС, характеристики ПР и т.д.) и значения ограничивающих компонентов критерия SC4 для этой совокупности условий, использованные при расчете $\omega(\tau)$.

Скорость роста $A(\tau)$ существенно зависит от алгоритма перестановок ТВС в АКЗ, что объясняется влиянием $q_{l,\text{max}}$ – одного из двух главных факторов, детерминирующих $\omega(\tau)$, и является предпосылкой для управления свойствами твэлов с учетом $\omega(\tau)$ при эксплуатации ВВЭР.

При $N = 100 \%$ для средненагруженного твэла ТВС ячеек 55; 31; 69; 82 $q_{l,\text{max}} = 236,8; 250,3; 171,9; 119,6$ Вт/см, соответственно. Следовательно, с точки зрения долговечности оболочки, алгоритм перестановок 55-31-55-55 является менее благоприятным, чем алгоритм 55-31-69-82.

При повышении скорости коррозии оболочки время наступления стадии ускоренной ползучести значительно уменьшается (рис. 3.28).

При использовании критерия SC4 подавляющий вклад в величину $\omega(\tau)$ вносит усталостная составляющая [11], что на качественном уровне не соответ-

ствует экспериментальным результатам [12, 27] и расчетам $\omega(\tau)$ по ЭВТП-методу [14].

Контроль максимального тангенциального напряжения σ_{θ}^{\max} , пластической деформации оболочки, а также максимальной температуры $t_{\text{ок,н}}^{\max}$ на наружной поверхности окисной пленки показал, что долговечность оболочки для исследованных условий не ограничивается по критериям SC1 и SC5, а также по условию $t_{\text{ок,н}}^{\max} \leq 352$ °C [19], что является примером использования ЭВТП-метода с учетом нормативных критериев.

Алгоритм перестановок 55-31-69-82 после 1500 сут характеризуется меньшей эквивалентной деформацией ползучести оболочки p_e , но также и меньшей глубиной выгорания топлива B , чем алгоритм 55-31-55-55 (табл. 3.26).

Таблица 3.26

B и p_e в АС 6 после 1500 сут

Параметр	55-31-69-82		55-31-55-55	
	0	1	0	1
B , МВт·сут/кг	57,4		71,4	
σ_e^{\max} , МПа (% от σ_0)	69,9 (33)	127,4 (61)	107,2 (51)	146,7 (70)
p_e , %	4,22	11,22	9,36	16,02

3.17. Выводы по третьей главе

1. На основе учета ползучести как основного процесса накопления $\omega(\tau)$ в оболочке твэла ВВЭР при маневрировании N , учета последовательности совокупностей параметров нормальной эксплуатации твэла и реактора, а также использования ЭВТП, разработан ЭВТП-метод расчета $\omega(\tau)$ оболочки твэла ВВЭР. ЭВТП-метод универсален, поскольку подходит для любого типа легководного реактора и любого материала оболочки твэла. ЭВТП-метод физически обоснован, поскольку учитывает основной процесс накопления $\omega(\tau)$ и последовательность совокупностей эксплуатационных факторов, определяющих

$\omega(\tau)$.

2. Лимитирующий компонент A_0 ЭВТП-критерия разгерметизации оболочки может находиться с учетом критерия прочности SC2, либо графическим методом – на основе предельного условия $\lim(dA/d\tau)^{-1} \rightarrow 0$ при $\tau \rightarrow \tau_0$. В случае определения A_0 по SC2 не удовлетворяется фундаментальный принцип ЭВТП, заключающийся в независимости A_0 от параметров нагружения оболочки. При управлении долговечностью оболочек твэлов определение A_0 на основе SC2 не целесообразно, т.к. не позволяет записать критерий разгерметизации оболочки в инвариантной форме.

3. Систематическая погрешность ЭВТП-оценки долговечности оболочки на основе графического метода определения A_0 в 5 раз меньше систематической погрешности оценки долговечности оболочки по SC4. Для уменьшения консервативности оценки A_0 целесообразно провести эксперименты, аналогичные работам [12, 27], для циркониевого сплава Э-110.

4. Определена мера влияния режимных параметров ВВЭР-1000 и конструктивных параметров твэла на $\omega(\tau)$ при переменном режиме эксплуатации РУ. Выполнена декомпозиция проблемы управления долговечностью оболочек твэлов путем различения управления наиболее сильно влияющими на $\omega(\tau)$ конструктивными параметрами твэла (диаметр и толщина оболочки, диаметр таблетки и ее центрального отверстия, шаг решетки твэлов) и управления наиболее значимыми режимными параметрами ВВЭР (максимальная линейная мощность в твэле и входная температура теплоносителя). Показана целесообразность управления свойствами твэлов путем управления конструктивными параметрами твэла, температурным режимом теплоносителя и перестановками ТВС в АКЗ.

5. Учитывая перестановки ТВС в АКЗ и размещение ОР СУЗ для У-алгоритма управления мощностью ВВЭР-1000, определено, что аксиальные сегменты твэла, заключенные между координатами $z = 1,8$ и $2,7$ м (измеряя от низа АКЗ), ограничивают долговечность оболочки твэла.

6. Для повышения долговечности оболочки твэла топливные таблетки, соответствующие максимально нагруженным АС, возможно изготавливать с центральными отверстиями. Целесообразно разработать метод аксиального профилирования диаметра центрального отверстия таблеток.

7. Используя для циркониевого сплава циркалой-4, в условиях АКЗ ВВЭР-1000, модели коррозии оболочки со стороны теплоносителя MATPRO-A и EPRI, определено, что стадия ускоренной ползучести оболочки вырождается при скорости коррозии 60 % от модельной. Следовательно, при достаточно низкой скорости коррозии оболочки возможно в течение минимум 4 лет оставаться в пределах стадии установившейся ползучести оболочки, где эквивалентная деформация ползучести p_e оболочки не превышает 1-2 %. Разработана методика определения условий переменного нагружения РУ, при которых влияние коррозии оболочки со стороны теплоносителя на $\omega(\tau)$ не существенно.

8. Расчет времени потери устойчивости τ_0 оболочки твэла в зависимости от частоты нагружения ν оболочки показал, что если $\nu \ll 1$ Гц и КИУМ=idem, то при увеличении ν в 2-4 раза, по сравнению со случаем $\nu=1$ цикл/сут, уменьшения τ_0 не наблюдается, тогда как при увеличении КИУМ от 0,9 до 1 τ_0 значительно уменьшается. Следовательно, результаты расчетов по ЭВТП-методу долговечности оболочки твэла в условиях АКЗ ВВЭР-1000 находятся в качественном соответствии с экспериментальными результатами [12, 27].

9. При использовании распределенной модели расчета $\omega(\tau)$ на основе ЭВТП-метода, в условиях АКЗ ВВЭР-1000 стадия ускоренного роста $A(\tau)$ для циркалой-4 наступает значительно раньше, чем стадия ускоренного роста $\omega(\tau)$ для сплава Э-110 по данным ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, полученным на основе сосредоточенной модели расчета $\omega(\tau)$ [11]. Использование модели коррозии MATPRO-A обеспечивает консервативность оценки долговечности оболочки твэла, изготовленной из сплава Э-110. Скорость роста $A(\tau)$ существенно зависит от алгоритма перестановок ТВС в АКЗ. При повышении скорости коррозии оболочки время наступления стадии ускоренной ползучести значительно

уменьшается. При использовании критерия SC4 подавляющий вклад в величину $\omega(\tau)$ вносит усталостная составляющая [11], что на качественном уровне не соответствует экспериментальным результатам [12, 27] и расчетам по ЭВТП-методу [14].

10. Контроль максимального тангенциального напряжения, пластической деформации оболочки, а также максимальной температуры $t_{\text{ок,н}}^{\text{max}}$ на наружной поверхности окисной пленки показал, что долговечность оболочки для исследованных условий не ограничивается по критериям SC1 и SC5, а также по условию $t_{\text{ок,н}}^{\text{max}} \leq 352$ °C [19]. Так как увеличение толщины окисного слоя на внешней поверхности оболочки не приводит к превышению допустимого предела нормальной эксплуатации для температуры внешней поверхности, это позволяет использовать ЭВТП-критерий для управления величиной $\omega(\tau)$.

11. Поскольку алгоритм перестановок ТВС, характеризуемый меньшей $\omega(\tau)$, одновременно характеризуется меньшей эффективностью использования топлива, оцениваемой через глубину выгорания B , при управлении перестановками ТВС в АКЗ целесообразно, в дополнение к имеющимся методам оптимизации размещения ТВС на основе минимизации радиального коэффициента неравномерности энерговыделения и вероятности разрушения оболочки при тяжелой аварии с потерей теплоносителя, разработать метод управления перестановками ТВС на основе баланса между $\omega(\tau)$ и B .

12. Для одновременного учета требований к безопасности и экономичности эксплуатации твэлов необходимо разработать модель эффективности управления свойствами твэлов.

Глава 4.

Управление конструкцией твэла и температурой теплоносителя

4.1. Модель эффективности управления свойствами твэлов

Для применения ЭВТП-метода с учетом ограничивающих условий одновременно к безопасности и экономичности эксплуатации твэлов, разработана критериальная модель (КМ) эффективности управления свойствами твэлов [15, 16, 29, 39] на основе следующих принципов:

– целью управления свойствами твэлов ВВЭР является повышение эффективности нормальной эксплуатации твэлов за счет совместного учета поврежденности оболочек твэлов $\omega(\tau)$ и экономико-технологических показателей эффективности эксплуатации РУ;

– управление свойствами твэлов осуществляется на основе требований к свойствам твэлов и АКЗ, определения контролируемых параметров и детерминирующих факторов (ДФ);

– структура критерия эффективности управления одинакова для всех задач управления, однако компоненты критерия не инвариантны;

– определяются контролируемые параметры c_i ($i = [1, n_c]$, n_c – количество контролируемых параметров), и изменяемые факторы d_j , детерминирующие контролируемые параметры ($j = [1, n_d]$, n_d – количество ДФ);

– на основе требований к свойствам твэлов определяются оптимальные c_i^{opt} и предельно допустимые c_i^{lim} значения c_i , для допустимых значений c_i справедливо:

$$c_i^{\text{lim}} \leq c_i \leq c_i^{\text{opt}} \quad \text{либо} \quad c_i^{\text{opt}} \leq c_i \leq c_i^{\text{lim}}. \quad (4.1)$$

После записи (4.1) в безразмерном виде:

$$c_i^{\text{lim},*} \leq c_i^* \leq c_i^{\text{opt},*} = 1. \quad (4.2)$$

Максимум эффективности Eff управления свойствами твэлов определяется по критерию, имеющему структуру

$$\max\{Eff = 1 - L/L^{\lim}\},$$

$$L = \sqrt{\sum_{i=0}^{n_i} (1 - c_{2i+1}^*)^2 + \sum_{j=1}^{n_j} k_{i,j} (1 - c_{2j}^*)^2}; \quad L^{\lim} = \sqrt{\sum_{i=0}^{n_i} (1 - c_{2i+1}^{\lim,*})^2 + \sum_{j=1}^{n_j} k_{i,j} (1 - c_{2j}^{\lim,*})^2}, \quad (4.3)$$

где c_{2i+1}^* (c_{2j}^*) – безразмерные контролируемые параметры с нечетными (четными) индексами такие, что для любого из них справедливо условие: любое изменение размерного контролируемого параметра Δc_{2i+1} (Δc_{2j}) вызывает изменение ΔEff противоположного (того же) знака; n_i (n_j) – количество контролируемых параметров, изменение каждого из которых вызывает ΔEff противоположного (того же) знака; $k_{i,j}$ – коэффициенты, учитывающие различие между $c_{2i+1}^{\lim,*}$ и $c_{2j}^{\lim,*}$, в случае

$$\{\forall i: c_{2i+1}^{\lim,*} \approx c_{2i+3}^{\lim,*}\} \cup \{\forall j: c_{2j}^{\lim,*} \approx c_{2j+2}^{\lim,*}\} \cup \{\forall i, j: c_{2j}^{\lim,*} < c_{2i+1}^{\lim,*}\}$$

определяемые как

$$k_{i,j} = \left[\frac{1 - c_{2i+1}^{\lim,*}}{1 - c_{2j}^{\lim,*}} \right]^2. \quad (4.4)$$

Физический смысл критерия (4.3): если $c_{2i+1} > c_{2i+1}^{\lim}$ ($c_{2i+1} < c_{2i+1}^{\lim,*}$) или физический смысл критерия (4.3): если $c_{2i+1} > c_{2i+1}^{\lim}$ ($c_{2i+1} < c_{2i+1}^{\lim,*}$) или $c_{2j} < c_{2j}^{\lim}$ ($c_{2j} < c_{2j}^{\lim,*}$), то этот контролируемый параметр вносит негативный вклад в Eff ; преимущество одной совокупности ДФ над другой определяется путем суммирования преимуществ, даваемых каждым из c_i .

КМ дала возможность предложить алгоритм управления свойствами твэлов на основе ЭВП-метода и организации итерационного расчета наилучшей совокупности ДФ, с точки зрения удовлетворения требований к свойствам твэлов (рис. 4.1). КМ позволила: разработать метод управления конструкционными параметрами твэла, учитывающий $\omega(\tau)$ и баланс безопасность-экономичность; предложить метод аксиального профилирования диаметра центрального отверстия таблетки; разработать метод управления температурным режимом теплоносителя, учитывающий $\omega(\tau)$ и стабильность нейтронного поля в АКЗ.

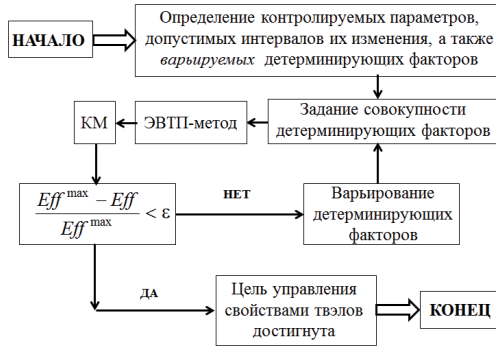


Рис. 4.1. Алгоритм управления свойствами твэлов

4.2. Метод управления конструкцией твэла

Предложен метод управления конструкционными параметрами твэла, отличающийся учетом $\omega(\tau)$, баланса безопасности и экономичности эксплуатации твэла. ДФ перечислены в табл. 3.13, контролируемыми параметрами являются $\omega(\tau)$ и параметр, описывающий экономическую эффективность эксплуатации твэлов (масса M_U или предельная глубина выгорания B топлива в ТВС). Ввиду огромного числа возможных сочетаний ДФ, применяется метод выборок Монте-Карло (рис. 4.2).

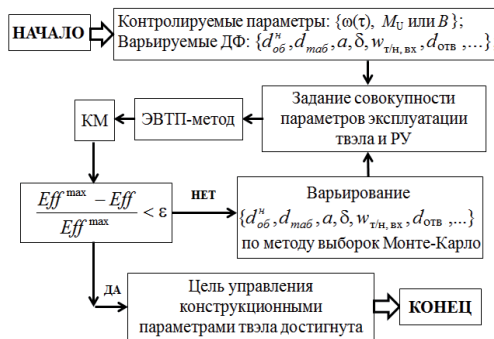


Рис. 4.2. Метод управления конструкционными параметрами твэла

4.3. Метод аксиального профилирования диаметра отверстия таблетки

Частным случаем метода управления конструкционными параметрами твэла является метод аксиального профилирования диаметра центрального отверстия $d_{отв}$ таблетки, обеспечивающий высокую M_U при низкой $\omega(\tau)$ (рис. 4.3).

