

Министерство образования и науки Украины
Одесский национальный политехнический университет

На правах рукописи

ПЕЛЫХ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

УДК 621.039.548

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТВЭЛОВ
ЛЕГКОВОДНОГО РЕАКТОРА**

Специальность 05.14.14 — тепловые и ядерные энергоустановки

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант —
Максимов Максим Витальевич,
доктор техн. наук, профессор

Одесса–2013

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	7
ВВЕДЕНИЕ.....	8
РАЗДЕЛ 1. Предпосылки управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора.....	16
1.1. Экономическая необходимость повышения безопасности нормальной эксплуатации твэлов легководного реактора.....	16
1.2. Необходимость усовершенствования нормативных требований к долговечности оболочек твэлов РУ ВВЭР для повышения безопасности их эксплуатации.....	21
1.3. Принципы обоснования изменения свойств твэлов реактора типа ВВЭР.....	24
1.4. Необходимость нового подхода к обеспечению безопасности эксплуатации твэлов, основанного на управлении свойствами твэлов с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности их оболочек.....	25
1.5. Недостатки существующей системы обеспечения безопасности эксплуатации твэлов РУ с ВВЭР-1000 как следствие действующей практики проектирования твэлов.....	26
1.6. Постановка научной проблемы диссертационного исследования	37
1.7. Выводы по первому разделу.....	41
РАЗДЕЛ 2. ЭВТП-модель изменения свойств твэла	47
2.1. Структура математической модели изменения свойств твэла.....	47
2.2. Конструкционные параметры твэла и РУ.....	48
2.3. Моделирование изменения мощности РУ.....	48
2.4. Моделирование влияния изменения мощности РУ на	

поврежденность оболочки твэла.....	53
2.5. Моделирование влияния размещения ОР регулирующей группы СУЗ на поврежденность оболочки твэла.....	54
2.6. Принципы термомеханического анализа изменения свойств твэла.....	55
2.7. Математическая модель расчета распределения температуры, напряжений и деформаций в твэле.....	56
2.7.1. Модель определения энтальпии теплоносителя.....	57
2.7.2. Коэффициент теплоотдачи на поверхности оболочки.....	59
2.7.3. Зависимости для расчета температуры в твэле.....	60
2.7.4. Принципы анализа механического взаимодействия между топливом и оболочкой	71
2.7.5. Соотношение для скорости деформации ползучести оболочки.....	72
2.7.6. Соотношение для скорости коррозии оболочки твэла.....	75
2.7.7. Метод конечных элементов	75
2.7.8. Замыкающие соотношения математической модели расчета распределения температуры, напряжений и деформаций в твэле.....	81
2.8. Моделирование влияния перестановок ТВС на поврежденность оболочки твэла.....	101
2.9. Основной процесс накопления поврежденности оболочки твэла в нормальных условиях эксплуатации РУ.....	103
2.10. Соотношения для учета основного процесса накопления поврежденности оболочки твэла в нормальных условиях эксплуатации РУ.....	106
2.11. Алгоритм расчета поврежденности оболочки твэла по ЭВТП-модели изменения свойств твэла.....	108

2.12. Выводы по второму разделу.....	110
РАЗДЕЛ 3. ЭВТП-метод расчета поврежденности оболочки твэла.....	113
3.1. Положения ЭВТП-метода расчета поврежденности оболочки.....	113
3.2. Программное средство для расчетного анализа развития напряжений и деформаций в оболочке.....	116
3.3. Основные факторы, определяющие поврежденность оболочек твэлов.....	119
3.3.1. Влияние характеристик цикла нагружения на поврежденность оболочек твэлов	119
3.3.2. Влияние числа точек истории нагружения твэла на расчетную величину поврежденности оболочки.....	127
3.3.3. Влияние режимных характеристик РУ на величину удельной энергии рассеяния в оболочке твэла.....	127
3.4. Особенность изменения эквивалентной деформации ползучести в оболочке твэла перед началом стадии ускоренной ползучести.....	129
3.5. Необходимость совместного рассмотрения поврежденности оболочек твэлов и стабильности аксиального офсета при оптимизации алгоритма эксплуатации энергоблока в переменном режиме.....	131
3.6. Сравнение долговечности оболочек твэлов ТВС разных производителей.....	138
3.7. Чувствительность оценки поврежденности оболочки твэла к неопределенности в задании параметров	144
3.8. Уточненный анализ чувствительности оценки поврежденности оболочки твэла к неопределенности в задании параметров	154
3.9. Необходимость совместного учета показателей безопасности и экономичности при управлении свойствами твэлов	156
3.10. Определение максимально нагруженного аксиального сегмента оболочки твэла	166

3.10.1. Определение амплитуды скачка мощности аксиальных сегментов ТВЭЛА	166
3.10.2. Расчет аксиального распределения поврежденности оболочки.....	171
3.11. Влияние скорости коррозии оболочки на скорость накопления поврежденности	176
3.12. Достоверность расчета поврежденности оболочки ТВЭЛА по ЭВТП-методу.....	180
3.13. Сопоставление результатов оценки ресурса оболочки по критерию SC4 и ЭВТП-критерию.....	182
3.14. Выводы по третьему разделу.....	184
РАЗДЕЛ 4. Методы управления конструкционными параметрами ТВЭЛА и температурным режимом теплоносителя	189
4.1. Принципы критериальной модели эффективности управления свойствами ТВЭЛОВ.....	189
4.2. Метод управления конструкционными параметрами ТВЭЛА.....	191
4.3. Метод аксиального профилирования диаметра центрального отверстия топливной таблетки.....	192
4.4. Метод управления температурным режимом теплоносителя ВВЭР-1000.....	194
4.4.1. Программы суточного маневра мощностью РУ.....	195
4.4.2. Критерий эффективности температурного режима теплоносителя.....	196
4.4.3. Формализация метода управления температурным режимом теплоносителя ВВЭР-1000	207
4.5. Выводы по четвертому разделу.....	210
РАЗДЕЛ 5. Методы управления перестановками ТВС в АКЗ и свойствами ТВЭЛА.....	212

5.1. Метод управления перестановками ТВС.....	212
5.2. Эффективность управления перестановками ТВС в детерминистском случае.....	213
5.3. Вероятностная модель параметров эксплуатации твэла.....	221
5.4. Обоснование снижения количества учитываемых детерминирующих факторов.....	222
5.5. Робастная критериальная модель эффективности управления перестановками ТВС.....	222
5.6. Эффективность управления перестановками ТВС в простейшем случае робастного управления.....	224
5.7. Эффективность управления перестановками ТВС в робастном случае при учете всех ячеек сектора симметрии АКЗ.....	232
5.8. Метод управления свойствами твэлов.....	235
5.9. Выводы по пятому разделу.....	237
ВЫВОДЫ.....	238
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	244
ПРИЛОЖЕНИЕ. Документы о внедрении.....	258

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АО – аксиальный офсет;
- АКЗ – активная зона;
- ПД – продукты деления;
- ГЦН – главный циркуляционный насос;
- ДР – дистанционирующая решетка;
- КИУМ – коэффициент использования установленной мощности;
- КО – компенсационный объем в твэле;
- КРН – коррозионное растрескивание под напряжением;
- МВТО – механическое взаимодействие между топливом и оболочкой;
- МКР – метод конечных разностей;
- МКЭ – метод конечных элементов;
- ОР – органы регулирования;
- ОЭС – объединенная энергетическая система;
- ПС – программное средство;
- РУ – реакторная установка;
- СБР – система борного регулирования;
- СУЗ – система управления и защиты;
- ТВС – тепловыделяющая сборка;
- ВWR – кипящий ядерный реактор;
- LOCA – тяжелая авария с потерей теплоносителя;
- LWR – легководный ядерный реактор;
- PWR – реактор с водой под давлением.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Согласно прогнозу НАЭК “Энергоатом” по производству и потреблению электроэнергии в Украине в первой половине столетия, доля производства электроэнергии на АЭС составит около 50 % от общей ее генерации. Основой атомной энергетики останутся реакторные установки (РУ) с легководными реакторами (ВВЭР) [1], будет необходимо участие АЭС в регулировании энергосистемы.

В проектах РУ IV поколения повышены энергонапряженность активной зоны (АКЗ), длительность кампании и глубина выгорания ядерного топлива. Главным фактором, ограничивающим повышение этих показателей, 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 безопасной 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.

Связь с научными программами. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с заданиями госбюджетных НИР № 645-47 "Изучение цикличности нагружения ВВЭР-1000 с целью определения эффективности управления ресурсом ядерного топлива при поддержании баланса мощности в энергосистеме" (№ ГР 0109U002620), № 649-135 "Изучение возможности нагрузки энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 до 110 % от номинала с целью определения момента граничного состояния защитных барьеров безопасности" (№ ГР 0109U008453), № 680-47 "Физико-технические методы управления свойствами ТВС для обеспечения баланса безопасности и эффективности" (№ ГР 0111U010454).