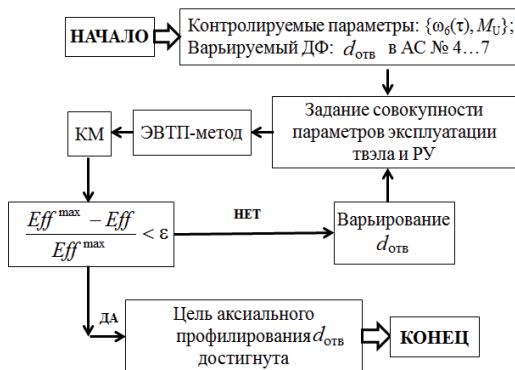


Рис. 4.3. Метод аксиального профилирования $d_{отв}$

Изготавливая топливные таблетки наиболее напряженных АС твэла (АС 4...7 – при условном разбиении длины твэла на 8 равных АС) с центральными отверстиями, имеющими большие значения $d_{отв}$, а таблетки менее напряженных АС – с меньшими значениями $d_{отв}$, достигается высокая загрузка топлива в АКЗ без снижения долговечности твэлов. Поскольку максимально нагруженным АС в оболочке является АС 6, контролируемые параметры являются $\omega(\tau)$ в АС 6 (ω_6) и масса топлива в ТВС M_U , варьируемым ДФ является $d_{отв}$ в АС 4...7.

Для комбинированного цикла нагружения рассчитаны $\omega_6(\tau=6 \text{ эф. лет})$, M_U , Eff при следующих исходных данных:

$$A_0=30 \text{ МДж/м}^3; l_{ТВ}=3,5 \text{ м}; n_{ТВ}=312; \rho_{UO_2}=10,4 \text{ г/см}^3; d_{таб}=0,757 \text{ см};$$

$$d_{отв}=0,14 \text{ см в АС № 1...3 и 8}; d_{отв}=\text{var в АС № 4...7}.$$

Введены требования:

$$\omega_6^{opt}=0,7; \omega_6^{lim}=0,73; M_U^{opt}=511 \text{ кг}; M_U^{lim}=491 \text{ кг}. \quad (4.5)$$

Компоненты критерия (4.3) записаны в виде

$$L = \sqrt{(1 - \omega_6^*)^2 + k_{m,\omega}(1 - M_U^*)^2}; \quad L^{\text{lim}} = \sqrt{(1 - \omega_6^{\text{lim},*})^2 + k_{m,\omega}(1 - M_U^{\text{lim},*})^2}. \quad (4.6)$$

Допустимые значения ω_6 и M_U лежат в пределах:

$$0,7 \leq \omega_6 \leq 0,73; \quad 491 \leq M_U \leq 511. \quad (4.7)$$

Переписав в безразмерном виде, имеем

$$0,9 \leq \omega_6^* \leq 1; \quad 0,96 \leq M_U^* \leq 1, \quad (4.8)$$

где $\omega_6^{\text{lim},*} = (1 - \omega_6^{\text{lim}})/(1 - \omega_6^{\text{opt}}) = 0,9; \quad \omega_6^* = (1 - \omega_6)/(1 - \omega_6^{\text{opt}}).$ (4.9)

$$M_U^{\text{lim},*} = M_U^{\text{lim}}/M_U^{\text{opt}} = 0,96; \quad M_U^* = M_U/M_U^{\text{opt}}. \quad (4.10)$$

$$k_{m,\omega} = \left[\frac{1 - \omega_6^{\text{lim},*}}{1 - M_U^{\text{lim},*}} \right]^2 = 6,25. \quad (4.11)$$

С учетом (4.9)–(4.11) найдены $L^{\text{lim}} = 0,14$ и Eff для варьируемых значений $d_{\text{отв}}$ (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Эффективность аксиального профилирования $d_{\text{отв}}$

$d_{\text{отв}}$ в АС № 4...7, см	ω_6	M_U , кг	ω_6^*	M_U^*	Eff
0,112	0,883	502	0,39	0,982	-3,4
0,14	0,793	499	0,69	0,977	-1,3
0,168	0,72	496	0,93	0,971	0,28

При $\{\omega_6^{\text{opt}} = 0,7; M_U^{\text{opt}} = 511 \text{ кг}; \omega_6^{\text{lim}} = 0,73; M_U^{\text{lim}} = 491 \text{ кг}\}$ цель аксиального профилирования $d_{\text{отв}}$ в АС № 4...7 достигнута при $d_{\text{отв}} = 0,168$ см. Следовательно, метод аксиального профилирования $d_{\text{отв}}$ позволяет обеспечить необходимый баланс между требованиями к массе ядерного топлива в ТВС и к долговечности оболочек ТВЭЛОВ.

4.4. Программы суточного маневра мощностью РУ

Испытания, проведенные в 1998 г. на энергоблоке 5 Запорожской АЭС (ЗАЭС-5), показали возможность эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 в режиме суточного маневра мощностью N [43]. Одной из важнейших задач при маневре N

является предотвращение и подавление высотных ксеноновых колебаний энергораспределения в АКЗ путем управления величиной АО. Будем рассматривать три программы суточного маневра N : 1) Программа с постоянной входной температурой теплоносителя $t_{\text{вх}} = \text{const}$ (П1); 2) Программа с постоянной средней температурой теплоносителя $\langle t_1 \rangle = \text{const}$ (П2); 3) Промежуточная между П1 и П2 программа, при которой $t_{\text{вх}}$ увеличивается на 1°C при снижении N от 100 до 80 % $N_{\text{ном}}$ (П3) [14].

4.5. Эффективность температурного режима теплоносителя

Нестационарное отравление АКЗ реактора вносит положительную обратную связь в любое отклонение нейтронного потока. 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. Аксиальная стабильность поля энерговыделения описывается с помощью аксиального офсета АО [32]:

$$AO = \frac{N_{\text{в}} - N_{\text{н}}}{N}, \quad (4.12)$$

где $N_{\text{в}}$, $N_{\text{н}}$, N – соответственно мощность верхней, нижней половины АКЗ и мощность всей АКЗ.

Запишем переменные, входящие в (4.12), через достаточно малые отклонения от соответствующих стационарных значений:

$$AO = AO_0 + \delta AO; N_{\text{в}} = N_{\text{в},0} + \delta N_{\text{в}}; N_{\text{н}} = N_{\text{н},0} + \delta N_{\text{н}}; N = N_0 + \delta N, \quad (4.13)$$

где AO_0 , $N_{\text{в},0}$, $N_{\text{н},0}$, N_0 – стационарные значения АО, мощности верхней, нижней половины АКЗ и мощности АКЗ, соответственно; δAO , $\delta N_{\text{в}}$, $\delta N_{\text{н}}$, δN – до-

статочны малые отклонения от стационарных значений АО, N_B , N_H и N , соответственно.

Для δN_B и δN_H при малом отклонении средней температуры теплоносителя в соответствующей половине АКЗ справедливы выражения

$$\delta N_B = \frac{\delta N}{\delta \langle t \rangle} \cdot \delta \langle t_B \rangle; \delta N_H = \frac{\delta N}{\delta \langle t \rangle} \cdot \delta \langle t_H \rangle, \quad (4.14)$$

где $\delta \langle t_B \rangle$, $\delta \langle t_H \rangle$ – малое отклонение средней температуры теплоносителя в верхней и нижней половине АКЗ, соответственно; δN_B , δN_H – малое отклонение мощности верхней и нижней половины АКЗ при $\delta \langle t_B \rangle$, $\delta \langle t_H \rangle$, соответственно; $\frac{\delta N}{\delta \langle t \rangle}$ – отношение отклонения мощности РУ к отклонению средней температуры теплоносителя в АКЗ, определяемое как

$$\frac{\delta N}{\delta \langle t \rangle} = \frac{\delta \rho / \delta \langle t \rangle}{\delta \rho / \delta N} = \frac{k_t}{k_N}, \quad (4.15)$$

где k_t , k_N – температурный и мощностный коэффициент реактивности ρ , соответственно.

После подстановки выражений (4.13)–(4.15) в (4.12) и линеаризации получим выражение для малого отклонения АО при малом отклонении N :

$$\delta \text{АО} = \frac{\delta N}{\delta \langle t \rangle} \cdot N_{\text{АКЗ},0}^{-1} \cdot [(1 - \text{АО}_0) \cdot \delta \langle t_B \rangle - (1 + \text{АО}_0) \cdot \delta \langle t_H \rangle]. \quad (4.16)$$

В случае справедливости допущения

$$\text{АО}_0 \ll 1 \quad (4.17)$$

выражение (4.16) упрощается:

$$\delta \text{АО} = \frac{\delta N}{\delta \langle t \rangle} \cdot N_{\text{АКЗ},0}^{-1} \cdot [\delta \langle t_B \rangle - \delta \langle t_H \rangle]. \quad (4.18)$$

Из (4.18) следует критерий эффективности температурного режима теплоносителя с точки зрения стабильности АО в ходе маневрирования N [14]:

$$\min \left| \sum_{i=1}^m (\delta \langle t_B \rangle - \delta \langle t_H \rangle) \right|, \quad (4.19)$$

где i – номер шага по N (малого изменения N); m – количество шагов по N в

каком-либо направлении при маневре N .

Использование критерия (4.19) позволяет обоснованно выбирать температурный режим теплоносителя, позволяющий обеспечить максимальную стабильность поля энерговыделения при маневрировании N . Поскольку Хмельницкая АЭС (ХАЭС) является базовой для исследования переменных режимов эксплуатации энергоблоков с ВВЭР-1000 НАЭК "Энергоатом", рассмотрено маневрирование мощностью энергоблока ХАЭС-2, где используется У-алгоритм.

Программа П1, подразумевающая при суточном маневре N в пределах от 100 до 80 % $N_{\text{ном}}$ поддержание $t_{\text{вх}} = \text{const}$ при $p_{\text{II}} = [5,8...6]$ МПа, имеет преимущества П2 с $\langle t_1 \rangle = \text{const}$, но, за счет поддержания p_{II} в регламентных пределах, П1 лишена недостатков П2 [35, 36].

Сравнение П1, П2 и П3 выполнялось с помощью ПС ИР. Распределение шлаков в АКЗ задавалось для начала 5-й кампании. Рассчитывалось первое состояние АКЗ с равновесным распределением Хе. Для последующих состояний с учетом выгорания топлива рассчитывалось неравновесное распределение Хе и Sm. Входное давление и расход теплоносителя задавались постоянными и равными 16 МПа и $84 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$, соответственно. $t_{\text{вх}}$ по П1 задавалась 287 °С. П2 рассматривалась в двух вариантах, отличающихся максимальной амплитудой ΔH^{max} перемещения ОР при маневре: 1) П2а: $\Delta H^{\text{max}} = 4 \%$; 2) П2б: $\Delta H^{\text{max}} = 6 \%$. $t_{\text{вх}}$ по П2 задавалась переменной (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Изменение $t_{\text{вх}}$ при $\langle t_1 \rangle = \text{const}$

$N, \%$	$t_{\text{вх}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{вых}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\langle t_1 \rangle, \text{ }^\circ\text{C}$
100	287	317	302
90	288	316	302
80	290	314	302

Изменение N в зависимости от времени задавалось для всех программ по одному графику (рис. 4.4).

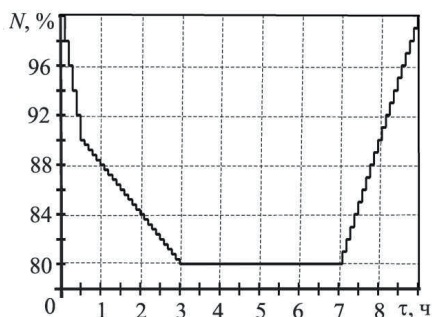


Рис. 4.4. Мощность ВВЭР-1000 в зависимости от времени

Принималось, что

- при снижении N от $N_1=100\%$ до $N_2=90\%$ в течение 0,5 ч N изменяется по закону $dN_{1-2}/dt = -2\%/6$ мин за счет ввода борной кислоты (параметр критичности – концентрация борной кислоты в теплоносителе);
- при снижении N от $N_2=90\%$ до $N_3=80\%$ в течение 2,5 ч N изменяется по закону $dN_{2-3}/dt = -0,4\%/6$ мин за счет отравления АКЗ (параметр критичности не задается);
- при выдержке РУ на уровне $N_3=80\%$ в течение 4 ч параметр критичности – концентрация борной кислоты;
- при увеличении N от $N_3=80\%$ до $N_1=100\%$ в течение 2 ч N изменяется по закону $dN_{3-1}/dt = 1,0\%/6$ мин за счет ввода чистого дистиллата при возврате ОР в регламентное положение (параметр критичности – концентрация борной кислоты);
- при подъеме N от $N_3=80\%$ до $N_1=100\%$ изменение положения ОР задавалось для П1, П2а, П3 с учетом $\Delta H^{\max} = 4\%$, для П2б – $\Delta H^{\max} = 6\%$ (рис. 4.5).

Моделирование управления реактором в неравновесном состоянии выполнялось заданием управляющих параметров: параметра критичности; $t_{\text{вх},0}$; $dt_{\text{вх}}/dN$; N_1 ; N_2 ; N_3 ; H_0 ; ΔH^{\max} ; dN/dt .

Для расчета распределения температуры теплоносителя по АС, режимные характеристики ВВЭР-1000 задавались в соответствии с методикой [19].

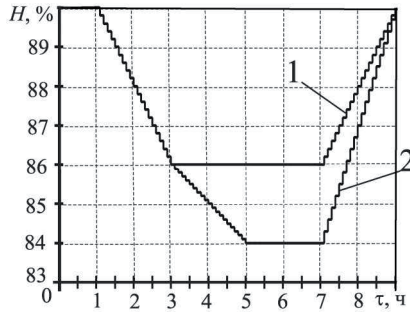


Рис. 4.5. Положение 10-й группы ОР СУЗ в зависимости от времени:
1 – для П1, П2а, П3; 2 – для П2б

С помощью ПС ИР для программ П1, П2а и П3 рассчитано изменение распределения q_l по АС АКЗ при изменении N от $N_{\text{ном}}$ до 80 % $N_{\text{ном}}$ (табл. 4.3–4.5).