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка теоретических и технологических основ эксплуатации твэлов легководного реактора с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности их оболочек, для повышения экономической эффективности эксплуатации твэлов путем управления их свойствами, при соблюдении требований безопасности.

Задачи исследования:

- анализ моделей и методов расчета изменения свойств твэла и условий разрушения его оболочки;
- разработка математической 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 конструкционными 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 ТВС и свойствами твэлов, учитывающих поврежденность оболочек твэлов, баланс безопасности и экономичности эксплуатации твэлов.

Объект исследования: твэлы легководного реактора в нормальных условиях эксплуатации.

Предмет исследования: модели и методы обоснования безопасной эксплуатации твэлов легководного реактора.

Методы исследования: 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:

– 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, 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 сегмент (АС), 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 загрузке ядерного топлива;

– впервые разработан метод управления температурным режимом теплоносителя 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 офсета;

– впервые разработана вероятностная модель параметров эксплуатации твэла на основе учета неопределенности параметров, определяющих поврежденность оболочки твэла, что позволило учесть робастные условия ее эксплуатации 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.

Практическая ценность полученных результатов. Основы безопасной эксплуатации твэлов легководного реактора позволяют: учитывать накопленную в нормальных условиях эксплуатации РУ поврежденность оболочек твэлов; снизить в 5 раз консерватизм оценки условий разрушения оболочки твэла по группе прочностных критериев; 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 оболо-

чек, баланса безопасности и экономичности эксплуатации. На основе результатов работы получен 1 патент Украины и 1 патент России на изобретение. Результаты внедрены в методиках НАЭК “Энергоатом”, в учебный процесс ОНПУ в дисциплинах “Физика ядерно-физических процессов”, “Надежность и ядерная безопасность АЭС”, “Нестационарность процессов и регулирование ЯЭР”.

Личный вклад соискателя. Работы [28; 49; 54; 91] выполнены единолично. В совместных публикациях соискателю принадлежит: [9; 18; 26; 45; 46; 47; 51; 55] – математическая модель изменения деформации и поврежденности оболочки твэла, глубины выгорания ядерного топлива; метод расчета поврежденности оболочки; [8; 16; 25; 27; 48; 52; 53; 64; 65; 66; 67; 87; 88; 89] – определение меры влияния параметров на поврежденность оболочки; локализация сегмента, ограничивающего ее долговечность; минимизация варьируемых и контролируемых параметров; [13; 15; 62; 63; 94] – метод управления температурным режимом теплоносителя; [40; 91; 92] – метод управления перестановками ТВС в АКЗ; вероятностная модель параметров эксплуатации твэла; [40; 41; 90, 93] – модель эффективности управления свойствами твэлов; методы управления конструкционными параметрами твэла, свойствами твэлов при проектировании и эксплуатации РУ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на конференциях и семинарах: Ежегодные январские научные конференции ИЯИ НАН Украины, 2008, 2011, 2013, Киев; The 2nd, 3rd, 4th International Conferences “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy”, 2008, 2010, 2012, Kyiv, Ukraine; 6-я, 7-я МНТК “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”, ОКБ “Гидропресс”, 2009, 2011, Подольск, Россия; Всероссийская НТК “Энергетика XXI века. Техника, экономика и подготовка кадров”, Уральский федеральный университет, 2011, Екатеринбург, Россия; Семинар 17.01.2012 г. Theory of Fuel Cladding Life Control Methods в отделе ядерной безопасности и технологий корпорации SERCO, Уинфрит, Великобритания; Открытая лекция

25.01.2012 г. LWR Fuel Optimization на инженерном факультете Кембриджского университета, Кембридж, Великобритания; The XX-th International Conference on Physics of Radiation Phenomena and Radiation Material Science, Kharkov Institute of Physics and Technology, 2012, Alushta, Ukraine; Ежегодная генеральная ассамблея Европейской ассоциации ядерного образования, 2012, Сакле, Франция; 2013, Вена, Австрия.

Публикации. По материалам диссертации сделано 36 публикаций, из них 24 статей — в научных изданиях, рекомендованных ВАК Украины (11 статей SCOPUS), 2 монографии (в соавторстве), 1 патент Украины и 1 патент России.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, 50 рисунков, 48 таблиц, выводов, приложения, списка источников из 108 наименований. Объем основного текста диссертации — 243 с.

РАЗДЕЛ 1

ПРЕДПОСЫЛКИ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ТВЭЛОВ В НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕГКОВОДНОГО РЕАКТОРА

1.1. Экономическая необходимость повышения безопасности нормальной эксплуатации твэлов легководного реактора

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 [1].

Из этого вывода следует, что

- 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;
- в первой половине столетия основой атомной энергетики Украины останутся реакторные установки (РУ) с водоводяными энергетическими реакторами (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 экономической эффективности. Предъявляются все более высокие требования к экономической эффективности нормальной эксплуатации легководного реактора, для удовлетворения которых необходимо повышать параметры термодинамического цикла РУ, среднюю достигаемую глу-

бину выгорания топлива, продолжительность топливной кампании. Поскольку в США эксплуатируется наибольшее число легководных реакторов (LWR), целесообразно привести статистику по парку легководных реакторов США (с водой под давлением – типа PWR и кипящих – типа BWR). По данным института EPRI, средняя глубина выгорания топлива в легководных реакторах США на протяжении 15 лет (1990-2005 гг) имеет устойчивую тенденцию роста – рис. 1 [2].

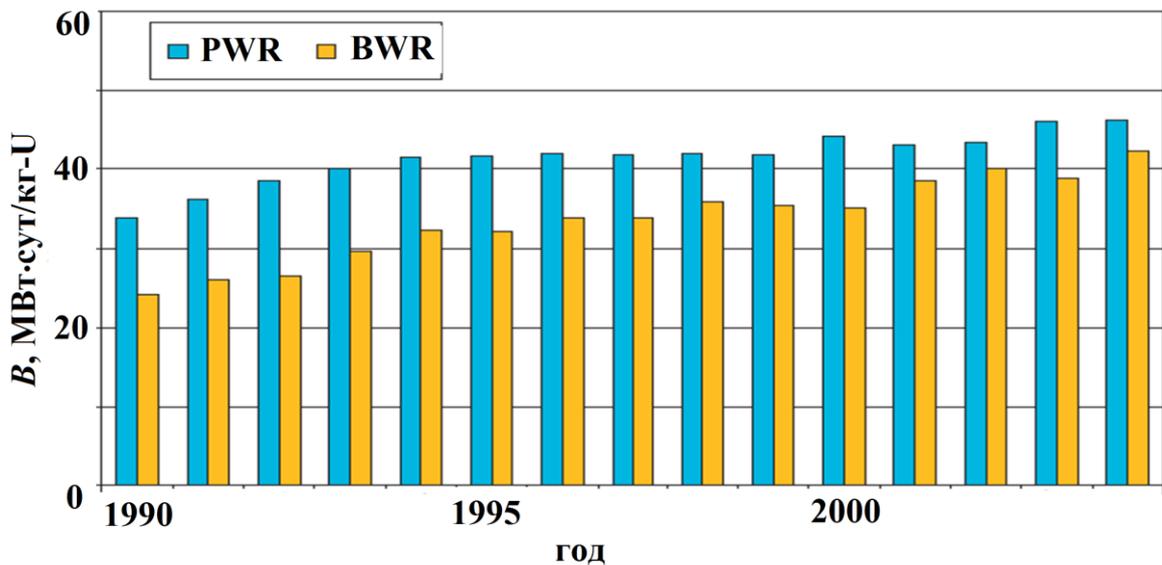


Рис. 1. Средняя глубина выгорания топлива легководных реакторов США по данным EPRI [2]

Средняя длина топливного цикла легководных реакторов также имеет устойчивую тенденцию роста – рис. 2 [2].

Однако, удовлетворение требований повышения экономической эффективности 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 ее экономической эффективности.