Таблица 4.3

Относительные значения линейной мощности для АС АКЗ

ПР	$\tau, \text{ч}$	$N, \%$	$\langle q_l \rangle, \text{Вт/см}$	k_l							
				АС							
				1	2	3	4	5	6	7	8
1; 2а; 3	0,1	100	168,5	0,755	1,07	1,145	1,16	1,145	1,10	0,985	0,63
1	0,6	90	151,7	0,725	1,045	1,13	1,165	1,155	1,115	1,01	0,645
1	1,1	88	148,3	0,72	1,035	1,125	1,165	1,165	1,125	1,015	0,65
1	1,6	86	144,9	0,715	1,035	1,125	1,165	1,165	1,13	1,015	0,645
1	2,1	84	141,5	0,71	1,03	1,125	1,165	1,175	1,135	1,015	0,645
1	2,6	82	138,2	0,71	1,025	1,125	1,17	1,18	1,14	1,01	0,635
1	3,1	80	134,8	0,71	1,025	1,125	1,175	1,185	1,14	1,01	0,63
2а	0,6	90	151,7	0,725	1,04	1,125	1,165	1,165	1,125	1,015	0,65
2а	1,1	88	148,3	0,715	1,03	1,125	1,16	1,165	1,135	1,025	0,66
2а	1,6	86	144,9	0,71	1,025	1,115	1,165	1,17	1,135	1,025	0,65
2а	2,1	84	141,5	0,7	1,015	1,115	1,165	1,175	1,145	1,025	0,65
2а	2,6	82	138,2	0,7	1,015	1,115	1,17	1,18	1,145	1,025	0,645
2а	3,1	80	134,8	0,695	1,015	1,12	1,17	1,19	1,15	1,02	0,645
3	0,6	90	151,7	0,725	1,045	1,13	1,165	1,155	1,12	1,01	0,645
3	1,1	88	148,3	0,72	1,035	1,125	1,165	1,165	1,125	1,02	0,65
3	1,6	86	144,9	0,715	1,03	1,125	1,165	1,17	1,135	1,02	0,65
3	2,1	84	141,5	0,71	1,025	1,125	1,165	1,175	1,135	1,02	0,645
3	2,6	82	138,2	0,71	1,025	1,125	1,17	1,18	1,14	1,02	0,635
3	3,1	80	134,8	0,705	1,025	1,125	1,175	1,185	1,14	1,01	0,635

Используя относительные значения q_l (табл. 4.3), рассчитаны соответствующие средние значения q_l для АС АКЗ ВВЭР-1000 (табл. 4.4).

Таблица 4.4

Средние значения линейной мощности для АС АКЗ

ПР	$\tau, \text{ч}$	$N, \%$	$\langle q_l \rangle, \text{Вт/см}$	$\langle q_{l,i} \rangle, \text{Вт/см}$							
				АС							
				1	2	3	4	5	6	7	8
1; 2а; 3	0,1	100	168,5	127,2	180,3	192,9	195,5	192,9	185,4	166,0	106,2
1	0,6	90	151,7	110,0	158,5	171,4	176,7	175,2	169,1	153,2	97,85
1	1,1	88	148,3	106,8	153,5	166,8	172,8	172,8	166,8	150,5	96,40
1	1,6	86	144,9	103,6	150,0	163,0	168,8	168,8	163,7	147,1	93,46
1	2,1	84	141,5	100,5	145,7	159,2	164,8	166,3	160,6	143,6	91,27
1	2,6	82	138,2	98,12	141,7	155,5	161,7	163,1	157,5	139,6	87,76
1	3,1	80	134,8	95,71	138,2	151,7	158,4	159,7	153,7	136,1	84,92
2а	0,6	90	151,7	110,0	157,8	170,7	176,7	176,7	170,7	154,0	98,61
2а	1,1	88	148,3	106,0	152,7	166,8	172,0	172,8	168,3	152,0	97,88
2а	1,6	86	144,9	102,9	148,5	161,6	168,8	169,5	164,5	148,5	94,19
2а	2,1	84	141,5	99,05	143,6	157,8	164,8	166,3	162,0	145,0	91,98
2а	2,6	82	138,2	96,74	140,3	154,1	161,7	163,1	158,2	141,7	89,14
2а	3,1	80	134,8	93,69	136,8	151,0	157,7	160,4	155,0	137,5	86,95
3	0,6	90	151,7	110,0	158,5	171,4	176,7	175,2	169,9	153,2	97,85
3	1,1	88	148,3	106,8	153,5	166,8	172,8	172,8	166,8	151,3	96,40
3	1,6	86	144,9	103,6	149,2	163,0	168,8	169,5	164,5	147,8	94,19
3	2,1	84	141,5	100,5	145,0	159,2	164,8	166,3	160,6	144,3	91,27
3	2,6	82	138,2	98,12	141,7	155,5	161,7	163,1	157,5	141,0	87,76
3	3,1	80	134,8	95,03	138,2	151,7	158,4	159,7	153,7	136,1	85,60

Представив $\langle q_{l,i} \rangle$ в виде $\langle q_{l,i} \rangle = k_i \cdot q_{l,\max}$, где k_i – коэффициент линейной мощности для i -го АС АКЗ; $q_{l,\max}$ – максимальная по всем АС АКЗ линейная мощность, рассчитаны соответствующие k_i (табл. 4.5).

При $\tau=0,1$ ч (времени начала маневра N) коэффициенты k_i имеют одинаковые значения для всех трех программ. Значения k_i в табл. 4.3–4.5 приводятся для П2а, но не П2б, поскольку с помощью критерия (4.19) можно сравнивать эффективность только тех ПР, у которых кроме температурного режима теплоносителя все прочие параметры, влияющие на АО, одинаковы.

Коэффициенты линейной мощности для АС АКЗ

ПР	τ , ч	N , %	$q_{l, \max}$, Вт/см	k_i							
				АС							
				1	2	3	4	5	6	7	8
1; 2а; 3	0,1	100	195,5	0,651	0,922	0,987	1	0,987	0,948	0,849	0,543
1	0,6	90	176,7	0,623	0,897	0,970	1	0,992	0,957	0,867	0,554
1	1,1	88	172,8	0,618	0,888	0,965	1	1	0,965	0,871	0,558
1	1,6	86	168,8	0,614	0,889	0,966	1	1	0,970	0,871	0,554
1	2,1	84	166,3	0,604	0,876	0,957	0,991	1	0,966	0,863	0,549
1	2,6	82	163,1	0,602	0,869	0,953	0,991	1	0,966	0,856	0,538
1	3,1	80	159,7	0,599	0,865	0,950	0,992	1	0,962	0,852	0,532
2а	0,6	90	176,7	0,623	0,893	0,966	1	1	0,966	0,872	0,558
2а	1,1	88	172,8	0,613	0,884	0,965	0,995	1	0,974	0,880	0,566
2а	1,6	86	169,5	0,607	0,876	0,953	0,996	1	0,971	0,876	0,556
2а	2,1	84	166,3	0,596	0,863	0,949	0,991	1	0,974	0,872	0,553
2а	2,6	82	163,1	0,593	0,860	0,945	0,991	1	0,970	0,869	0,547
2а	3,1	80	160,4	0,584	0,853	0,941	0,983	1	0,966	0,857	0,542
3	0,6	90	176,7	0,623	0,897	0,970	1	0,992	0,962	0,867	0,554
3	1,1	88	172,8	0,618	0,888	0,965	1	1	0,965	0,876	0,558
3	1,6	86	169,5	0,611	0,880	0,962	0,996	1	0,971	0,872	0,556
3	2,1	84	166,3	0,604	0,872	0,957	0,991	1	0,966	0,868	0,549
3	2,6	82	163,1	0,602	0,869	0,953	0,991	1	0,966	0,865	0,538
3	3,1	80	159,7	0,595	0,865	0,950	0,992	1	0,962	0,852	0,536

Задавая значения $\{q_{l, \max}; (k_i, i=1\dots 8)\}$ в качестве исходных данных для ПС FEMAXI, найдены значения средней температуры теплоносителя в верхней $\langle t_B \rangle$ и нижней $\langle t_H \rangle$ половинах АКЗ, с временным шагом 0,5 ч.

Далее по значениям $\langle t_B \rangle$ и $\langle t_H \rangle$ рассчитаны $\delta \langle t_B \rangle$ и $\delta \langle t_H \rangle$ при снижении N от 100 до 80 % $N_{\text{ном}}$, что дало возможность найти $\Delta \delta T_{\Sigma} \equiv \left| \sum_{i=1}^6 \Delta \delta t \right|$, где $\Delta \delta t \equiv \delta \langle t_B \rangle - \delta \langle t_H \rangle$.

По критерию (4.19) найдено, что с точки зрения стабильности АО:

- 1) П1 ($\Delta \delta T_{\Sigma} = 2,65$) лучше, чем П2а ($\Delta \delta T_{\Sigma} = 2,85$) и П3 ($\Delta \delta T_{\Sigma} = 2,70$);
- 2) П2а – наихудшая программа (табл. 4.6) [14].

Таблица 4.6

**Средняя температура теплоносителя в верхней и нижней
половинах АКЗ для П1, П2а, П3**

ПР	τ , ч	N , %	$\langle t_b \rangle$	$\langle t_n \rangle$	$\delta \langle t_b \rangle$	$\delta \langle t_n \rangle$	$\Delta \delta t$	$\sum_{i=1}^6 \Delta \delta t$
1; 2а; 3	0,1	100	318,3	296,825	0	0	0	2,65
1	0,6	90	317,975	296,575	-0,325	-0,25	-0,075	
	1,1	88	316,375	296	-1,6	-0,575	-1,025	
	1,6	86	315,725	295,725	-0,65	-0,275	-0,375	
	2,1	84	315,1	295,525	-0,625	-0,2	-0,425	
	2,6	82	314,5	295,3	-0,6	-0,225	-0,375	
2а	3,1	80	313,9	295,075	-0,6	-0,225	-0,375	2,85
	0,6	90	319,25	298,025	0,95	1,2	-0,25	
	1,1	88	317,875	297,575	-1,375	-0,45	-0,925	
	1,6	86	317,45	297,575	-0,425	0	-0,425	
	2,1	84	316,925	297,575	-0,525	0	-0,525	
2,6	82	316,65	297,625	-0,275	0,05	-0,325		
3	3,1	80	316,35	297,725	-0,3	0,1	-0,4	2,70
	0,6	90	318,4	297,075	0,1	0,25	-0,15	
	1,1	88	316,9	296,55	-1,5	-0,525	-0,975	
	1,6	86	316,35	296,4	-0,55	-0,15	-0,4	
	2,1	84	315,7	296,2	-0,65	-0,2	-0,45	
2,6	82	315,225	296,125	-0,475	-0,075	-0,4		
	3,1	80	314,775	296	-0,45	-0,125	-0,325	

Рассчитано максимальное расхождение ΔAO^{\max} графиков мгновенного и равновесного АО по методу [20] – рис. 4.6.

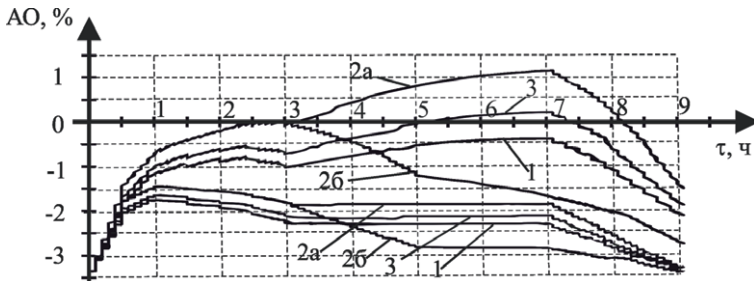


Рис. 4.6. АО в зависимости от времени для П1, П2а, П2б, П3 (нижние линии – равновесный АО, верхние – мгновенный АО)

Максимальная амплитуда перемещения ОР ΔH^{\max} при маневре N по П1, П2а и П3 одинакова (4 %), но максимальное расхождение $\Delta A O^{\max}$ графиков мгновенного и равновесного АО по П1 ($\approx 1,9\%$) меньше, чем по П2а ($\approx 3\%$) и по П3 ($\approx 2,3\%$), что подтверждает вывод на основе критерия (4.19). Использование критерия стабилизации АО, за счет эффекта реактивности по температуре теплоносителя в ходе уменьшения N , дает результат, качественно совпадающий с результатом анализа стабильности АО путем расчета максимальной расходимости графиков мгновенного и равновесного АО [14]. Если для П2 амплитуда ΔH^{\max} увеличена от 4 до 6 %, то $\Delta A O^{\max}$ уменьшается от 3 до 1,9 %. Поэтому, при прочих равных условиях, по П2 для стабильности АО необходимо перемещение ОР с большей амплитудой ΔH^{\max} , чем по П1. После 500 суточных циклов нагружения ВВЭР-1000, при маневрировании N по П2а среднее по всем твэлам АКЗ значение $\omega_0(\tau)$ на 10 % больше, чем при маневрировании N по П1 ($A_0 = 30 \text{ МДж/м}^3$) – табл. 4.7.

Таблица 4.7

$A(\tau)$ и $\omega(\tau)$ для П1, П2а, П3

ПР	$A, \text{МДж/м}^3$		$\omega, \%$	
	АС 6	АС 7	АС 6	АС 7
П1	1,02	0,8	3,38	2,67
П2а	1,12	0,89	3,73	2,97
П3	1,06	0,84	3,53	2,8

Поскольку при маневрировании N по ПР с $\langle t_1 \rangle = \text{const}$ амплитуда необходимого перемещения ОР СУЗ, при прочих равных условиях, на 50 % больше, чем для ПР с $t_{\text{вх}} = \text{const}$, это будет существенно уменьшать долговечность оболочек твэлов за счет увеличения амплитуды скачков q_l в твэлах, наиболее близко расположенных к ОР.

4.6. Метод управления температурным режимом теплоносителя

Разработан метод управления температурным режимом теплоносителя ВВЭР-1000, отличающийся учетом $\omega(\tau)$ и АО, стабилизацией АО при маневрировании N путем выбора температурного режима и использования физических свойств АКЗ [16, 29]. Контролируемые параметры: $\omega(\tau)$ в АС 6 и $\Delta\text{АО}^{\text{max}}$, варьируемый ДФ – программа изменения $t_{\text{вх}}$ (рис. 4.7).

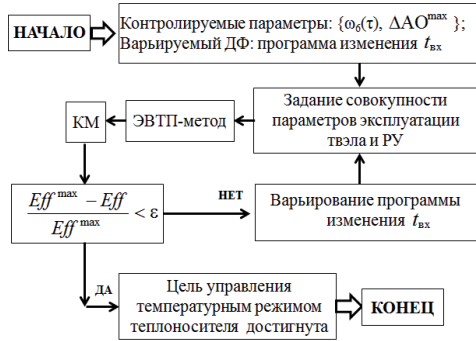


Рис. 4.7. Метод управления температурным режимом теплоносителя

Введены требования (индекс “max” у $\Delta\text{АО}^{\text{max}}$ опущен):

$$\omega_6^{\text{opt}} = 3 \%; \omega_6^{\text{lim}} = 10 \%; \Delta\text{АО}^{\text{opt}} = 1 \%; \Delta\text{АО}^{\text{lim}} = 5 \%. \quad (4.20)$$

Допустимые значения ω_6 и $\Delta\text{АО}$ лежат в пределах:

$$0,03 \leq \omega_6 \leq 0,1 ; 0,01 \leq \Delta\text{АО} \leq 0,05. \quad (4.21)$$

Компоненты критерия Eff записаны в виде

$$L = \sqrt{k_{\omega, \text{АО}} (1 - \omega_6^*)^2 + (1 - \Delta\text{АО}^*)^2}; L^{\text{lim}} = \sqrt{k_{\omega, \text{АО}} (1 - \omega_6^{\text{lim},*})^2 + (1 - \Delta\text{АО}^{\text{lim},*})^2}. \quad (4.22)$$

Безразмерные величины определяются как

$$0,93 \leq \omega_6^* \leq 1; 0,96 \leq \Delta\text{АО}^* \leq 1, \quad (4.23)$$

где
$$\omega_6^{\text{lim},*} = (1 - \omega_6^{\text{lim}}) / (1 - \omega_6^{\text{opt}}) = 0,93; \omega_6^* = (1 - \omega_6) / (1 - \omega_6^{\text{opt}}). \quad (4.24)$$

$$\Delta\text{АО}^{\text{lim},*} = \Delta\text{АО}^{\text{opt}} / \Delta\text{АО}^{\text{lim}} = 0,2; \Delta\text{АО}^* = \Delta\text{АО}^{\text{opt}} / \Delta\text{АО}. \quad (4.25)$$

$$k_{\omega, \text{АО}} = \left[\frac{1 - \Delta\text{АО}^{\text{lim},*}}{1 - \omega_6^{\text{lim},*}} \right]^2 = 131. \quad (4.26)$$

Учтя (4.26), получены $L^{\text{lim}} = 1,13$ и Eff для варьируемых программ (табл. 4.8).

Таблица 4.8

Эффективность управления температурным режимом теплоносителя

ПР	ω_6	ΔAO	ω_6^*	ΔAO^*	Eff
П1	0,0338	0,019	0,996	0,526	0,58
П2а	0,0373	0,03	0,992	0,333	0,41
П3	0,0353	0,023	0,994	0,435	0,5

Для $\{ \omega_6^{\text{opt}} = 3 \%; \omega_6^{\text{lim}} = 10 \%; \Delta AO^{\text{opt}} = 1 \%; \Delta AO^{\text{lim}} = 5 \% \}$ цель управления температурным режимом теплоносителя достигнута при П1.

Необходимо отметить, что при нормальных условиях эксплуатации ВВЭР скорость коррозии оболочек твэлов со стороны теплоносителя определяется проектными характеристиками материала оболочек, теплоносителя и мало зависит от режима переменного нагружения РУ, а также от интенсивности использования борной кислоты в качестве средства регулирования N . Так как $q_{l,\text{max}}$ определяется текущим уровнем N , задаваемым энергосистемой, и алгоритмом перестановок ТВС в АКЗ, а выбор расположения регулирующей группы ОР значительно влияет на эффективность стабилизации АО при изменении N , зависящую от дистанции между поглощающими нейтроны регулируемыми стержнями и свежими ТВС, управление свойствами твэлов ВВЭР возможно главным образом за счет управления [23]:

- конструкционными параметрами твэла;
- расположением регулирующей группы в АКЗ;
- балансом стационарного и переменного нагружения РУ;
- температурным режимом теплоносителя;
- перестановками ТВС в АКЗ.

Управление расположением регулирующей группы в АКЗ не исследуется, т.к. принято использование У-алгоритма. Однако, выражения КМ (4.22), позволяющие обеспечить одновременно высокую стабильность АО и низкую $\omega(\tau)$, могут применяться в методе управления расположением регулирующей группы.

Управление балансом стационарного и переменного нагружения РУ не ис-

следуется, т.к. принято, что этот фактор определяется на макроэкономическом уровне.

Следовательно, если рассматривать наиболее сильно влияющие на $\omega(\tau)$ ДФ, на стадии эксплуатации ВВЭР управлять долговечностью оболочек твэлов следует прежде всего за счет управления температурным режимом теплоносителя и алгоритмом перестановок ТВС в АКЗ.

Поскольку алгоритму перестановок ТВС, характеризующемуся большей глубиной выгорания топлива B , соответствует большая $\omega(\tau)$, алгоритм перестановок ТВС должен выбираться на основе баланса между B и $\omega(\tau)$.

Получила развитие модель эффективности управления свойствами твэлов на основе учета показателей экономичности и безопасности эксплуатации твэлов, отличающаяся учетом $\omega(\tau)$ в нормальных условиях эксплуатации твэлов.

Разработан метод управления конструкционными параметрами твэла на основе учета $\omega(\tau)$, баланса между безопасностью и экономичностью эксплуатации твэла, что позволило предложить метод аксиального профилирования $d_{\text{отв}}$, обеспечивающий низкую $\omega(\tau)$ при высокой загрузке ядерного топлива.

Разработан метод управления температурным режимом теплоносителя на основе учета $\omega(\tau)$ и АО, что позволило предложить программу изменения N ВВЭР-1000 с $t_{\text{вх}}=\text{const}$, характеризующуюся минимальной $\omega(\tau)$ при максимальной стабильности АО.

Сформулированы основные методы управления свойствами твэлов, показана необходимость разработки метода управления перестановками ТВС в АКЗ. Ввиду того, что параметр $q_{l,\text{max}}$ наиболее существенно влияет на $\omega(\tau)$, при управлении перестановками ТВС в АКЗ необходимо учесть интервал неопределенности в знании этого основного ДФ.

4.7. Выводы по четвертой главе

1. Использование ЭВТП-метода, КМ и критерия эффективности температурного режима теплоносителя позволяет определить наилучший температур-

ный режим теплоносителя с точки зрения одновременного обеспечения максимума аксиальной стабильности поля энерговыделения и минимума $\omega(\tau)$ оболочек твэлов ВВЭР.

2. Амплитуда необходимого для стабилизации АО перемещения регулирующей группы СУЗ ВВЭР-1000, при маневрировании N по ПР с $t_{\text{вх}} = \text{const}$ и максимальном расхождении графиков мгновенного и равновесного офсетов $\Delta\text{АО}^{\text{max}} = 1,9\%$, составляет $\Delta H^{\text{max}} = 4\%$, тогда как при маневрировании N по ПР с $\langle t_1 \rangle = \text{const}$, при прочих равных условиях, $\Delta H^{\text{max}} = 6\%$.

3. Поскольку при маневрировании N по ПР с $\langle t_1 \rangle = \text{const}$ ΔH^{max} на 50 % больше, чем по ПР с $t_{\text{вх}} = \text{const}$, происходит увеличение амплитуды скачка q_1 в твэлах, особенно вблизи концевиков ОР, что будет существенно уменьшать долговечность оболочек в переменном режиме нагружения ВВЭР.

4. Для наиболее нагруженного АС 6 оболочек твэлов ВВЭР-1000, после 500 суточных циклов переменного нагружения РУ, усредненная по всем твэлам $\omega(\tau)$ при $\langle t_1 \rangle = \text{const}$ на 8,7 % больше, чем при $t_{\text{вх}} = \text{const}$, при одинаковой стабильности АО.

5. При эксплуатации ВВЭР в переменном режиме нагружения, управлять ресурсом оболочек твэлов следует путем управления температурным режимом теплоносителя и алгоритмом перестановок ТВС в АКЗ. Поскольку алгоритму перестановок ТВС, характеризующемуся большей глубиной выгорания B топлива, соответствует большая $\omega(\tau)$, алгоритм перестановок ТВС должен задаваться на основе баланса между B и $\omega(\tau)$.

Глава 5.

Управление перестановками ТВС и свойствами твэлов

5.1. Метод управления перестановками ТВС

На основе ЭВП-метода и КМ предложен метод управления перестановками ТВС, отличающийся учетом $\omega(\tau)$ и $B(\tau)$. Рассматривая ТВС, используемые при алгоритме перестановок j , контролируемые параметрами являются максимальное ω_j^{\max} и среднее $\langle \omega \rangle_j$ значения поврежденности, минимальное значение выгорания B_j^{\min} , а варьируемым ДФ является алгоритм перестановок ТВС (рис. 5.1) [15, 16, 29].

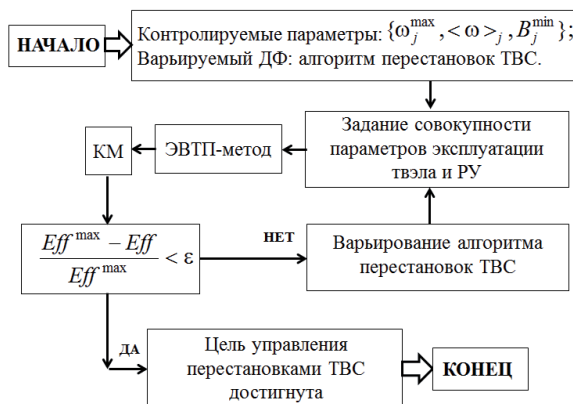


Рис. 5.1. Метод управления перестановками ТВС

5.2. Эффективность детерминистского управления перестановками

При рассмотрении всех ячеек в выделенном сегменте АКЗ ВВЭР-1000 (рис. 5.2) число возможных алгоритмов перестановок ТВС $N_{alg} = (7!)^3 = 128 \cdot 10^9$, поэтому применялся алгоритм случайного выбора ячеек с помощью функции MATLAB “rand” [44].

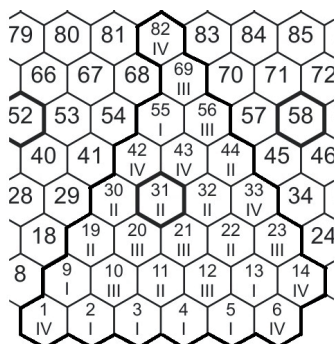


Рис. 5.2. Распределение ТВС в ячейках АКЗ по годам кампании: (арабская цифра) ячейка АКЗ; (римская цифра) ТВС 1, 2, 3 и 4-го года, соответственно

Используя модель перестановок ТВС во время перегрузок топлива (см. рис. 2.4), выполнен расчет $\omega(\tau)$ и $B(\tau)$ в АС 6, принимая во внимание размещение ОР в АКЗ для У-алгоритма, учитывая амплитуду перемещения ОР, необходимую для стабилизации АО по ПР с $t_{\text{вх}} = \text{const}$, по следующей процедуре:

1) Используя ПС ИР, при $N=80$ и 100 % $N_{\text{ном}}$ рассчитывались входящие в выражение (2.3) коэффициенты относительного энерговыделения $k_{v,6,j}$ в АС 6, для ячеек АКЗ, показанных на рис. 2.4 – табл. 5.1;

Таблица 5.1

Коэффициенты относительного энерговыделения

$N, \%$	ТВС	$k_{v,6,j}$	ТВС	$k_{v,6,j}$	ТВС	$k_{v,6,j}$	ТВС	$k_{v,6,j}$
100	2	0,99	11	1,235	10	1,16	1	0,37
80		1,03		1,285		1,205		0,38
100	3	1,125	19	1,385	12	1,16	6	0,345
80		1,17		1,445		1,2		0,36
100	4	1,12	22	1,39	20	1,165	14	0,56
80		1,165		1,445		1,2		0,58
100	5	0,98	30	1,39	21	1,195	33	1
80		1,02		1,435		1,24		1,035
100	9	1,325	31	1,42	23	0,995	42	0,975
80		1,38		1,47		1,03		1
100	13	1,315	32	1,395	56	1,055	43	0,98
80		1,375		1,445		1,08		1,005
100	55	1,36	44	1,365	69	1,005	82	0,705
80		1,4		1,41		1,03		0,715

2) Находились $q_{l,j,max}$ и $\langle q_{l,i,j} \rangle$ – табл. 5.2;

Таблица 5.2

$q_{l,j,max}$ и $\langle q_{l,i,j} \rangle$

$N, \%$	TBC	$q_{l,j,max};$ $\langle q_{l,i,j} \rangle$	TBC	$q_{l,j,max};$ $\langle q_{l,i,j} \rangle$	TBC	$q_{l,j,max};$ $\langle q_{l,i,j} \rangle$	TBC	$q_{l,j,max};$ $\langle q_{l,i,j} \rangle$
100	2	183,67; 166,82	11	224,95; 208,10	10	209,78; 195,46	1	65,715; 62,345
80		148,28; 138,84		182,65; 173,22		169,85; 162,43		53,92; 51,224
100	3	209,78; 189,56	19	247,70; 233,37	12	207,26; 195,46	6	62,345; 58,133
80		169,17; 157,72		201,53; 194,79		169,17; 161,76		50,55; 48,528
100	4	208,10; 188,72	22	247,70; 234,22	20	205,57; 196,30	14	99,415; 94,36
80		168,5; 157,04		202,87; 194,79		167,83; 161,76		80,88; 78,184
100	5	181,14; 165,13	30	243,48; 234,22	21	209,78; 201,36	33	174,40; 168,5
80		146,93; 137,50		200,18; 193,44		172,54; 167,15		142,89; 139,52
100	9	243,48; 223,26	31	250,22; 239,27	23	178,61; 167,66	42	169,34; 164,29
80		197,48; 186,02		205,57; 198,16		144,91; 138,84		138,84; 134,8
100	13	241,80; 221,58	32	244,33; 235,06	56	181,98; 177,77	43	168,5; 165,13
80		196,13; 185,35		200,85; 194,79		148,28; 145,58		138,84; 135,47
100	55	236,74; 229,16	44	238,43; 230,00	69	171,87; 169,34	82	119,64; 118,79
80		194,11; 188,72		195,46; 190,07		140,19; 138,84		97,056; 96,382

3) Находились соответствующие $q_{l,j,max}$ коэффициенты относительной мощности $k_{6,j}$ – табл. 5.3;

4) Используя ПС FEMAXI, модель коррозии MATPRO-A, ЭВТП-критерий при $A_0 = 30$ МДж/м³, рассчитывались ω (1460 сут) и B (1460 сут). Принимая $N_{alg} = 18$, анализировались 18 алгоритмов, содержащих 126 перестановок: 16 алгоритмов, содержащих 112 перестановок, выбирались случайно, а 2 алгоритма (алгоритмы 17 и 18) использованы на 5-м энергоблоке ЗАЭС [26].

Таблица 5.3

Коэффициенты относительной мощности $k_{6,j}$

$N, \%$	TBC	$k_{6,j}$	TBC	$k_{6,j}$	TBC	$k_{6,j}$	TBC	$k_{6,j}$
100	2	0,9083	11	0,9251	10	0,9317	1	0,9487
80		0,9363		0,9484		0,9563		0,95
100	3	0,9036	19	0,9421	12	0,9431	6	0,9324
80		0,9323		0,9666		0,9562		0,96
100	4	0,9069	22	0,9456	20	0,9549	14	0,9492
80		0,9320		0,9602		0,9638		0,9667
100	5	0,9116	30	0,962	21	0,9599	33	0,9662
80		0,9358		0,9663		0,9688		0,9764
100	9	0,917	31	0,9562	23	0,9387	42	0,9702
80		0,942		0,964		0,9581		0,9709
100	13	0,9164	32	0,9621	56	0,9769	43	0,98
80		0,945		0,9698		0,9818		0,9757
100	55	0,968	44	0,9646	69	0,9853	82	0,9929
80		0,9722		0,9724		0,9904		0,9931

Принято, что все алгоритмы удовлетворяют требованиям к максимально допустимой величине коэффициента неравномерности энерговыделения в АКЗ, используемым в ОЯБ АЭС. Алгоритмы 17 и 18, использованные во время кампаний 22 и 23, соответственно, а также три случайных алгоритма (2, 3 и 6) показаны в табл. 5.4.