Согласно оценкам института EPRI (США), экономические потери от разгерметизации оболочки даже одного ТВЭЛ легководного реактора (типа

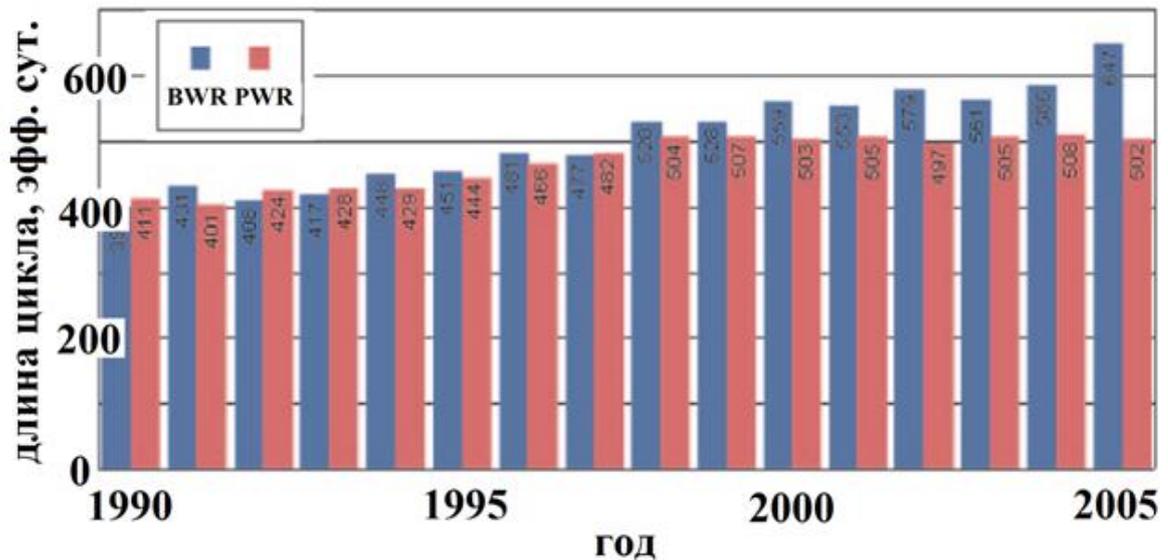


Рис. 2. Средняя длина топливного цикла легководных реакторов США по данным EPRI [1]

BWR) с учетом потерь из-за простоя РУ, затрат на замену ТВЭЛ и замещение энергетической мощности РУ, в США достигают 1 млн. долларов [2].

Данные института EPRI за период 1980-2005 гг 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 гг, 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 гг) – рис. 3 [2].

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: фреттинг-износ; мусор в теплоносителе; неизвестные причины (20 %) – рис. 4 [2].

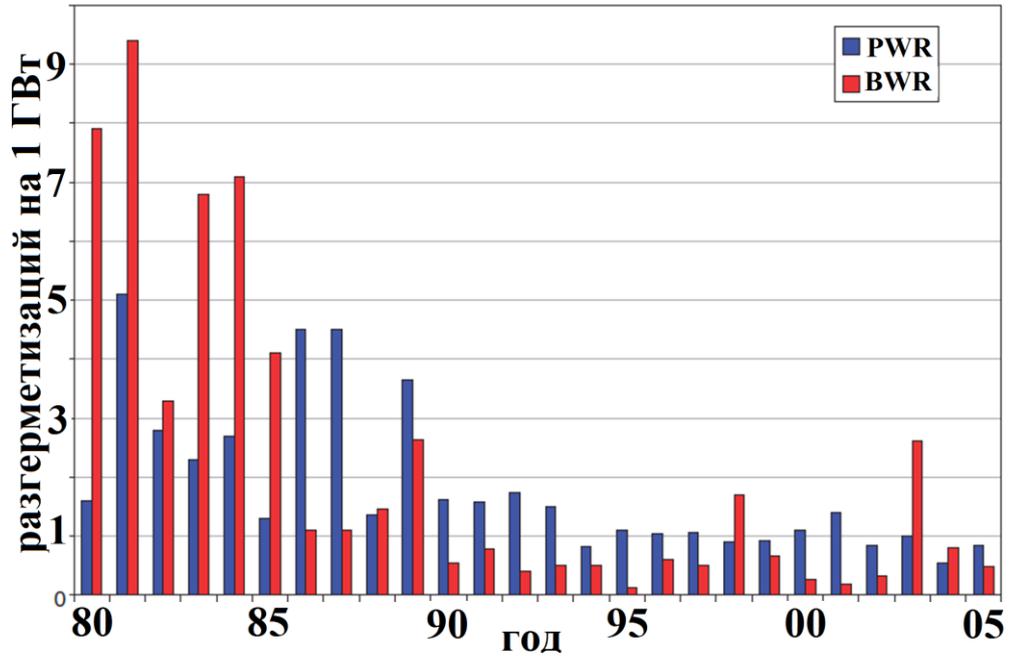


Рис. 3. Количество случаев разгерметизации оболочек твэлов в год на 1 ГВт установленной мощности легководных реакторов США по данным EPRI

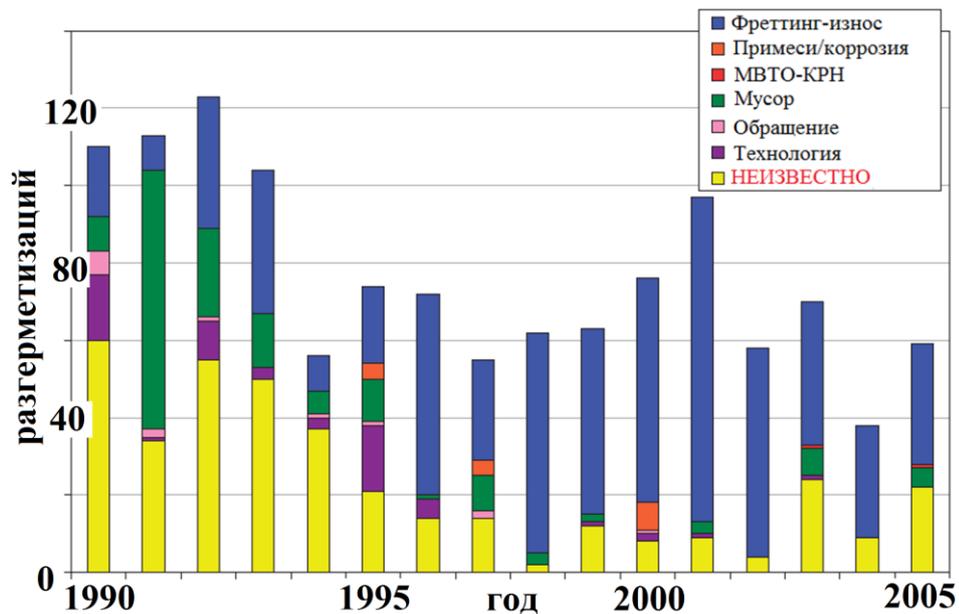


Рис. 4. Причины разгерметизации оболочек твэлов в реакторах США типа PWR по данным EPRI

Для PWR такие факторы, как влияние МВТО/КРН на ранних стадиях облучения топлива, влияние брака при изготовлении и обращении с твэлами,

влияние примесей в материале оболочки /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: примесная коррозия; МВТО/КРН; мусор; неизвестные причины (18 %) – рис. 5 [2].

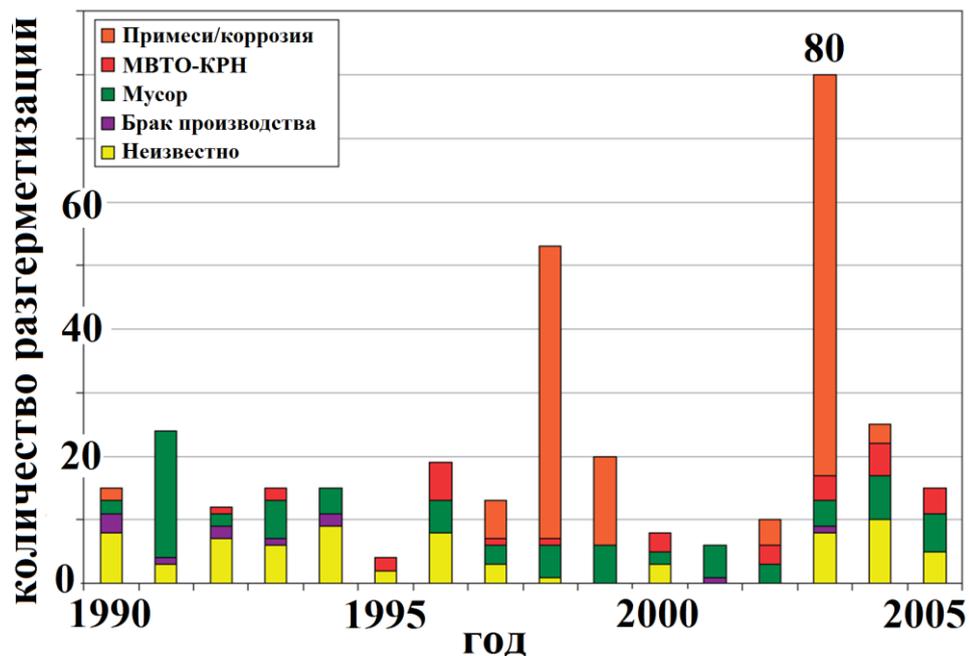


Рис. 5. Причины разгерметизации оболочек твэлов в реакторах США типа BWR по данным EPRI [2]

Влияние примесей в материале оболочки /коррозии при больших глубинах выгораний для BWR сильно зависит от применяемого водно-химического режима теплоносителя и определяется им [2].

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

В проектах РУ IV поколения производства ОКБ “Гидропресс”, планируемых к поставкам на Украину, повышены энергонапряженность активной зоны (АКЗ), длительность кампании и глубина выгорания ядерного топлива. В докладе [3] 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”.

Можно сделать вывод, что главным фактором, ограничивающим повышение экономических показателей эффективности эксплуатации АЭС с легководными реакторами, является долговечность оболочек твэлов.