Введены требования:

$$\omega^{\text{opt}} = \min\{\omega_j^{\text{max}}\}; \quad \langle \omega \rangle^{\text{opt}} = \min\{\langle \omega \rangle_j\}; \quad B^{\text{opt}} = \max\{B_j^{\text{min}}\}. \quad (5.1)$$

Принимая ω^{lim} , $\langle \omega \rangle^{\text{lim}}$ и B^{lim} в качестве пределов для контролируемых параметров, справедливо:

$$\omega^{\text{opt}} \leq \omega_j^{\text{max}} \leq \omega^{\text{lim}}; \quad \langle \omega \rangle^{\text{opt}} \leq \langle \omega \rangle_j \leq \langle \omega \rangle^{\text{lim}}; \quad B^{\text{lim}} \leq B_j^{\text{min}} \leq B^{\text{opt}}. \quad (5.2)$$

Отсюда

$$\omega^{\text{lim},*} \leq \omega_j^{\text{max},*} \leq 1; \quad \langle \omega \rangle^{\text{lim},*} \leq \langle \omega \rangle_j^* \leq 1; \quad B^{\text{lim},*} \leq B_j^{\text{min},*} \leq 1, \quad (5.3)$$

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

$$B^{\text{lim},*} = B^{\text{lim}} / B^{\text{opt}}; \quad B_j^{\text{min},*} = B_j^{\text{min}} / B^{\text{opt}}. \quad (5.4)$$

Таблица 5.4

Поврежденность оболочек и выгорание

Алгоритм	Перестановка	A, МДж/м ³	$\omega(\tau) = A / A_0, \%$	B, МВт·сут/кг
2	5-30-10-43	1,838	6,127	63,04
	9-11-20-1	1,443	4,81	57,26
	3-22-54-29	1,843	6,143	63,89
	13-19-21-42	2,652	8,84	68,13
	2-31-18	1,209	4,03	47,61
	55-41-12-6	1,955	6,517	59,1
3	4-32-68-8	1,368	4,56	57,02
	9-19-21-8	2,253	7,51	62,49
	5-41-68-43	1,391	4,637	60,47
	55-22-10	2,167	7,223	54,67
	13-11-20-6	1,421	4,737	56,8
	3-30-54-1	1,387	4,623	55,04
6	4-32-18-42	1,722	5,74	62,69
	2-31-12-29	1,976	6,587	63,88
	55-11-18-43	1,568	5,227	63,84
	13-32-20	2,019	6,73	54,19
	3-31-10-8	1,816	6,053	59,65
	9-19-68-42	2,054	6,847	65,55
17	4-41-12-29	1,935	6,45	64,93
	2-30-21-6	1,522	5,073	54,82
	5-22-54-1	1,238	4,127	53,05
	2-22-12-6	1,463	4,877	54,35
	3-41-29	1,184	3,947	48,8
	4-11-68-43	1,078	3,593	60,63
18	5-19-10-8	1,498	4,993	57,18
	9-30-20-1	2,058	6,86	59,39
	13-32-21-42	2,667	8,89	68,23
	55-31-54-18	2,437	8,123	67,45
	2-22-21-6	1,55	5,167	54,86
	3-41-68	1,18	3,933	48,83
18	4-11-29-18	1,159	3,863	60,84
	5-19-20-1	1,449	4,83	54,55
	9-32-12-42	2,586	8,62	67,86
	13-30-10-43	2,551	8,503	67,73
	55-31-54-8	1,982	6,607	61,37

Поскольку $|B^{\text{lim},*}; 1| \gg |\omega^{\text{lim},*}; 1|$, из условия равной приоритетности требований безопасности и экономичности эксплуатации твэлов [15]:

$$\omega^{\text{lim},*} = \langle \omega \rangle^{\text{lim},*} = B^{\text{lim},*}. \quad (5.5)$$

Следовательно, имея некоторое значение ω^{lim} , соответствующие $\langle \omega \rangle^{\text{lim}}$ и B^{lim} находятся из выражений:

$$\langle \omega \rangle^{\text{lim}} = 1 - \frac{(1 - \omega^{\text{lim}})(1 - \langle \omega \rangle^{\text{opt}})}{1 - \omega^{\text{opt}}}; \quad B^{\text{lim}} = \frac{(1 - \omega^{\text{lim}})B^{\text{opt}}}{1 - \omega^{\text{opt}}}. \quad (5.6)$$

Необходимо отметить, что хотя в публикации [15] использовалось условие (5.5), более универсальной записью критерия эффективности является запись на основе выражений (4.3), (4.4) которая не требует искусственного сужения границ диапазона допустимых значений глубины выгорания топлива при использовании выражения (5.5) [29]. Критерий (4.3) записан в виде

$$\begin{cases} \max\{Eff_j = 1 - \frac{L_j}{L^{\text{lim}}}\}, \\ L_j = \sqrt{(1 - \omega_j^{\text{max},*})^2 + (1 - \langle \omega \rangle_j^*)^2 + (1 - B_j^{\text{min},*})^2}; \\ L^{\text{lim}} = \sqrt{(1 - \omega^{\text{lim},*})^2 + (1 - \langle \omega \rangle^{\text{lim},*})^2 + (1 - B^{\text{lim},*})^2}. \end{cases} \quad (5.7)$$

Физический смысл критерия (5.7):

– если $\omega_j^{\text{max},*} > \omega^{\text{lim}}$ или $\langle \omega \rangle_j > \langle \omega \rangle^{\text{lim}}$ или $B_j^{\text{min}} < B^{\text{lim}}$ (т.е. любой из $\{\omega_j^{\text{max},*}, \langle \omega \rangle_j^*$ или $B_j^{\text{min},*}\}$ лежит вне допустимого интервала $[\omega^{\text{lim},*}; 1]$), то этот компонент вносит негативный вклад в Eff ;

– преимущество одного алгоритма над другим определяется на основе суммирования преимуществ, даваемых каждым из параметров $\omega_j^{\text{max},*}$, $\langle \omega \rangle_j$ и B_j^{min} ;

– при неравной приоритетности требований безопасности и экономичности возможно введение поправочных коэффициентов в (5.5), либо необходимо вместо выражений (5.7), (5.5) использовать выражения (4.3), (4.4).

Для метода управления балансом стационарного и переменного нагружения ВВЭР критерий эффективности управления можно записать аналогично выражению (5.7), поскольку оно позволяет достигать одновременно минимума поврежденности оболочек и максимума глубины выгорания топлива [29].

Принимая $\omega^{\text{lim}} = 13\%$, на основе (5.7) рассчитана Eff для 18 алгоритмов. Эффективность наихудшего алгоритма 2, первых пяти алгоритмов (3, 4, 6, 8, 14) с наибольшими Eff , а также практически использованных алгоритмов (17 и 18) приведена в табл. 5.5.

Эффективность алгоритмов перестановок ТВС

j	$\omega_j^{\max}, \%$	$\langle \omega \rangle_j, \%$	$B_j^{\min}, \text{МВт}\cdot\text{сут/кг}$	$\omega_j^{\max,*}$	$\langle \omega \rangle_j^*$	$\bar{\omega}_j^*$	$B_j^{\min,*}$	Eff_j
2	8,84	5,86	47,6	0,979	0,999	0,985	0,871	-0,144
3	7,51	5,87	54,7	0,993	0,999	0,995	1	0,937
4	6,87	5,8	54,1	1	1	1	0,989	0,901
6	6,85	5,79	53,1	1	1	1	0,970	0,741
8	7,02	5,77	54,3	0,998	1	0,999	0,993	0,934
14	8,25	5,86	54,1	0,985	0,999	0,989	0,989	0,837
17	8,89	5,9	48,8	0,978	0,999	0,985	0,893	0,042
18	8,62	5,93	48,8	0,981	0,998	0,987	0,893	0,052

Физический смысл результата:

– алгоритмы 3 и 8 характеризуются высокими показателями одновременно по долговечности оболочки (определяемой через ω_j^{\max} , $\langle \omega \rangle_j$) и глубине выгорания (B_j^{\min}), поэтому Eff_3 и Eff_8 – наибольшие;

– алгоритмы 17 и 18 по сравнению с алгоритмами 3 и 8 характеризуются как большей $\omega(1460 \text{ сут})$, так и меньшей $B(1460 \text{ сут})$, в результате Eff_{17} и Eff_{18} близки к 0;

– алгоритм 2 характеризуется $\omega(1460 \text{ сут})$, близкой к соответствующей величине для алгоритмов 17 и 18, но $B(1460 \text{ сут})$ значительно ниже соответствующих величин для алгоритмов 17 и 18, в результате $Eff_2 < 0$.

Цель управления перестановками ТВС достигнута при алгоритме 3.

Параметры $\omega_j^{\max,*}$ и $\langle \omega \rangle_j^*$ принадлежат к группе параметров, уменьшающихся с ростом $q_{l,j,\max}$. Напротив, $B_j^{\min,*}$ принадлежит к группе параметров, увеличивающихся с ростом $q_{l,j,\max}$. Поэтому выражение для L_j в (5.7) представлено в виде:

$$L_j = \sqrt{2(1 - \bar{\omega}_j^*)^2 + (1 - B_j^{\min,*})^2}, \quad \bar{\omega}_j^* = 1 - \sqrt{0,5[(1 - \omega_j^{\max,*})^2 + (1 - \langle \omega \rangle_j^*)^2]}, \quad (5.8)$$

Используя (5.7) и (5.8), может быть построена поверхность

$Eff_j(\bar{\omega}_j^*, B_j^{\min,*})$ эффективности перестановок ТВС – рис. 5.3.

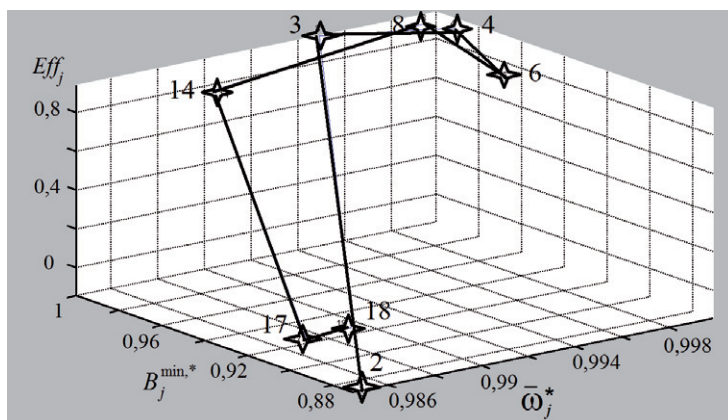


Рис. 5.3. Схема поверхности эффективности перестановок ТВС

Кроме снижения ω_j^{\max} и $\langle \omega \rangle_j$, а также повышения B_j^{\min} , физический смысл повышения эффективности алгоритма заключается в уменьшении интервалов изменения $\Delta\omega$ (1460 сут) и ΔB (1460 сут) в алгоритме (табл. 5.6).

Таблица 5.6

Средние значения и интервалы изменения ω и B

j	Eff_j	$\langle \omega \rangle, \%$	$\Delta\omega, \%$	$\langle B \rangle, \text{МВт}\cdot\text{сут/кг}$	$\Delta B, \text{МВт}\cdot\text{сут/кг}$
3	0,937	5,865	2,887	59,43	9,21
6	0,741	5,787	2,72	59,43	12,5
17	0,042	5,898	5,303	59,43	19,43
18	0,052	5,932	4,757	59,43	19,03

Следовательно, метод управления перестановками ТВС в АКЗ ВВЭР может применяться для выбора алгоритма перестановок, характеризующегося высокими показателями одновременно по долговечности оболочек твэлов и глубине выгорания топлива.

5.3. Вероятностная модель параметров эксплуатации твэла

Вероятностная модель (ВМ) параметров эксплуатации твэла основана на

законе нормального распределения и методе выборок Монте-Карло (МК), что обеспечивает учет неопределенности в знании основных ДФ [15].

Допущения ВМ:

1) Рассчитанное на основе модели изменения свойств твэла значение j -го ДФ d_j является средним соответствующей случайной величины d_j^{rand}

$$d_j \equiv \langle d_j^{\text{rand}} \rangle. \quad (5.9)$$

2) Контролируемые параметры c_i рассчитываются при $[\langle d^{\text{rand}} \rangle - \Delta d]$ и $[\langle d^{\text{rand}} \rangle + \Delta d]$, Δd – интервал изменения d_j^{rand} ($n_d = 1$);

3) Используя правило трех сигм нормального распределения, определяются средние величины $\langle c_i \rangle$ и стандартные отклонения $\sigma(c_i)$;

4) Получая на основе $\langle c_i \rangle$ и $\sigma(c_i)$ выборки МК, рассчитываются выборки $Eff\{c_i\}$, определяются средние $\langle Eff\{c_i\} \rangle$ и стандартные отклонения $\sigma(Eff\{c_i\})$ для совокупностей ДФ;

5) В координатах $\{\sigma(Eff\{c_i\}); \langle Eff\{c_i\} \rangle\}$ строится кривая эффективности для совокупностей ДФ и осуществляется выбор наилучших из них.

5.4. Уменьшение количества детерминирующих факторов

Оценка интервалов неопределенности Δd выполнялась для наиболее значимых ДФ $q_{l,\text{max}}$ и $t_{\text{вх}}$. Точность расчета $q_{l,\text{max}}$ по ПС ИР составляет 5 % [38]. С учетом точности измерения и регулирования, возможное отклонение от номинального значения для N и $t_{\text{вх}}$ составляет 4 % и < 1 % , соответственно [45].

Поскольку неопределенность в знании $q_{l,\text{max}}$ в 5 раз превышает соответствующую величину для $t_{\text{вх}}$, а параметр $\delta A_{t,\pm}$ для $q_{l,\text{max}}$ более чем в 3 раза превышает соответствующую величину для $t_{\text{вх}}$, в ВМ учитывалась неопределенность в знании только $q_{l,\text{max}}$, а неучет $t_{\text{вх}}$ компенсировался консервативностью

задания интервала неопределенности $q_{l,\max}$.

5.5. Робастная модель управления перестановками ТВС

Расчетная величина $q_{l,j,\max}$ является средним некоторой случайной величины $q_{l,j,\max}^{\text{rand}}$, т.е.

$$q_{l,j,\max} \equiv \langle q_{l,j,\max}^{\text{rand}} \rangle. \quad (5.10)$$

При $\langle q_{l,n,\max}^{\text{rand}} \rangle - 10\%$ и $\langle q_{l,n,\max}^{\text{rand}} \rangle + 10\%$ рассчитаны $\omega(\tau)$ и B для перестановок алгоритмов 3, 4, 6, 8 и 14, имеющих наибольшие значения Eff , где n – номер ячейки АКЗ для соответствующего года кампании.

Использование детерминистского критерия (5.7) позволило уменьшить N_{alg} с 18 до 5. В робастном случае каждая перестановка k алгоритма j описывается случайными величинами $\omega_{j,k}^{\text{rand}}$ и $B_{j,k}^{\text{rand}}$. При этом справедливо:

$$\omega_j^{\max} = \max\{\omega_{j,k}^{\text{rand}}\}; \quad (5.11)$$

$$\langle \omega \rangle_j = \langle \omega_{j,k}^{\text{rand}} \rangle; \quad (5.12)$$

$$B_j^{\min} = \min\{B_{j,k}^{\text{rand}}\}, \quad (5.13)$$

где $j=1, \dots, N_{alg}$; $k=1, \dots, 7$.

При $N_{alg}=5$ 35 перестановок ТВС описываются $2 \cdot N_{alg} \cdot 7 = 70$ случайными величинами. Для $k=1, \dots, 7$ и $j=3, 4, 6, 8, 14$, используя правило трех сигм, вычислялись средние $\langle \omega_{j,k}^{\text{rand}} \rangle$, $\langle B_{j,k}^{\text{rand}} \rangle$ и стандартные отклонения $\sigma(\omega_{j,k}^{\text{rand}})$, $\sigma(B_{j,k}^{\text{rand}})$ случайных величин $\omega_{j,k}^{\text{rand}}$ и $B_{j,k}^{\text{rand}}$.

Алгоритм 3 (9-19-21-8 + 5-41-68-43 + 55-22-10 + 13-11-20-6 + 3-30-54-1 + 4-32-18-42 + 2-31-12-29) описывался случайными величинами $\tau_{j,p,k}$, где $p=1$ обозначает $\omega_{j,k}^{\text{rand}}$ и $p=2$ обозначает $B_{j,k}^{\text{rand}}$:

$$\tau_{3,1,1} \equiv \omega_{9-19-21-8}^{\text{rand}}; \dots \tau_{3,1,7} \equiv \omega_{2-31-12-29}^{\text{rand}}; \tau_{3,2,1} \equiv B_{9-19-21-8}^{\text{rand}}; \dots \tau_{3,2,7} \equiv B_{2-31-12-29}^{\text{rand}}. \quad (5.14)$$

Например, для перестановки 9-19-21-8 алгоритма 3 случайные величины $\tau_{3,1,1}$ и $\tau_{3,2,1}$ описываются через $\{ \langle \omega_{3,1}^{\text{rand}} \rangle, \sigma(\omega_{3,1}^{\text{rand}}) \}$ и $\{ \langle B_{3,1}^{\text{rand}} \rangle, \sigma(B_{3,1}^{\text{rand}}) \}$, соответственно.

5.6. Простейшее робастное управление перестановками

В качестве простейшего примера управления перестановками ТВС ВВЭР-1000 рассматривался случай, когда для ТВС каждого года кампании в пределах выделенного сегмента АКЗ назначены две ячейки. Принималось, что в ходе 4-летнего топливного цикла две ТВС могут помещаться в ячейки 2, 55, 11, 44, 10, 69, 6, 43, и имеют 8 уникальных вариантов перестановок в пределах сегмента АКЗ (рис. 5.4).

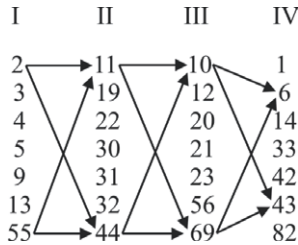


Рис. 5.4. Перемещения ТВС при перестановках: (число) ячейка АКЗ; (I, II, III и IV) 1, 2, 3 и 4-й год кампании, соответственно

Пусть

$$\omega^{\text{lim}} = 5 \% ; \langle \omega \rangle^{\text{lim}} = 4 \% ; B^{\text{lim}} = 55 \text{ МВт} \cdot \text{сут/кг}. \quad (5.15)$$

Принимая 4-летний алгоритм перестановок ТВС, значения поврежденности оболочек $\omega(\tau)$ рассчитаны используя следующую процедуру:

- 1) Расчет $\sigma_e(\tau)$, $\dot{p}_e(\tau)$ и $\sigma_0(\tau)$;
- 2) Расчет $A(\tau = 1460 \text{ сут})$;
- 3) Расчет $\omega(1460 \text{ сут}) = A(1460 \text{ сут}) / A_0$ при $A_0 = 40 \text{ МДж/м}^3$ (табл. 5.7).

Таблица 5.7

Поврежденность оболочек и выгорание топлива для $\tau=1460$ сут

j	I	II	III	IV	A , МДж/м ³	$\omega(\tau)$, %	$B(\tau)$, МВт·сут/кг
1	2	11	10	6	0,9786	2,447	55,13
	55	44	69	43	1,9650	4,913	67,38
2	55	11	10	6	1,4856	3,714	59,98
	2	44	69	43	1,4078	3,52	62,53
3	2	11	69	6	0,5619	1,405	52,29
	55	44	10	43	2,4627	6,157	70,22
4	55	11	69	6	1,1537	2,884	57,14
	2	44	10	43	1,7566	4,392	65,37
5	2	11	10	43	1,3869	3,467	63,99
	55	44	69	6	1,5695	3,924	58,52
6	55	11	10	43	1,882	4,705	68,84
	2	44	69	6	1,0104	2,526	53,67
7	2	11	69	43	0,8953	2,238	61,15
	55	44	10	6	1,9913	4,978	61,36
8	55	11	69	43	1,546	3,865	66,00
	2	44	10	6	1,357	3,393	56,51

Используя выражения (5.1)–(5.4), на основе данных табл. 5.7 рассчитаны компоненты критерия эффективности перестановок ТВС (табл. 5.8).

Таблица 5.8

Компоненты критерия эффективности перестановок ТВС

j	Алгоритм	ω_j^{\max} , %	$\omega_j^{\max,*}$	$\langle \omega \rangle_j$, %	$\langle \omega \rangle_j^*$	B_j^{\min} , МВт·сут/кг	$B_j^{\min,*}$
1	2-11-10-6	4,913	0,9875	3,68	0,9992	55,13	0,9016
	55-44-69-43						
2	55-11-10-6	3,714	1	3,617	0,9999	59,98	0,9809
	2-44-69-43						
3	2-11-69-6	6,157	–	3,781	–	52,29	–
	55-44-10-43						
4	55-11-69-6	4,392	0,9930	3,638	0,9997	57,14	0,9344
	2-44-10-43						
5	2-11-10-43	3,924	0,9978	3,696	0,9991	58,52	0,9570
	55-44-69-6						
6	55-11-10-43	4,705	0,9897	3,616	0,9999	53,67	–
	2-44-69-6						
7	2-11-69-43	4,978	0,9869	3,608	1	61,15	1
	55-44-10-6						
8	55-11-69-43	3,865	0,9984	3,629	0,9998	56,51	0,9241
	2-44-10-6						

Найдены

$$\omega^{\text{opt}} = 3,714 \% ; < \omega >^{\text{opt}} = 3,608 \% ; B^{\text{opt}} = 61,15 \text{ МВт} \cdot \text{сут/кг}. \quad (5.16)$$

Определено значение $L^{\text{lim}} = 0,1019$, допустимые значения компонентов критерия $\{\omega_j^{\text{max,*}}, < \omega >_j^*, B_j^{\text{min,*}}\}$ лежат в диапазонах:

$$0,987 \leq \omega_j^{\text{max,*}} \leq 1 ; 0,996 \leq < \omega >_j^* \leq 1 ; 0,899 \leq B_j^{\text{min,*}} \leq 1. \quad (5.17)$$

Используя выражение (5.7), на основе данных табл. 5.8 рассчитана эффективность j -го алгоритма перестановок ТВС (табл. 5.9).

Таблица 5.9

Эффективность алгоритма перестановок ТВС

j	Алгоритм	$\omega_j^{\text{max,*}}$	$< \omega >_j^*$	$B_j^{\text{min,*}}$	L_j	L_j / L_{max}	Eff_j
1	2-11-10-6	0,9875	0,9992	0,9016	0,0992	0,9735	0,0265
	55-44-69-43						
2	55-11-10-6	1	0,9999	0,9809	0,0191	0,1874	0,8126
	2-44-69-43						
4	55-11-69-6	0,9930	0,9997	0,9344	0,066	0,6477	0,3523
	2-44-10-43						
5	2-11-10-43	0,9978	0,9991	0,9570	0,0431	0,423	0,577
	55-44-69-6						
7	2-11-69-43	0,9869	1	1	0,0131	0,1286	0,8714
	55-44-10-6						
8	55-11-69-43	0,9984	0,9998	0,9241	0,0759	0,7448	0,2552
	2-44-10-6						

Следовательно, эффективность различных алгоритмов перестановок ТВС может быть оценена численно, анализируя топливо на двух уровнях: безопасность (поврежденность оболочек твэлов) и экономичность эксплуатации твэлов (глубина выгорания топлива).

Для детерминистского случая получено, что алгоритм (2-11-69-43 + 55-44-10-6) имеет максимальную эффективность $Eff=0,8714$, тогда как алгоритм (2-11-10-6 + 55-44-69-43) имеет минимальную эффективность $Eff=0,0265$ (рассматривая только допустимые алгоритмы с $Eff > 0$).

Удельная энергия рассеяния, поврежденность оболочек твэлов и выгорание топлива, после 4 лет эксплуатации в АКЗ ВВЭР-1000, оценивались для алго-

ритмов перестановок ТВС при $\Delta q_{l,j,\max} = 10\%$ – табл. 5.10 и 5.11 (размерность величин опущена).

Таблица 5.10

**Удельная энергия рассеяния, поврежденность и выгорание
для перестановок ТВС**

Перестановка	$q_{l,j,\max} \equiv \langle q_{l,j,\max}^{\text{random}} \rangle$			$\langle q_{l,j,\max}^{\text{random}} \rangle - 10\%$			$\langle q_{l,j,\max}^{\text{random}} \rangle + 10\%$		
	A	ω	B	A	ω	B	A	ω	B
2-11-10-6	0,9786	2,447	55,13	0,3989	0,997	49,62	1,9727	4,932	60,65
55-44-69-43	1,9650	4,913	67,38	0,8264	2,066	60,64	4,3085	10,77	74,12
55-11-10-6	1,4856	3,714	59,98	0,6060	1,515	53,98	3,3392	8,348	65,98
2-44-69-43	1,4078	3,52	62,53	0,5143	1,286	56,28	2,5634	6,409	68,79
2-11-69-6	0,5619	1,405	52,29	0,3646	0,912	47,06	1,3609	3,402	57,52
55-44-10-43	2,4627	6,157	70,22	1,1718	2,93	63,20	5,7899	14,47	77,24
55-11-69-6	1,1537	2,884	57,14	0,3937	0,984	51,43	2,2785	5,696	62,85
2-44-10-43	1,7566	4,392	65,37	0,7545	1,886	58,84	3,7639	9,410	71,91
2-11-10-43	1,3869	3,467	63,99	0,5475	1,369	57,59	2,6672	6,668	70,39
55-44-69-6	1,5695	3,924	58,52	0,6111	1,528	52,67	3,4151	8,538	64,37
55-11-10-43	1,882	4,705	68,84	0,8320	2,08	61,96	4,3102	10,78	75,73
2-44-69-6	1,0104	2,526	53,67	0,3851	0,963	48,30	1,9190	4,798	59,04
2-11-69-43	0,8953	2,238	61,15	0,3831	0,958	55,04	1,9052	4,763	67,27
55-44-10-6	1,9913	4,978	61,36	0,8958	2,240	55,22	4,6509	11,63	67,49
55-11-69-43	1,546	3,865	66,00	0,5557	1,389	59,40	3,0092	7,523	72,60
2-44-10-6	1,357	3,393	56,51	0,5512	1,378	50,86	2,8936	7,234	62,16

Для j -го алгоритма перестановок ТВС находились: средняя поврежденность оболочек твэлов $\langle \omega_j \rangle$, интервал $\Delta \omega_j$, а также аналогичные величины для выгорания топлива ($\langle B_j \rangle$ и ΔB_j). Используя $\Delta \omega_j$ и ΔB_j , учитывая правило трех сигм нормального распределения, находились стандартные отклонения $\sigma(\omega_j^{\text{rand}})$ и $\sigma(B_j^{\text{rand}})$ для случайных величин ω_j^{rand} и B_j^{rand} (табл. 5.11).

Рассматривая случайную величину ω_j^{rand} , распределенную по Гауссовскому закону, находилась плотность вероятности для ω_j^{rand} (аналогично для B_j^{rand})

$$f(x_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x_i - \langle x_i \rangle)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (5.18)$$

где $x_1 \equiv \omega_j^{\text{rand}}$; $x_2 \equiv B_j^{\text{rand}}$.

Таблица 5.11

Стандартные отклонения для ω_j^{rand} и B_j^{rand}

Перестановка	$\langle \omega_j \rangle$	$\Delta \omega_j$	$\sigma(\omega_j^{\text{rand}})$	$\langle B_j \rangle$	ΔB_j	$\sigma(B_j^{\text{rand}})$
2-11-10-6	2,965	1,967	0,656	55,135	5,515	1,838
55-44-69-43	6,418	4,352	1,451	67,38	6,74	2,247
55-11-10-6	4,932	3,416	1,139	59,98	6	2
2-44-69-43	3,848	2,561	0,854	62,535	6,255	2,085
2-11-69-6	2,157	1,245	0,415	52,29	5,23	1,743
55-44-10-43	8,7	5,77	1,923	70,22	7,02	2,34
55-11-69-6	3,34	2,356	0,785	57,14	5,71	1,903
2-44-10-43	5,648	3,762	1,254	65,375	6,535	2,178
2-11-10-43	4,019	2,65	0,883	63,99	6,4	2,133
55-44-69-6	5,033	3,505	1,168	58,52	5,85	1,95
55-11-10-43	6,43	4,35	1,45	68,845	6,885	2,295
2-44-69-6	2,881	1,918	0,639	53,67	5,37	1,79
2-11-69-43	2,861	1,903	0,634	61,155	6,115	2,038
55-44-10-6	6,935	4,695	1,565	61,355	6,135	2,045
55-11-69-43	4,456	3,067	1,022	66	6,6	2,2
2-44-10-6	4,306	2,928	0,976	56,51	5,65	1,883

Плотность вероятности ω_j^{rand} и B_j^{rand} в обобщенном виде имеет вид:

$$f(x_i) = k_{1,j} \cdot \exp(-k_{2,j} \cdot (x_i - k_{3,j})^2), \quad (5.19)$$

где $k_{1,j}$ – $k_{3,j}$ приведены в табл. 5.12.

Для упрощения решения задачи $\omega^{\text{opt}}, \langle \omega \rangle^{\text{opt}}, B^{\text{opt}}, \omega^{\text{lim}}, \langle \omega \rangle^{\text{lim}}, B^{\text{lim}}$ в случае робастных условий задавались равными соответствующим величинам для детерминистского случая [15].

Эффективность j -го алгоритма перестановок рассчитывалась по критерию (5.7), где $\omega_j^{\text{max}} = \max \{ \omega_j^{\text{rand}} \}$, $\langle \omega \rangle_j = \langle \omega_j^{\text{rand}} \rangle$, $B_j^{\text{min}} = \min \{ B_j^{\text{rand}} \}$.

Например, алгоритм 1 (2-11-10-6 + 55-44-69-43):

$$\tau_{1,1,1} \equiv \omega_{2-11-10-6}^{\text{rand}}; \tau_{1,1,2} \equiv \omega_{55-44-69-43}^{\text{rand}}; \tau_{1,2,1} \equiv B_{2-11-10-6}^{\text{rand}}; \tau_{1,2,2} \equiv B_{55-44-69-43}^{\text{rand}};$$

$$\theta_{1,1,1} = \max \{ \tau_{1,1,1}, \tau_{1,1,2} \}; \theta_{1,1,2} = \text{mean} \{ \tau_{1,1,1}, \tau_{1,1,2} \}; \theta_{1,2,1} = \min \{ \tau_{1,2,1}, \tau_{1,2,2} \};$$

Таблица 5.12

 $k_{1,j} \dots k_{3,j}$

№	Перестановка	ω_j^{rand}			B_j^{rand}		
		$k_{1,j}$	$k_{2,j}$	$k_{3,j}$	$k_{1,j}$	$k_{2,j}$	$k_{3,j}$
1	2-11-10-6	0,6081	1,162	2,965	0,217	0,148	55,135
2	55-44-69-43	0,2749	0,2375	6,418	0,1775	0,099	67,38
3	55-11-10-6	0,3502	0,3854	4,932	0,1995	0,125	59,98
4	2-44-69-43	0,4671	0,6856	3,848	0,1913	0,115	62,535
5	2-11-69-6	0,9612	2,9036	2,157	0,2289	0,1646	52,29
6	55-44-10-43	0,2074	0,1352	8,7	0,1705	0,0913	70,22
7	55-11-69-6	0,5082	0,8114	3,34	0,2096	0,1381	57,14
8	2-44-10-43	0,3181	0,318	5,648	0,1831	0,1054	65,375
9	2-11-10-43	0,4518	0,6413	4,019	0,187	0,1099	63,99
10	55-44-69-6	0,3415	0,3665	5,033	0,2046	0,1315	58,52
11	55-11-10-43	0,2751	0,2378	6,43	0,1738	0,0949	68,845
12	2-44-69-6	0,6243	1,2246	2,881	0,2228	0,1561	53,67
13	2-11-69-43	0,6292	1,2438	2,861	0,1957	0,1204	61,155
14	55-44-10-6	0,2549	0,2041	6,935	0,1951	0,1196	61,355
15	55-11-69-43	0,3903	0,4787	4,456	0,1813	0,1033	66
16	2-44-10-6	0,4087	0,5249	4,306	0,2118	0,141	56,51

Случайные величины $\theta_{1,1,1}$, $\theta_{1,1,2}$ и $\theta_{1,2,1}$ не являются независимыми.