1.2. Необходимость усовершенствования нормативных требований к долговечности оболочек твэлов РУ ВВЭР для повышения безопасности их эксплуатации

При эксплуатации твэлов существует ненулевая вероятность образования и роста дефектов в соответствии с различными механизмами деградации материалов, снижение в результате этого условного уровня безопасности не должно выходить за рамки проектных показателей надежности [4]. 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 [4].

Поскольку требования нормативных документов к обоснованию надежности эксплуатации твэлов в течение проектного срока службы предполагают установление показателей надежности, связанных с вероятностью безот-

казной работы, для твэлов основным показателем надежности является не разрушение 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) [5] и “Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций НП-082-07 ” (ПБЯ) [6]. Установлены эксплуатационный предел повреждения твэлов и предел безопасной эксплуатации повреждения твэлов [6].

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 не превышению следующих предельных параметров [6]:

- 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 и неизотермических 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 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 [7] поставлена и решена проблема обоснования поведения твэлов и ТВС ВВЭР в аварийных режимах с большой течью из первого контура РУ. Однако, ввиду высокой величины экономических потерь при разгерметизации оболочки даже одного твэла, ввиду необходимости разработки РУ нового поколения, характерной особенностью которых является высокая экономичность при их большей мощности и более высоком уровне безопасно-

сти, для повышения безопасности нормальной эксплуатации твэлов РУ ВВЭР представляется необходимым усовершенствование нормативных требований к долговечности оболочек твэлов. В частности, необходимо регламентировать контроль средней и максимальной поврежденности оболочек твэлов для каждой ТВС в зависимости от совокупности условий ее нормальной эксплуатации.

1.3. Принципы обоснования изменения свойств твэлов реактора типа ВВЭР

В работе [7] 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:

- необходимость детального описания изменения свойств твэлов;
- совместное рассмотрение термомеханических и теплогидравлических задач для снижения консервативности расчётов при обосновании безопасности и неопределённости при построении расчётных схем;
- 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, термомеханических и теплогидравлических процессов;
- как следствие, необходимость при обосновании безопасности РУ изучать деформационное поведение твэла в связи с теплофизическими и физико-химическими процессами в твэле и межтвэльном пространстве [7];
- недопустимость слишком высокой консервативности результатов, что ведёт к ухудшению экономических показателей РУ и снижению её конкурен-

тоспособности;

- необходимость ограничения количества твэлов в АЗ, герметичность которых может быть нарушена;
- учет неопределённости в численном анализе;
- управление изменением свойств твэлов.

1.4. Необходимость нового подхода к обеспечению безопасности эксплуатации твэлов, основанного на управлении свойствами твэлов с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности их оболочек

Из опыта эксплуатации оболочек твэлов легководных реакторов [2] следует, что при исключении из рассмотрения таких причин разгерметизации оболочек как примесная коррозия, мусор, фреттинг-износ, в нормальных условиях эксплуатации оболочки твэла характерны следующие основные механизмы ее разгерметизации:

- механическое взаимодействие между топливом и оболочкой (МВТО), особенно при низких глубинах выгорания ядерного топлива, и коррозионное растрескивание под напряжением (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 [8].

В частности:

- 1) Влияние МВТО на долговечность оболочки при низких глубинах выгорания ядерного топлива возможно исключить введением нормативных ограничений по величине максимальной линейной мощности в твэле.
- 2) Недопущение механического повреждения оболочки вследствие КРН

обеспечивается путем контроля допустимого значения линейной мощности в твэле и величины ее скачков.

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 нагрузжений [9].

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.

Таким образом, 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. Недостатки существующей системы обеспечения безопасности эксплуатации твэлов РУ с ВВЭР-1000 как следствие действующей прак-

тики проектирования ТВЭЛОВ

Постановка вопроса о недостатках действующей практики проектирования ТВЭЛОВ РУ с ВВЭР-1000 актуальна исходя из следующих положений:

1) В работе [10] 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;

– повреждением под действием многократных циклических и длительных статических нагрузений.

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 нагрузений [10].

2) Прочность элементов АЭС играет важнейшую роль в обеспечении безопасности, поэтому за последние 30 лет наблюдается тенденция к увеличению полноты и глубины обоснования 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 [4].

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, при оценке срока службы оболочки ТВЭЛА в режиме переменных нагрузок представляется некорректным использование экспери-

ментальных 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 экспериментальное 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 [8].

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 непревышения некоторой предельной величины, принятой для окружных напряжений [10].

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 [11].

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 в виде:

$$K_{\text{норм}} = \frac{R^{\text{lim}}}{R}, \quad (1.1)$$

где R^{lim} – предельное значение параметра;

R – расчетное значение параметра.

В табл. 1.1 приведены следующие проектные критерии приемки твэлов прочностной группы и соответствующие им нормативные коэффициенты запаса [12]:

– критерий SC1, ограничивает величину окружных напряжений σ_{θ} в оболочке твэла, что не допускает КРН в атмосфере агрессивных продуктов деления;

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

– критерий SC3, ограничивает величину избыточного наружного давления теплоносителя P , что не допускает потерю окружной устойчивости материала оболочки;

– критерий SC4, ограничивает величину параметра поврежденности материала оболочки ω вследствие совместного действия процессов усталости и ползучести;

– критерий SC5, ограничивает величину окружной пластической деформации ε_{θ} оболочки в кратковременных режимах термомеханического нагружения, когда высокие напряжения появляются, например, при контакте топливного сердечника и оболочки.

Таблица 1.1

Группа прочностных критериев приемки твэлов

Критерий	Физический смысл	Запись	$K_{\text{норм}}$
SC1	во всех проектных режимах исключается зарождение дефекта в гладкой оболочке и страгивание исходного производственного дефекта	$\sigma_{\theta} < \sigma_{\theta}^{\text{lim}}$, где $\sigma_{\theta}^{\text{lim}} = 250 \text{ МПа}$	1,2
SC2	исключается потеря устойчивости материала оболочки по механизму “пластического шарнира”	$\sigma_e^{\text{max}} < \sigma_0(T, \phi)$	–
SC3	исключается потеря окружной устойчивости материала оболочки под действием избыточного наружного давления теплоносителя	$P < P^{\text{lim}}$	1,5
SC4	исключается разрушение оболочки из-за ее комбинированного повреждения вследствие длительных статических нагрузок и циклической усталости материала	$\omega < 1$, где $\omega(\tau) = \sum_i \frac{NC_i}{NC_i^{\text{lim}}} + \int_0^{\tau} \frac{dt}{t^{\text{lim}}}$, NC_i^{lim} – предельное число циклов i -го типа; t^{lim} – время до разрушения оболочки при данных параметрах ее стационарного нагружения	10
SC5	в переходных режимах исключается развитие пластической деформации оболочки	$\varepsilon_{\theta} < \varepsilon_{\theta}^{\text{lim}}$, где $\varepsilon_{\theta}^{\text{lim}} = 0,5 \%$	1,2

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 $K_{\text{норм}}=10$ для SC4 почти на порядок

превышает коэффициенты запаса для остальных критериев прочностной группы.

В табл. 1.2 приведены проектные критерии приемки твэлов деформационной группы и соответствующие им нормативные коэффициенты запаса [12]:

- критерий DC1, ограничивает величину изменения диаметра ΔD оболочки твэла, что не допускает фреттинг-износ оболочек;
- критерий DC2, ограничивает удлинение ΔL твэла с учетом зазора между верхними заглушками твэлов и верхней головкой ТВС.

Таблица 1.2

Группа деформационных критериев приемки твэлов

Критерий	Физический смысл	Запись	$K_{\text{норм}}$
DC1	обеспечение надежного теплосъема и крепления твэла в дистанционной решетке, а также исключение фреттинг-износа оболочек	$\Delta D < \Delta D^{\text{lim}}$, где $\Delta D^{\text{lim}} = 0,05\text{мм}$ (ТВС-А)	1,2
DC2	ограничивается удлинение твэла	$\Delta L < \Delta L^{\text{lim}}$, где $\Delta L^{\text{lim}} = 61\text{мм}$ (ТВС-А)	1,25

В табл. 1.3 приведены проектные критерии приемки твэлов теплофизической группы и соответствующие им нормативные коэффициенты запаса [12]:

- критерий ТС1, ограничивает температуру топлива $T_{\text{топ}}$ (К) для недопущения достижения температуры плавления топлива $T_{\text{плав}}(B_U)$, где B_U – глубина выгорания ядерного топлива, МВт·сут/кг;
- критерий ТС2, ограничивает предельное значение давления газов $p_{\text{г}}$ под оболочкой твэла для недопущения превышения давления теплоносителя $p_{\text{тепл}}$;
- критерий ТС3, ограничивает предельную линейную мощность твэла в зависимости от глубины выгорания.

Таблица 1.3

Группа теплофизических критериев приемки твэлов

Критерий	Физический смысл	Запись	$K_{\text{норм}}$
ТС1	Ограничивается температура топлива для недопущения его плавления	$T_{\text{топ}} < T_{\text{плав}}$, где $T_{\text{плав}}(B_U) = 3110 - 3,577 \cdot B_U$	1,1
ТС2	Ограничивается предельное значение давления газов под оболочкой твэла	$p_{\text{г}} < p_{\text{тепл}}$	1,1
ТС3	Ограничивается предельная линейная мощность твэла	$q_l < q_l^{\text{lim}}$	1

В табл. 1.4 приведены проектные критерии приемки твэлов коррозионной группы и соответствующие им нормативные коэффициенты запаса [12]:

- критерий КС1, ограничивает окисление оболочки для недопущения превышения допустимого значения толщины окисной пленки h^{lim} ;
- критерий КС2, ограничивает гидрирование оболочки для недопущения превышения допустимого значения содержания водорода в оболочке H^{lim} .

Таблица 1.4

Группа коррозионных критериев приемки твэлов

Критерий	Физический смысл	Запись	$K_{\text{норм}}$
КС1	Ограничивается окисление оболочки	$h < h^{\text{lim}}$, где $h^{\text{lim}} = 60$ мкм	1,5
КС2	Ограничивается гидрирование оболочки	$H < H^{\text{lim}}$, где $H^{\text{lim}} = 0,04$ %	1

Из таблиц 1.1–1.4 видно, что коэффициент запаса для критериев деформационной, теплофизической и коррозионной групп также почти на порядок меньше коэффициента запаса для прочностного критерия SC4, описывающе-

го 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 нагрузений;

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 нагрузений, определяется через относительную длительность эксплуатации оболочки, когда компоненты поврежденности в результате переменной и стационарной эксплуатации рассматриваются отдельно, на основе принципа аддитивности

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

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

NC_i и NC_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 (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 [10].

Подход к оценке поврежденности оболочки твэла на основе критерия SC4 имеет следующие недостатки [13]:

1) Несоответствие между экспериментальными условиями, при которых получены ограничивающие члены NC_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; 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 твэла вследствие дей-

ствия 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 NC_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 NC_i^{lim} и t^{lim} для любой новой совокупности параметров эксплуатации твэла;

6) Значения NC_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 $K_{\text{норм}} = 10$, на порядок превышающий коэффициента запаса для других прочностных критериев, регламентирующих максимальные значения в оболочке для тангенциального (SC1, $K_{\text{норм}} = 1,2$) и эквивалентного (SC2, $K_{\text{норм}} = 1$) напряжений, тангенциальной пластической деформации (SC5, $K_{\text{норм}} = 1$), а также максимальное давление теплоносителя (SC3, $K_{\text{норм}} = 1,5$).

Тем самым на практике использование SC4 при управлении свойствами твэлов путем расчета в режиме реального времени поврежденности их оболочек, накопленной в нормальных условиях эксплуатации твэлов, невозможно.

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 выполнения многочисленных установленных критериев безопасности с использованием соответствующих расчетных кодов детерминистическими методами, где для обеспечения безопасной эксплуатации используются самые консервативные оценки. Для этого определяются такие возможные значения параметров, которые отвечают этим консервативным оценкам [12].

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 ее экономическую эффективность; в-третьих, делает управление ресур-

сом оболочек твэлов в условиях эксплуатации АЭС принципиально невозможным ввиду отсутствия учета влияния комплекса реальных условий эксплуатации оболочки на ее поврежденность.

Хотя для обхода этих недостатков предпринимаются попытки моделирования поведения твэлов с помощью применения вероятностного метода при различных допустимых значениях исходных параметров, путем рассмотрения на основе вероятностного подхода выполнения критериев приемки [12], 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 вероятностей реализации этих значений, и вероятности выполнения какого-то критерия безопасности.

Проведение же самих расчетных обоснований предлагается проводить на основе детерминистического подхода и использования предельных значений критериев приемки, составленных с максимальной степенью консервативности [12, 72].

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

1.6. Постановка научной проблемы диссертационного исследования

Решить проблему управления свойствами твэлов легководного реактора с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности их оболочек при использовании существующего подхода к обоснованию безопасности твэлов, подразумевающего высокую неопределенность расчета поврежденности оболочки твэла по прочностному критерию SC4 невозможно, поскольку

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

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

В монографии [14], изданной в 1988 г. было отмечено: “Герметичность тепловыделяющих 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 реакторах с ВВЭР-1000 НАЭК “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 РУ с легководным реактором препятствует эволюционному развитию РУ в направлении повышения энергонапряженности АКЗ, длительности кампании и глубины выгорания топлива.

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

Разработка теоретических и технологических основ обеспечения безопасной эксплуатации твэлов легководного реактора путем управления свойствами твэлов, с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности их оболочек, должна позволить 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 поврежденно-

сти оболочек твэла из-за высокой неопределенности ее оценки по критерию SC4, вытекающей из неопределенности в учете основного физического процесса накопления поврежденности оболочки при нормальных условиях эксплуатации, а также неучета совокупности параметров эксплуатации твэла.

Для разработки теоретических и технологических основ эксплуатации твэлов легководного реактора с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности их оболочек, для повышения безопасности эксплуатации твэлов путем управления их свойствами, при соблюдении требований экономической эффективности необходимо разработать математическую модель изменения свойств твэла, учитывающую основной процесс накопления поврежденности его оболочки и параметры, определяющие поврежденность в нормальных условиях эксплуатации.

На основе математической 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 легководного реактора, он должен быть основан на использовании математической модели изменения свойств твэла, основными чертами которой являются [7]:

- учет влияния последовательности всего комплекса условий эксплуатации твэла на поврежденность его оболочки;
- учет основного физического механизма накопления поврежденности в материале оболочки при частотах переменного нагружения $\ll 1$ Гц, характерных для реальных режимов эксплуатации легководного реактора;
- 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 конструкционных 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 [15];
- учет влияния неопределенности в знании комплекса условий эксплуатации оболочки на оценку долговечности оболочки [16].

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 стадиях проектирования, так и на стадиях эксплуатации РУ с легководным реактором.

1.7. Выводы по первому разделу

На основе выполненного анализа предпосылок управления свойствами оболочек твэлов в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора можно сделать следующие выводы:

1. Существует запрос практики, состоящий в необходимости повышения безопасности и надежности нормальной эксплуатации РУ с легководным реактором при одновременном повышении ее экономической эффективности. Главным фактором, ограничивающим повышение экономических показателей эффективности эксплуатации АЭС с легководными реакторами, является целостность оболочек твэлов [73–80].

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 легководных реакторов, является изменение термомеханического состояния твэлов, приводящее к накоплению поврежденности оболочек, вызванной комбинацией многократных циклических и долговременных стационарных нагружений.

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

4. Хотя в ОПБ и ПБЯ есть нормативное ограничение на уровне 0,1 % количества твэлов в АКЗ ВВЭР-1000, имеющих дефект типа газовой неплотности, 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 разрушенные 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 $\nu \ll 1$ 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 частоте переменного нагружения $\nu \ll 1$ 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 $K_{\text{норм}} = 10$, на порядок превышающий коэффициента 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 делает невозможной реализацию алгоритма управления ресурсом твэлов на АЭС с реакторами типа ВВЭР ввиду невозможности определять условия разрушения оболочки твэла в зависимости от комплекса реальных условий ее эксплуатации.

8. Необходимо разработать новый подход к обеспечению безопасности 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 безопасной эксплуатации твэлов легководных реакторов на основе управления свойствами твэлов, с учетом накоп-

ленной 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 математическую модель (матмодель) изменения свойств твэла в нормальных условиях эксплуатации РУ, которая позволяла бы учитывать реальные условия эксплуатации оболочки, а также основной физической механизм накопления поврежденности материала оболочки при частотах нагружения, характерных для переменного режима эксплуатации реактора ($\ll 1$ Гц).

10. Основными чертами матмодели изменения свойств твэла в нормальных условиях эксплуатации РУ должны стать детальное описание изменения свойств твэлов 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 выполненного анализа научно-технических предпосылок управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора можно сделать вывод, что проблема разработки теоретических и технологических основ безопасной эксплуатации твэлов легководных реакторов с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности их оболочек имеет комплексный характер и требует решения ряда задач.

Первой задачей является разработка математической модели изменения свойств ТВЭЛ легководного реактора, 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.

РАЗДЕЛ 2

ЭВТП-МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ТВЭЛА

2.1. Структура математической 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 математическую модель изменения свойств твэла, учитывающую основной процесс накопления поврежденности его оболочки и параметры, определяющие поврежденность в нормальных условиях эксплуатации (рис. 2.1).