Использовался метод выборок Монте-Карло. Ряд нормально распределенных случайных величин τ получался используя функцию “normrnd” [44] на основе средних M_τ и стандартных отклонений σ_τ случайных величин $\{\omega_j^{\text{rand}}\}$ и $\{B_j^{\text{rand}}\}$ – табл. 5.13.

Подставляя M_τ и σ_τ в функцию “normrnd”, эффективность j -го алгоритма перестановок ТВС для робастного случая рассчитывалась используя критерий (5.7) в виде

$$\max\{Eff_j = f(\theta_{j,1,1}, \theta_{j,1,2}, \theta_{j,2,1})\}, \quad (5.20)$$

где $j=1\dots 8$;

$$\theta_{j,1,1} = \max\{\tau_{j,1,1}, \tau_{j,1,2}\}; \theta_{j,1,2} = \text{mean}\{\tau_{j,1,1}, \tau_{j,1,2}\}; \theta_{j,2,1} = \min\{\tau_{j,2,1}, \tau_{j,2,2}\}.$$

Результаты сравнения эффективности перестановок ТВС в робастном случае (рис. 5.5) в целом соответствуют детерминистским результатам (табл. 5.9).

Таблица 5.13

Средние M_τ и стандартные отклонения σ_τ $\{\omega_j^{\text{rand}}\}$ и $\{B_j^{\text{rand}}\}$

j	Перестановка	τ	$M_\tau, \%$	$\sigma_\tau, \%$	τ	$M_\tau, \text{МВт}\cdot\text{сут/кг}$	$\sigma_\tau, \text{МВт}\cdot\text{сут/кг}$
1	2-11-10-6	$\tau_{1,1,1}$	2,965	0,656	$\tau_{1,2,1}$	55,135	1,838
	55-44-69-43	$\tau_{1,1,2}$	6,418	1,451	$\tau_{1,2,2}$	67,38	2,247
2	55-11-10-6	$\tau_{2,1,1}$	4,932	1,139	$\tau_{2,2,1}$	59,98	2
	2-44-69-43	$\tau_{2,1,2}$	3,848	0,854	$\tau_{2,2,2}$	62,535	2,085
3	2-11-69-6	$\tau_{3,1,1}$	2,157	0,415	$\tau_{3,2,1}$	52,29	1,743
	55-44-10-43	$\tau_{3,1,2}$	8,7	1,923	$\tau_{3,2,2}$	70,22	2,34
4	55-11-69-6	$\tau_{4,1,1}$	3,34	0,785	$\tau_{4,2,1}$	57,14	1,903
	2-44-10-43	$\tau_{4,1,2}$	5,648	1,254	$\tau_{4,2,2}$	65,375	2,178
5	2-11-10-43	$\tau_{5,1,1}$	4,019	0,883	$\tau_{5,2,1}$	63,99	2,133
	55-44-69-6	$\tau_{5,1,2}$	5,033	1,168	$\tau_{5,2,2}$	58,52	1,95
6	55-11-10-43	$\tau_{6,1,1}$	6,43	1,45	$\tau_{6,2,1}$	68,845	2,295
	2-44-69-6	$\tau_{6,1,2}$	2,881	0,639	$\tau_{6,2,2}$	53,67	1,79
7	2-11-69-43	$\tau_{7,1,1}$	2,861	0,634	$\tau_{7,2,1}$	61,155	2,038
	55-44-10-6	$\tau_{7,1,2}$	6,935	1,565	$\tau_{7,2,2}$	61,355	2,045
8	55-11-69-43	$\tau_{8,1,1}$	4,456	1,022	$\tau_{8,2,1}$	66	2,2
	2-44-10-6	$\tau_{8,1,2}$	4,306	0,976	$\tau_{8,2,2}$	56,51	1,883

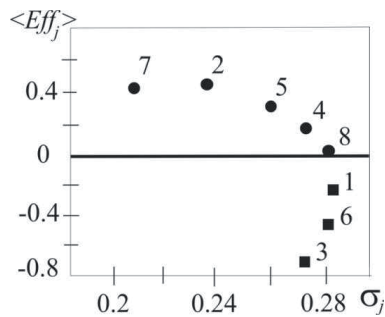


Рис. 5.5. $\langle Eff_j \rangle$ и $\sigma(Eff_j)$ в простейшем случае робастного управления: (число) алгоритм перестановок

Эффективность перестановок ТВС для робастных условий значительно уменьшилась по сравнению с детерминистским случаем (табл. 5.14).

Эффективность перестановок ТВС

j	Eff_j	$\sigma(Eff_j)$	$\langle Eff_j \rangle$
1	0,0265	0,2858	-0,2275
2	0,8126	0,2371	0,4377
3	–	0,2734	-0,7248
4	0,3523	0,2746	0,1577
5	0,577	0,2607	0,3014
6	–	0,2841	-0,4529
7	0,8714	0,2090	0,4232
8	0,2552	0,2831	0,0329

5.7. Эффективность робастного управления перестановками ТВС

При большом количестве случайных переменных наиболее привлекательным по эффективности расчетов является метод выборок МК [15]. Ряд нормально распределенных случайных величин $\tau_{j,p,k}$ получался подставляя средние и стандартные отклонения случайных величин $\omega_{j,k}^{\text{rand}}$ и $B_{j,k}^{\text{rand}}$ в функцию MATLAB “normrnd” [44]. Критерий (5.20) записан в виде

$$\max\{Eff_j = f(\theta_{j,1,1}, \theta_{j,1,2}, \theta_{j,2,1})\}, \quad (5.21)$$

где $\theta_{j,1,1} = \max\{\tau_{j,1,1}, \dots, \tau_{j,1,7}\}$; $\theta_{j,1,2} = \langle \tau_{j,1,1}, \dots, \tau_{j,1,7} \rangle$; $\theta_{j,2,1} = \min\{\tau_{j,2,1}, \dots, \tau_{j,2,7}\}$.

Параметры ω^{opt} , $\langle \omega \rangle^{\text{opt}}$, B^{opt} и L^{lim} робастной КМ не равны соответствующим константам детерминистской КМ [16, 29, 39] – табл. 5.15.

Таблица 5.15

Отличие робастной КМ от детерминистской

Детерминистская КМ	Робастная КМ																
ω^{opt} , $\langle \omega \rangle^{\text{opt}}$, B^{opt} – константы: $\omega^{\text{opt}} = 6,85 \%$; $\langle \omega \rangle^{\text{opt}} = 5,77 \%$; $B^{\text{opt}} = 54,7 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг}$	ω^{opt} , $\langle \omega \rangle^{\text{opt}}$, B^{opt} – зависят от выборки: <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Выборка</th> <th>ω^{opt}</th> <th>$\langle \omega \rangle^{\text{opt}}$</th> <th>$B^{\text{opt}}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>8,12</td> <td>6,79</td> <td>55,2</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>10,7</td> <td>7,93</td> <td>55,7</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>9,95</td> <td>7,45</td> <td>53,8</td> </tr> </tbody> </table>	Выборка	ω^{opt}	$\langle \omega \rangle^{\text{opt}}$	B^{opt}	1	8,12	6,79	55,2	10	10,7	7,93	55,7	100	9,95	7,45	53,8
Выборка	ω^{opt}	$\langle \omega \rangle^{\text{opt}}$	B^{opt}														
1	8,12	6,79	55,2														
10	10,7	7,93	55,7														
100	9,95	7,45	53,8														
$\langle \omega \rangle^{\text{lim}}$, B^{lim} , L^{lim} , $\omega^{\text{lim,*}}$ – константы	$\langle \omega \rangle^{\text{lim}}$, B^{lim} , L^{lim} , $\omega^{\text{lim,*}}$ – зависят от выборки																

Если N_{alg} увеличивается, то ω^{opt} уменьшается. Если число ячеек АКЗ, используемых для управления перестановками ТВС, увеличивается, то ω^{opt} увеличивается.

На основе 100 выборок метода МК, приняв $\omega^{lim}=13\%$, соотношение между $\langle Eff_j \rangle$ и $\sigma(Eff_j)$ для 5 самых эффективных алгоритмов перестановок ТВС ($A_0=30$ МДж/м³), а также для 8 случайно выбранных алгоритмов в простейшем случае робастного управления, когда для ТВС каждого года учитываются только 2 ячейки АКЗ ($A_0=40$ МДж/м³, учитывались параметры ω^{opt} , $\langle \omega \rangle^{opt}$, B^{opt} и L^{lim} для робастного случая), показано на рис. 5.6.

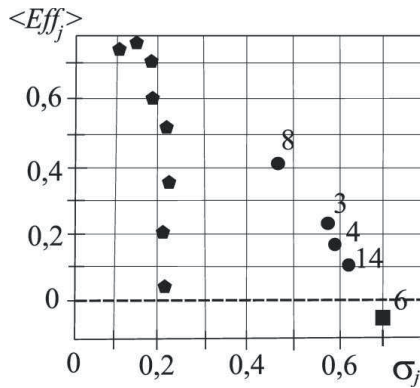


Рис. 5.6. Связь между $\langle Eff_j \rangle$ и $\sigma(Eff_j)$: (число) алгоритм перестановок; (пятиугольник) случайный алгоритм простейшего управления

Результаты робастного анализа Eff в целом соответствуют результатам детерминистского анализа (табл. 5.5 и рис. 5.6). Наибольшую эффективность в детерминистском случае имеет алгоритм 3, тогда как в робастном – алгоритм 8. Это объясняется тем, что $\omega_3^{max} = 7,5\%$, тогда как $\omega_8^{max} = 7\%$. Поскольку $q_{l,j,max}$ сильно влияет на $A(\tau)$ по нелинейному закону, при учете робастных условий $\langle Eff_8 \rangle > \langle Eff_3 \rangle$.

Так как $\sigma(Eff_3) > \sigma(Eff_8)$, то нет неопределенности в выборе между этими двумя вариантами. Алгоритм 8 доминирует над всеми другими, имея одновре-

менно более высокое значение $\langle Eff_j \rangle$ и более низкое $\sigma(Eff_j)$, цель робастного управления перестановками ТВС достигнута при алгоритме 8 [16, 29, 39].

5.8. Метод управления свойствами твэлов

На основе методов управления конструкционными параметрами твэла – М(1), расположением регулирующей группы ОР СУЗ в АКЗ – М(2), балансом стационарного и переменного нагружения РУ – М(3), температурным режимом теплоносителя – М(4), перестановками ТВС в АКЗ – М(5), синтезирован метод управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР, отличающийся учетом поврежденности оболочек в нормальных условиях их эксплуатации, балансом безопасности и экономичности эксплуатации твэлов, итерационным заданием главных ДФ (рис. 5.7) [16, 29].

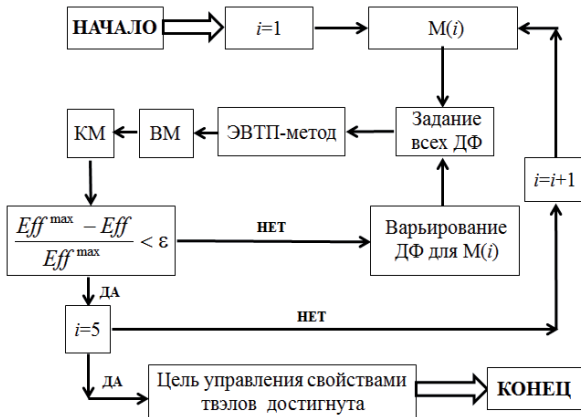


Рис. 5.7. Метод управления свойствами твэлов

Физический смысл метода управления свойствами твэлов состоит в снижении размерности векторов контролируемых параметров и ДФ за счет последовательного алгоритма управления свойствами твэлов по методам М(1)...М(5).

Это позволяет учесть влияние главных ДФ ($q_{l,max}, t_{вх}$, конструкционные па-

раметры) на контролируемые параметры, описывающие безопасность (ω) и экономичность (B) эксплуатации твэлов, максимально снизить размерность пространства случайных величин, описывающих свойства твэлов.

5.9. Выводы по пятой главе

1. Предложен метод управления перестановками ТВС в АКЗ реактора типа ВВЭР при нормальных условиях эксплуатации, на основе учета лимитирующих требований одновременно к долговечности оболочек твэлов и глубине выгорания топлива, путем использования критерия эффективности перестановок ТВС.

2. Предложен робастный метод управления свойствами твэлов ВВЭР путем выбора оптимального алгоритма перестановок ТВС в АКЗ, на основе метода Монте-Карло и использования вероятностной модели учета недоверности знания параметров эксплуатации реактора.

3. Предложен метод управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР, на основе последовательного использования методов управления конструкционными параметрами твэла, расположением регулирующей группы ОР СУЗ в АКЗ, балансом стационарного и переменного нагружения РУ, температурным режимом теплоносителя, а также робастного метода управления перестановками ТВС в АКЗ.

4. Поскольку результаты робастного анализа эффективности перестановок ТВС в основном соответствуют детерминистским результатам и являются более консервативными, для сокращения расчетных затрат целесообразно перед робастным анализом выполнять анализ эффективности перестановок ТВС в детерминистской постановке.

5. ЭВТП-метод позволяет усовершенствовать оборудование для контроля состояния АКЗ ВВЭР путем создания автоматизированного программно-технического комплекса, в режиме реального времени осуществляющего контроль поврежденности оболочек твэлов и управление перестановками ТВС в нормальных условиях эксплуатации РУ.

Выводы

В работе создано новое научное направление – управление свойствами твэлов ВВЭР на стадиях проектирования и эксплуатации реактора с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности оболочек твэлов, с целью повышения эффективности эксплуатации твэлов за счет обеспечения баланса между безопасностью и экономичностью эксплуатации.

В результате решения задач исследования устранено научно-техническое противоречие. Это позволяет: снизить консерватизм оценки условий разгерметизации оболочки твэла за счет снижения в 5 раз коэффициента запаса по группе прочностных критериев приемки твэла; снизить вероятность разгерметизации оболочек твэлов ВВЭР; расширить границы и повысить экономичность эксплуатации ВВЭР; разработать автоматизированный программно-технический комплекс управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР. Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Получила дальнейшее развитие математическая модель изменения деформации и поврежденности оболочки твэла, глубины выгорания ядерного топлива на основе решения системы уравнений теплопередачи и механического взаимодействия между оболочкой твэла и топливной таблеткой методом конечных элементов. Использование энергетического варианта теории ползучести для расчета поврежденности оболочки твэла, при нормальных условиях ее эксплуатации, позволило обеспечить независимость лимитирующего компонента критерия разрушения оболочки от условий эксплуатации твэла и обосновать снижение коэффициента запаса по группе прочностных критериев приемки твэла в 5 раз. Моделирование влияния изменения конструкционных параметров твэла, мощности ВВЭР, температурного режима теплоносителя, размещения и вертикального перемещения ОР СУЗ, перестановок ТВС на поврежденность оболочки твэла позволило разработать метод расчета поврежденности оболочки, учитывающий: ползучесть как основной процесс накопления поврежденно-

сти при нормальных условиях эксплуатации ВВЭР; последовательность совокупностей факторов, определяющих поврежденность оболочки; ограничения по всем нормативным критериям приемки твэла (на примере критериев прочностной группы), за исключением SC4.