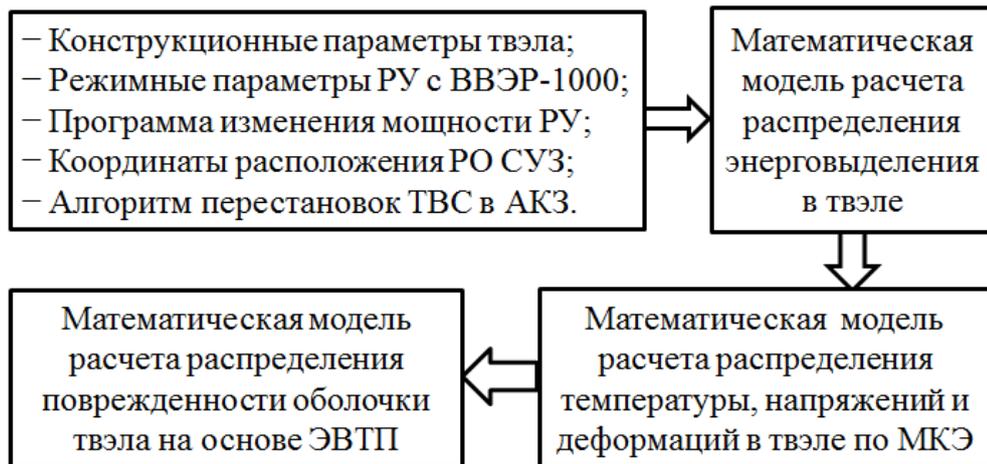


Рис. 2.1. Структура математической модели изменения свойств твэла

В математической модели изменения свойств твэла необходимо:

- учесть конструкционные параметры твэла и РУ для конкретного легководного реактора;
- смоделировать влияние изменения мощности РУ на поврежденность оболочки твэла;
- использовать адекватный метод решения системы уравнений теплопередачи и механического взаимодействия между оболочкой твэла и топливной

таблеткой;

- учесть изменения деформации и поврежденности оболочки твэла;
- учесть изменения глубины выгорания ядерного топлива;
- использовать теорию, позволяющую учесть основной процесс накопления поврежденности оболочки твэла;
- смоделировать влияние изменения мощности РУ на поврежденность оболочки твэла;
- смоделировать влияние размещения и вертикального перемещения ОР СУЗ на поврежденность оболочки твэла;
- смоделировать влияние перестановок ТВС на поврежденность оболочки твэла.

2.2. Конструкционные параметры твэла и РУ

Рассматривалась РУ с реактором ВВЭР-1000 проекта В-320. Для сравнительного анализа выбраны УТВС (серийная ТВС реактора ВВЭР-1000 проекта В-320), ТВС-А производства ОКБМ им. И.И. Африкантова и ТВС-В корпорации "Westinghouse" [17].

Различающиеся и одинаковые конструктивные характеристики твэлов указанных типов ТВС, задаваемые в качестве исходных данных при сравнительном анализе долговечности оболочки твэла различных топливных загрузок РУ ВВЭР-1000, приведены в табл. 2.1 и 2.2, соответственно.

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

2.3. Моделирование изменения мощности РУ

Эксплуатация твэла характеризуется длительным воздействием высоких

Таблица 2.1

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

Параметр	УТВС	ТВС-А	ТВС-В
Наружный диаметр оболочки, см	0,910	0,910	0,914
Внутренний диаметр оболочки, см	0,773	0,773	0,800
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	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$
Есть ли впадины у таблетки	Нет	Нет	Впадина на каждой стороне таблетки
Диаметр впадины, см	—	—	0,62
Глубина впадины, см	—	—	0,02
Диаметр эквивалентного проточного канала твэла, см	1,06	1,06	1,05
Общий вес столба топлива в твэле, кг	1,385	1,487	1,554

уровней температурно-силового нагружения, обуславливающих развитие неконтролируемых процессов ползучести конструкционного материала оболочки твэла, которые в определенный момент времени приводят к ее разрушению с выходом продуктов деления в контур в количествах, превышающих как эксплуатационные пределы, так и пределы безопасной эксплуатации.

Сложность оценки времени целостности оболочки твэла в заданных критериях в режиме переменных нагрузок РУ заключается в том, что физическая реализация эксперимента по изучению ползучести материала оболочки на модели твэла в условиях, соответствующих эксплуатационным режимам

Таблица 2.2

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

Высота таблетки, см	1,18
Шаг тепловыделяющих элементов, см	1,275
Начальное содержание гелия в газовой смеси под оболочкой, %	100
Начальная толщина окисной пленки для каждого аксиального сегмента, мк	0,1
Максимальное расстояние между двумя краями смежных таблеток, мк	20
Разница между температурами газа верхнего компенсационного объема и теплоносителя, °С	25
Начальное давление гелия под оболочкой, МПа	2,0
Материал топливной таблетки	двуокись урана
Плотность двуокиси урана, г/см ³	10,4
Материал оболочки	циркалой-4 SR
Количество аксиальных сегментов	10
Длина каждого аксиального сегмента сборки таблеток, 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 компенсационного объема, см ³	0,21
Величина нижнего компенсационного объема, см ³	0
Форма расположения твэлов в ТВС	Равномерная треугольная

переменных нагрузок затруднительна или невозможна, поскольку продолжительность таких испытаний может составлять тысячи суток.

Поскольку некорректно при оценке времени эксплуатации оболочки твэла в режиме нормальных нагрузок переносить экспериментальные данные по ползучести материала оболочки в условиях стационарных и аварийных режимов [7] на оболочку твэла, работающего в нормальном режиме, в математической модели изменения свойств твэла необходимо учитывать всю историю нагружения материала оболочки путем рассмотрения различных программ изменения мощности РУ.

Таблица 2.3

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 $H_3 = H + 2 \cdot \delta_{\text{эф}}$; $\delta_{\text{эф}}$ – величина эффективной добавки (10 см); H – длина твэла
Закон распределения линейного удельного энерговыделения по длине твэла, Вт/см	$q_l(z) = q_{l,\text{max}} \cdot \Phi(z)$, $q_{l,\text{max}} = 248$ Вт/см
Коэффициенты относительной мощности для десяти аксиальных сегментов	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 номинальной (100%) мощности РУ, 1/см ² ·с	$1 \cdot 10^{14}$
Скорость теплоносителя, омывающего твэл, м/с	5,64

С учетом повысившегося за последнее время интереса к работе ядерных энергоблоков Украины в переменной части графика электрической нагрузки энергосистемы (режим переменных нагрузок), необходимо учитывать возможность многократных циклических изменений мощности РУ [18]. Коэффициент использования установленной мощности КИУМ ядерного реактора в течение времени T определяется по следующему выражению:

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

где $\Delta \tau_i$ – время эксплуатации РУ на мощности N_i ;

T – суммарное время эксплуатации РУ;

N – установленная мощность РУ (100 %).

Рассмотрим в качестве примера четыре режима нагружения РУ:

1) Стационарная эксплуатация РУ на 100 % мощности.

Коэффициент использования установленной мощности, рассчитанный по выражению (2.1), будет для данного режима нагружения равен 1.

2) Режим, при котором РУ в течение пяти календарных суток работает на 100 % мощности, затем в течение одного часа реактор переводится на уровень мощности 50 %.

Далее РУ эксплуатируется в течение 46 часов на мощности 50 %, после чего возвращается в течение одного часа на уровень мощности 100 %. Такой режим работы РУ в дальнейшем будет называться недельным циклом нагружения (5 сут – 100 %, 46 ч – 50 %), КИУМ = 0,860 (рис. 2.2, линия 1).

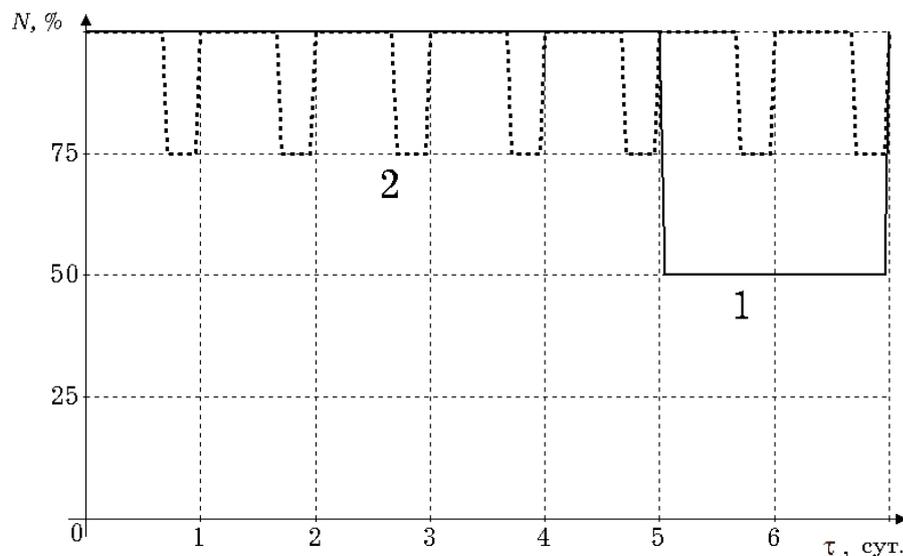


Рис. 2.2. 1 – недельный цикл нагружения (5 сут – 100 %, 46 ч – 50 %), КИУМ = 0,860; 2 – суточный цикл нагружения (16 ч – 100 %, 6 ч – 75 %), КИУМ = 0,927

3) Режим, при котором РУ в течение 16 ч эксплуатируется на 100 % мощности, затем в течение 1 часа реактор переводится на уровень мощности 75 %.

Далее РУ эксплуатируется в течение 6 ч на мощности 75 %, после чего

возвращается в течение одного часа на уровень мощности 100 %. Такой режим работы РУ в дальнейшем будет называться суточным циклом нагружения (16 ч – 100 %, 6 ч – 75 %), КИУМ = 0,927 (рис. 2.2, линия 2).

4) Режим, при котором РУ в будние дни недели работает по суточному циклу (16 ч – 100 %; 6 ч – 75 %), затем в течение последнего часа каждых пятых суток недели мощность снижается до 50 %.

Далее реактор эксплуатируется в течение 47 ч на 50 % мощности, после чего в течение последнего часа каждых седьмых суток мощность РУ поднимается до уровня 100 %. Такой режим работы РУ в дальнейшем будет называться комбинированным недельным циклом нагружения (5 сут – 100 % + 75 %; 2 сут – 50 %), КИУМ = 0,805.

2.4. Моделирование влияния изменения мощности РУ на поврежденность оболочки твэла

Математическая модель расчета распределения энерговыделения в твэле, выполняемого на основе двухгруппового диффузионного приближения, в качестве входных данных использует конструкционные параметры твэла, режимные параметры РУ с ВВЭР-1000, характеристики программы изменения мощности РУ и координаты расположения РО 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 АКЗ 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 расчетной 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 ($Q=3000$ МВт) 163 ТВС, $\langle Q_{\text{ТВС}} \rangle = 18,405$ и $14,724$ МВт при $N=100$ и 80% , соответственно. Тогда $\langle Q_{\text{сл}} \rangle = 1,150$ и $0,920$ МВт при $N=100$ и 80% , 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

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

где $q_{l,j,\max}$ – 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 влияния размещения ОР регулирующей группы СУЗ на поврежденность оболочки твэла

Усовершенствованный алгоритм (У-алгоритм) управления мощностью АКЗ ВВЭР-1000 наиболее эффективен с точки зрения стабильности АО [19] – рис. 2.3.

Ячейки АКЗ, в которых при У-алгоритме размещены ОР регулирующей (10-й) группы, и границы сектора симметрии (1/6 АКЗ) обозначены на рис. 2.3 толстыми линиями.

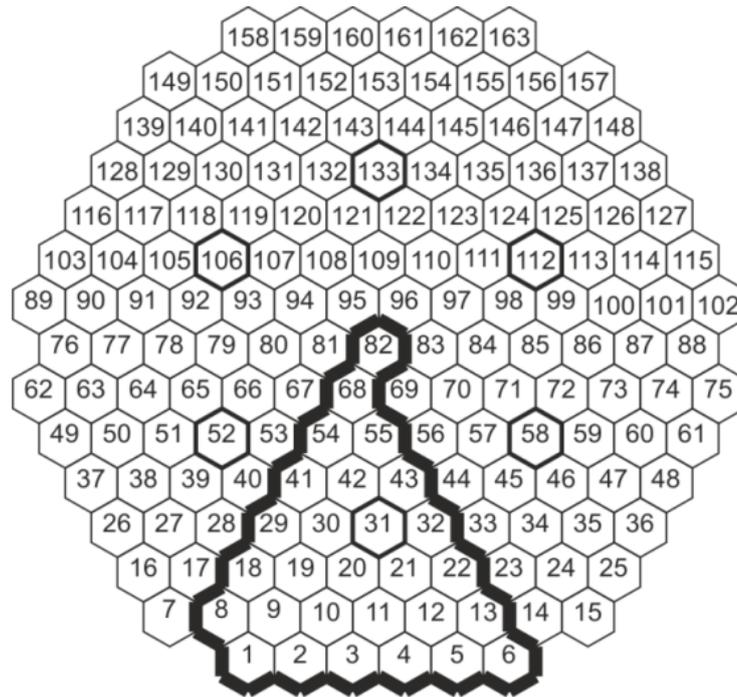


Рис. 2.3. Размещение ОР СУЗ 10-й группы при У-алгоритме: (число) номер ячейки АКЗ (360° симметрия)

2.6. Принципы термомеханического анализа изменения свойств твэ-ла

При анализе изменения термомеханических свойств твэла, как правило, выполняется расчет в цилиндрической геометрии, в которой сборка топливных таблеток и оболочка дискретизируются с помощью кольцевых элементов.

Некоторые хорошо известные ПС, анализирующие топливо, используют метод конечных разностей (МКР) [8, 71]. Согласно МКР, для каждого кольца радиальное перемещение (деформация) рассчитывается независимо, как если бы кольцевой элемент мог деформироваться свободно, затем для определения общего радиального перемещения внешней поверхности таблетки, а также внутренней и внешней поверхностей оболочки, радиальные деформации суммируются.

В результате, этот метод в принципе пренебрегает механическим взаимодействием между соседними кольцевыми элементами, и с его помощью возможно анализировать поведение твэла легководного реактора с приемлемой точностью только в стационарных режимах РУ.

В переходных же режимах с помощью МКР не удастся предсказывать такие важные величины, как термическое напряжение внутри таблетки и сила реакции, возникающая вследствие МВТО и приложенная на поверхности контакта таблетки с оболочкой, что приводит к неопределенности в предсказании поведения твэла.

Хотя, чтобы частично снять эту проблему, в ПС, построенных на основе МКР, используются некоторые сложные математические техники и упрощенная модель МВТО, это может рассматриваться только как половинчатое решение, несущее в себе потенциальное препятствие для расширения этих ПС в будущем.

Напротив, использование метода конечных элементов (МКЭ) позволяет избежать таких трудностей как теоретически, так и на практике, поэтому с помощью данного метода можно выполнять надежный и точный механический анализ не только для стационарных, но и для переходных режимов [8].

2.7. Математическая модель расчета распределения температуры, напряжений и деформаций в твэле

Математическая 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 (длина одного АС принималась равной длине двух аксиальных слоев) ТВЭЛа.

2.7.1. Модель определения энтальпии теплоносителя

При анализе изменения свойств ТВЭЛа длина ТВЭЛа условно делилась на 8 АС. Столб топливных таблеток и оболочка дискретизировались в цилиндрической геометрии с помощью кольцевых элементов. Количество радиальных расчетных ячеек задавалось 10 и 4 – для таблетки и оболочки, соответственно. Две внутренние ячейки оболочки моделировали материал оболочки, а две внешние – слой окиси циркония (рис. 2.4).

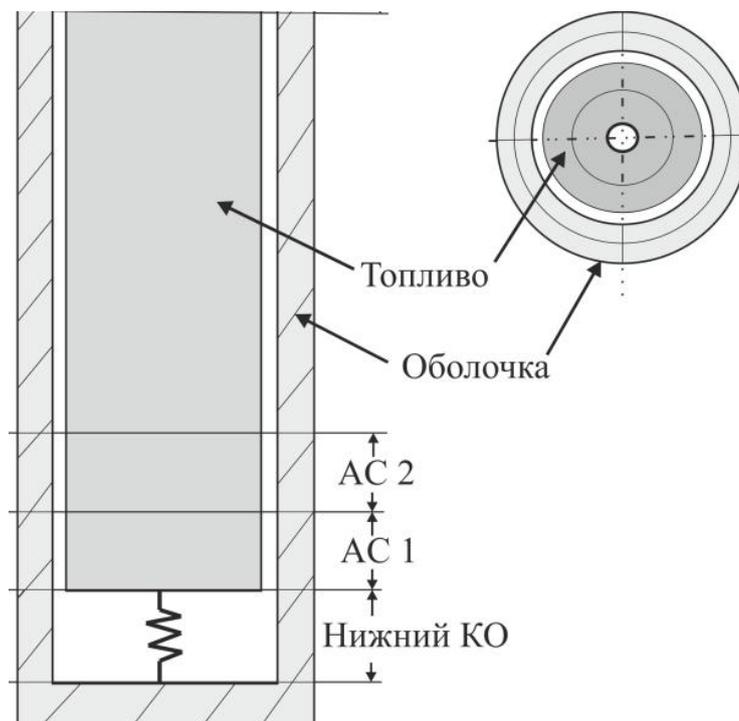


Рис. 2.4 Двумерная осесимметричная модель ТВЭЛа:

КО – компенсационный объем

Энтальпия элементарно малого объема теплоносителя $i(z,t)$ в аксиальной

координате z в момент времени t определялась как

$$i(z, t) = i(0, t_{in}) + \int_{t_{in}}^t v(z') \cdot q_l(z') \cdot d\tau / S(z'), \quad (2.5)$$

где t_{in} – время, когда теплоноситель, находящийся в координате z в момент t , проходит через вход обогреваемого участка;

$z'(\tau)$ – координата теплоносителя в момент τ , находившегося в момент t в координате z , м ;

$v(z')$ – удельный объем теплоносителя, м³/кг;

$q_l(z')$ – линейная мощность, Вт/м; $S(z')$ – площадь поперечного сечения проточного канала, м².