2. Определена количественная мера значимости факторов, детерминирующих поврежденность оболочки твэла ВВЭР-1000 и найдена чувствительность величины удельной энергии рассеяния к отклонению детерминирующих факторов. Получено, что максимальная линейная мощность в твэле и температурный режим теплоносителя являются наиболее значимыми детерминирующими факторами, что позволило минимизировать количество варьируемых при моделировании изменения свойств твэла детерминирующих факторов. Значимыми факторами, детерминирующими поврежденность оболочки, являются: максимальная линейная мощность в твэле, температура теплоносителя на входе ВВЭР, наружный диаметр оболочки твэла, диаметр топливной таблетки, толщина оболочки, шаг решетки твэлов, скорость теплоносителя на входе ВВЭР, диаметр центрального отверстия таблетки, коэффициент теоретической плотности ядерного топлива, начальное давление гелия под оболочкой, давление теплоносителя на входе ВВЭР.

3. Учитывая размещение ОР в АКЗ ВВЭР-1000 и перестановки ТВС в АКЗ в ходе четырехлетнего топливного цикла определено, что аксиальные сегменты твэлов, расположенные между координатами $z = 1,8$ и $2,7$ м, считая от нижнего края самой нижней топливной таблетки твэла, характеризуются наибольшей поврежденностью оболочек и ограничивают их долговечность. Это позволило минимизировать количество варьируемых детерминирующих факторов и контролируемых параметров при моделировании изменения свойств твэла.

4. Получила дальнейшее развитие модель эффективности управления свойствами твэлов, принимающая во внимание показатели безопасности и экономичности эксплуатации твэлов, путем одновременного учета в качестве контролируемых параметров поврежденности оболочек твэлов в нормальных условиях эксплуатации и глубины выгорания топлива, либо поврежденности оболочек

чек и массы ядерного топлива в твэле, либо поврежденности оболочек и стабильности аксиального офсета. Максимум эффективности *Eff* управления свойствами твэлов определяется по критерию эффективности, физический смысл которого заключается в том, что наилучшая совокупность детерминирующих факторов определяется путем суммирования преимуществ, даваемых каждым из контролируемых параметров. Если контролируемый параметр выходит за пределы допустимого диапазона, то он вносит негативный вклад в *Eff*. Модель эффективности управления свойствами твэлов позволила предложить методы управления конструкционными параметрами твэла, температурным режимом теплоносителя, перестановками ТВС в АКЗ ВВЭР.

5. Разработан метод управления конструкционными параметрами твэла на основе учета поврежденности его оболочки, баланса между безопасностью и экономичностью эксплуатации твэла, что позволило предложить метод аксиального профилирования диаметра центрального отверстия топливной таблетки, характеризующийся низкой поврежденностью оболочек при высокой нагрузке ядерного топлива в АКЗ. Контролируемыми параметрами являются поврежденность оболочек и масса ядерного топлива в твэле, варьируемым детерминирующим фактором является диаметр центрального отверстия топливной таблетки. Для комбинированного цикла нагружения ВВЭР-1000 показано, что варьируя диаметр центрального отверстия таблетки в максимально нагруженных аксиальных сегментах твэла, при фиксированных значениях диаметра центрального отверстия таблетки в остальных аксиальных сегментах, возможно достичь максимума *Eff*.

6. На основе учета поврежденности оболочек твэлов и аксиальной стабильности нейтронного поля в АКЗ разработан метод управления температурным режимом теплоносителя, что позволило предложить программу изменения мощности ВВЭР-1000 с постоянной входной температурой теплоносителя, характеризующуюся минимальной поврежденностью оболочек при максимальной стабильности аксиального офсета. Контролируемыми параметрами являются поврежденность оболочек и максимальное расхождение графиков мгновенного

и равновесного аксиального офсета, варьируемым детерминирующим фактором является программа изменения входной температуры теплоносителя. Для режима суточного маневрирования мощностью ВВЭР-1000 показано, что рассчитав усредненную по всем ТВС поврежденность оболочек твэлов и максимальное расхождение графиков мгновенного и равновесного аксиального офсета, рассматривая при уменьшении мощности РУ от 100 до 80 % программы с постоянной входной температурой теплоносителя, постоянной средней температурой теплоносителя и с увеличением входной температуры теплоносителя на 1°C, максимум критерия эффективности и цель управления температурным режимом теплоносителя достигается при постоянной входной температуре теплоносителя.

7. На основе учета неопределенности детерминирующих факторов разработана вероятностная модель параметров эксплуатации твэла, что позволило учесть робастные условия его эксплуатации при минимальной размерности вектора случайных величин. Поскольку неопределенность в знании максимальной линейной мощности в твэле в 5 раз превышает неопределенность в знании температуры теплоносителя на входе ВВЭР, а чувствительность величины удельной энергии рассеяния к отклонению максимальной линейной мощности в твэле более чем в 3 раза превышает чувствительность к отклонению температуры теплоносителя на входе ВВЭР, обоснована возможность сокращения расчетных затрат путем учета неопределенности в знании только максимальной линейной мощности в твэле.

8. Получил дальнейшее развитие метод управления перестановками ТВС в АКЗ ВВЭР, учитывающий вероятность разгерметизации оболочек твэлов в условиях запроектной аварии и глубину выгорания ядерного топлива, за счет учета поврежденности оболочек твэлов в нормальных условиях их эксплуатации. Это позволило найти алгоритмы перестановок ТВС в АКЗ ВВЭР-1000, характеризующиеся минимумом максимальной и средней поврежденности оболочек при максимуме равномерности выгорания ядерного топлива среди ТВС алгоритма перестановок, снизить величину интервалов разброса значений по-

врежденности и глубины выгорания среди ТВС алгоритма перестановок. Рассматривая ТВС, используемые при каком-либо алгоритме их перестановок, контролируемые параметрами являются максимальное и среднее значения поврежденности, минимальное значение выгорания, а варьируемым детерминирующим фактором является алгоритм перестановок ТВС. Цель управления перестановками ТВС достигнута для алгоритма перестановок, характеризуемого максимальным значением поврежденности оболочек в 1,2 раз меньшим соответствующей величины, усредненной по двум практически использованным алгоритмам. По сравнению с практически использованными алгоритмами интервал разброса значений поврежденности и глубины выгорания меньше в 1,8 и 2,1 раз, соответственно. Следовательно, метод управления перестановками ТВС позволяет значительно сократить вероятность превышения величиной поврежденности оболочек твэлов некоторого установленного лимита, повысить равномерность распределения глубины выгорания топлива среди ТВС алгоритма перестановок.

9. На основе метода управления перестановками ТВС, учитывая робастные условия эксплуатации твэлов с интервалом неопределенности для максимальной линейной мощности в твэле, равным 10 %, используя 100 выборок метода Монте-Карло, получено, что результаты робастного анализа Eff в целом соответствуют результатам детерминистского анализа, однако более консервативны. Вследствие сильной нелинейной зависимости поврежденности оболочки от максимальной линейной мощности в твэле, результаты робастного анализа Eff могут не совпадать с результатами детерминистского анализа. Достижение цели управления перестановками ТВС, при учете робастных условий эксплуатации твэлов, определяется по достижению одновременно самого высокого значения для средней величины Eff и самого низкого значения для стандартного отклонения Eff , либо на основе компромисса между этими величинами.

10. Разработан метод управления свойствами твэлов при проектировании и эксплуатации ВВЭР на основе итерационного задания детерминирующих факторов, что позволило обеспечить: минимум максимальной и средней повре-

жденности оболочек; максимум загрузки ядерного топлива и глубины его выгорания в ТВС; максимум стабильности аксиального офсета в АКЗ ВВЭР; снижение примерно в 2 раза величины интервалов разброса значений поврежденности оболочек и глубины выгорания топлива, что дает возможность уменьшить вероятность разгерметизации оболочек и повысить равномерность выгорания топлива для алгоритма перестановок ТВС. Последовательный алгоритм управления свойствами твэлов позволяет снизить размерность векторов контролируемых параметров и варьируемых детерминирующих факторов, а также пространства случайных величин, описывающих свойства твэлов.

Заключение

Методы управления факторами, определяющими свойства твэлов ВВЭР, позволяют обеспечить минимум поврежденности оболочек, максимум загрузки топлива, уменьшить вероятность разгерметизации оболочек и повысить равномерность выгорания топлива за счет уменьшения интервалов разброса значений поврежденности и глубины выгорания, обеспечить максимум стабильности АО.

Этот подход не требует расчета в явном виде вероятности разгерметизации оболочек твэлов. Однако, зная величину разброса значений поврежденности оболочек твэлов и задав предельно допустимое значение поврежденности, нетрудно найти вероятность разгерметизации оболочек.

Методы управления свойствами твэлов разработаны на примере твэла, усредненного по ТВС ВВЭР-1000. Данный подход оправдан, т.к. позволяет найти закономерности управления свойствами твэлов. В рамках этого подхода наиболее важное значение имеет ЭВТП-критерий. Использование ЭВТП-критерия подразумевает учет ограничений по всем существующим нормативным критериям приемки твэла, за исключением SC4.

Расчеты поврежденности оболочек твэлов ВВЭР-1000 по ЭВТП-методу показали, что если не учитывать неравномерность распределения энерговыделения и скачков мощности по твэлам ТВС, то для нормальных условий эксплуатации прочностной критерий SC1 не играет существенной ограничивающей роли. Если же учесть неравномерность распределения по твэлам ТВС энерговыделения и скачков мощности, то при управлении свойствами твэлов следует ожидать повышения роли SC1, ввиду сильного влияния расстояния между ОР СУЗ и твэлом на величину скачка мощности в твэле.

Поэтому при дальнейшей детализации имитационной модели накопления поврежденности оболочек твэлов ВВЭР-1000, путем учета неравномерности распределения по твэлам ТВС статических и динамических характеристик энерговыделения, следует ожидать повышения значимости критерия SC1, что возможно учесть при управлении свойствами твэлов на основе ЭВТП-критерия.

Библиография

1. Пелых, С. Н. Теоретические и технологические основы безопасной эксплуатации твэлов легководного реактора: дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук по спец. 05.14.14 “Тепловые и ядерные энергоустановки” / С. Н. Пелых. – Одесса, 2013. – 243 с.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Нормативные требования к прочности и надежности элементов РУ ВВЭР и вопросы безопасности / В.П. Семишкин, С.Б.Рыжов, В.А. Мохов, В.А. Пимин // Сб. тезисов 6-й межд. научно-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. – Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2009. – С. 119.

6. 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.

7. 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.

8. Семишкин, В.П. Расчетно-экспериментальные методы обоснования поведения твэлов и ТВС ВВЭР в аварийных режимах с большой течью из первого

контур РУ: автореф. дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук: спец. 05.14.03 “Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации” / В.П. Семишкин. – М., 2007. – 48 с.

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

10. 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”. – К.: Institute for Nuclear Research, 2008. – P. 638–641.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. Бибилашвили, Ю.К. Приемочные критерии, используемые при лицензировании твэлов типа ВВЭР // Сб. докладов 7-й Рос. конф. по реакторному материаловедению. – Димитровград: НИИ Атомных реакторов, 2003.– 328 с.

18. Овчинников, Ф.Я. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов / Ф.Я. Овчинников, В.В. Семенов.– М.: Энергоатомиздат, 1988. – 359 с.

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

20. 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.

21. MacDonald, P.E. MATPRO-09, a handbook of materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel rod behavior. TREE NUREG-1005.– Idaho Falls: Idaho National Engineering Lab., 1976.– 402 p.

22. 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.

23. 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.

24. База данных по ЯППУ для анализа проектных аварий ЮУ АЭС, энергоблок № 1. – Южноукраинск: ЮУ АЭС, 1999. – 643 с.

25. Design of the core for nuclear power plants: safety guide № NS-G-1.12.– Vienna: IAEA, 2004.– 247 p.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. Пельх, С. Н. Метод управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора / С. Н. Пельх, М. В. Максимов, А. А. Назаренко // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2012. – Вып. 2 (39). – С. 113–123.

30. 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.

31. Иванов, В. А. Эксплуатация АЭС. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 384 с.

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

33. 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.

34. Баскаков, В. Е. Компромиссно-комбинированный метод регулирования мощности РУ с ВВЭР-1000 (В-320) в переменном режиме нагружения: дис. на соискание ученой степени кандидата техн. наук: спец. 05.14.14 “Тепловые и ядерные энергоустановки” / В. Е. Баскаков. – Одесса, 2010. – 173 с.

35. Пат. 2470391 Российской Федерации, МПК G 21 C 7/00. Способ управления ядерной энергетической установкой с реактором водяного типа при изменении мощности реактора или внешней нагрузки / Максимов М.В., Пельх

С.Н., Баскаков В.Е, Цисельская Т.А.; заявитель и патентообладатель Максимов М.В., Пелых С.Н., Баскаков В.Е, Цисельская Т.А. – № 2011121323/07; заявл. 25.05.11; опубл. 20.12.12, Бюл. № 35.

36. 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.

37. Пелых, С. Н. Комплексный критерий эффективности алгоритма маневрирования мощностью РУ с ВВЭР-1000 в переменном режиме / С.Н. Пелых, В.Е. Баскаков, Т.В. Цисельская // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2009. – Вып. 2. – С. 53–58.

38. 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.

39. 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.

40. 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)).

41. Немировский, Ю. В. Об оценке времени безопасной эксплуатации конструкций и сооружений // Тр. межд. конф. по конструкционному материаловедению. – Н.: СО РАН, 2001. – Т. 6. – С. 328 – 333.

42. 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.

43. Филимонов, П.Е. Испытания маневренности ВВЭР-1000 на 5-м блоке Запорожской АЭС / П.Е. Филимонов, С.П. Аверьянова, С.Г. Олейник // Атомная энергия. – 1998. – Т. 85, № 5. – С. 364–367.

44. MATLAB Version 7.10.0. – Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2010. – 512 с.

45. Соколов, Д.А. Повышение мощности ВВЭР-1000 / Д.А. Соколов, В.В. Ким, В.И. Кузнецов // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2007. – Вып. 2(28). – С. 60–64.



MoreBooks!
publishing



yes i want morebooks!

Покупайте Ваши книги быстро и без посредников он-лайн – в одном из самых быстрорастущих книжных он-лайн магазинов! окружающей среде благодаря технологии Печати-на-Заказ.

Покупайте Ваши книги на
www.more-books.ru

Buy your books fast and straightforward online - at one of world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at
www.get-morebooks.com



VDM Verlagsservicegesellschaft mbH

Heinrich-Böcking-Str. 6-8
D - 66121 Saarbrücken

Telefon: +49 681 3720 174
Telefax: +49 681 3720 1749

info@vdm-vsg.de
www.vdm-vsg.de