Рассматривая увеличение энтальпии потока на отрезке времени Δt , из (2.5) следует выражение для энтальпии j -го сегмента i_j в момент $t_0 + \Delta t$

$$i_j(t_0 + \Delta t) = i_0(t_0) + \sum_{i=k}^j v_i \cdot q_{l,i} \cdot \delta t_i / S_i, \quad (2.6)$$

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;

$$\delta t_i = S_i \cdot \Delta L_i / (G \cdot v_i), \Delta L_i – \text{длина } i\text{-го сегмента; } G – \text{массовый расход, кг/с;}$$

$$i_0(t_0) = i_k(t_0) + [i_{k+1}(t_0) - i_k(t_0)](z_0 - z_k) / (z_{k+1} - z_k).$$

Схема условного разбиения проточного канала на АС изображена на рис. 2.5.

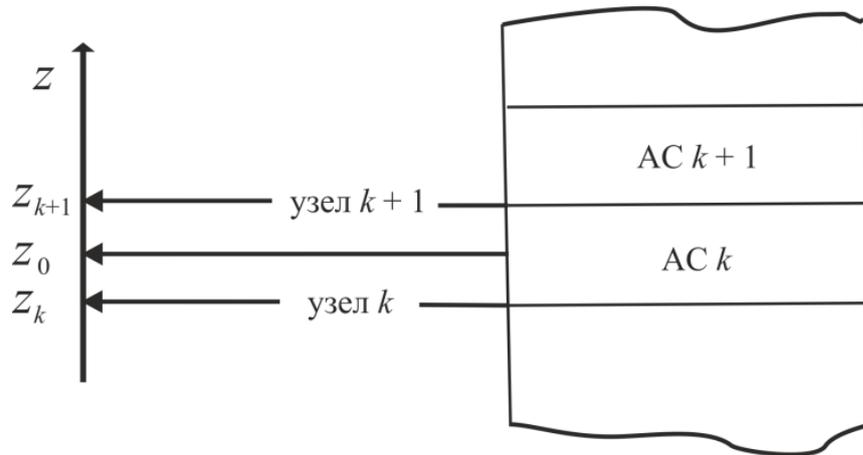


Рис. 2.5. Схема условного разбиения проточного канала на АС

2.7.2. Коэффициент теплоотдачи на поверхности оболочки

Для вычисления коэффициента теплоотдачи на поверхности оболочки использовались эмпирические соотношения: в однофазной области – соотношение Диттуса-Боэлтера [20], а при пузырьковом кипении – соотношение Чена [21], где тепловой поток при пузырьковом кипении выражается используя величину перегрева теплоотдающей поверхности ΔT_s :

$$\alpha_{ст} = 0,0012 \frac{k_{ж}^{0,79} \cdot c_{p,ж}^{0,45} \cdot \rho_{ж}^{0,49}}{\sigma_{ж}^{0,5} \cdot \mu_{ж}^{0,29} \cdot H_{жг}^{0,24} \cdot \rho_{г}^{0,24}} \Delta T_s^{0,24} \cdot \Delta P^{0,75} \cdot S, \quad (2.7)$$

где индексы “ж” и “г” обозначают жидкую и газообразную фазы, соответственно;

$\alpha_{ст}$ – коэффициент теплоотдачи на поверхности оболочки, Вт/м²·К;

$k_{ж}$ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/м·К;

$c_{p,ж}$ – удельная теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении, Дж/кг·К;

$\sigma_{ж}$ – коэффициент поверхностного натяжения теплоносителя, Н/м;

$H_{жг}$ – скрытая теплота парообразования, Дж/кг;

ΔT_s – величина перегрева поверхности, К;

$\Delta P = P_s - P$; P_s – давление насыщения, Па;

P – давление теплоносителя, Па;

S – коэффициент подавления Чена;

x_e – массовое расходное паросодержание.

Значения коэффициента подавления Чена определяются по табл. 2.4 в зависимости от величины комплекса $Re_{ж} \cdot F^{1,25}$, где $Re_{ж}$ – число Рейнольдса для жидкости.

Таблица 2.4

Коэффициент подавления Чена

$Re_{ж} \cdot F^{1,25}$	10^3	10^4	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	10^5	$2 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$	10^6	10^8
S	1	0,893	0,793	0,703	0,629	0,513	0,375	0,213	0,142	0,115	0,093	0,083	0

F – множитель, определяемый в зависимости от величины комплекса

$$R = [x_e / (1 - x_e)]^{0,9} \cdot [\rho_{ж} / \rho_c]^{0,5} \cdot [\mu_c / \mu_{ж}]^{0,1},$$

где x_e – массовое расходное паросодержание.

Значения множителя F приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Значения множителя F

R	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	1	2	3	4	6	10	20	50	100	400
F	1	1,07	1,21	1,42	1,63	2,02	2,75	4,3	5,6	6,75	9,1	12,1	22	44,7	76	200

2.7.3. Зависимости для расчета температуры в твэле

Распределение температуры в твэле определялось с разницей между численным и аналитическим решениями не более 0,1 % [8].

Допущения:

1) Распределение температуры в твэле определялось в одномерной ради-

альной геометрии с учетом внутреннего тепловыделения, изменений в теплопроводности таблетки и зазора, изменений в теплообмене между поверхностью и теплоносителем. При анализе градиента температуры в каждом аксиальном сегменте твэла используются одномерные уравнения теплопроводности, записанные для радиальной координаты r , при этом теплопроводностью в осевом направлении пренебрегают. Число радиальных ячеек равно 10.

2) Массовая скорость и давление потока на каждом временном шаге принимались постоянными.

3) Термические свойства топлива в каждой расчетной ячейке зависят 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 (индекс j опущен) и соответствующей области зазора решалось неявным методом путем преобразования в разностные аппроксимационные соотношения [8].

Теплопроводность в АС описывается выражением:

$$\frac{\partial}{\partial t}[C_v(T, r) \cdot T(r, t)] = \text{div}[k(T, r) \cdot \text{grad } T(r, t)] + q(r, t), \quad (2.8)$$

где T – температура, К;

r – координата в радиальном направлении, м;

t – время, с;

C_v – удельная объемная теплоемкость, Дж/м³·К;

k – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;

q – мощность внутренних источников теплоты (плотность тепловыделения), Вт/м³.

Выполнено интегрирование по объему уравнения теплопроводности

(2.8). Объем, по которому выполняется интегрирование, заключен между пунктирными линиями, показанными на рис. 2.6.

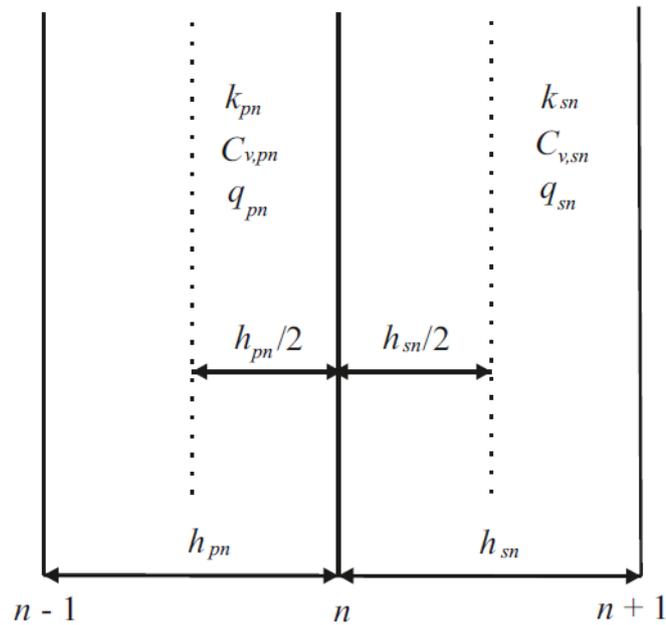


Рис. 2.6. Модель расчетной ячейки: h_{pn} – ширина ячейки между узлами $n-1$ и n ; h_{sn} – ширина ячейки между узлами n и $n+1$; k_{pn} , $C_{v,pn}$, q_{pn} – коэффициент теплопроводности, удельная объемная теплоемкость, плотность тепловыделения в средней точке ячейки h_{pn} , соответственно

Из (2.8) следует:

$$\iiint_V \frac{\partial}{\partial t} [C_v(T, r) \cdot T(r, t)] \cdot dV = \iiint_V \operatorname{div} [k(T, r) \cdot \operatorname{grad} T(r, t)] \cdot dV + \iiint_V q(r, t) \cdot dV. \quad (2.9)$$

Так как задача одномерная, размеры объема V считаются единичными, за исключением размера в радиальном направлении. Исключая общий множитель $2 \cdot \pi$ и используя прямой метод конечных разностей для дифференцирования по времени, левая часть (2.9) выражается как

$$\iiint_V \frac{\partial}{\partial t} [C_v(T, r) \cdot T(r, t)] \cdot dV \approx \iiint_V C_v(T, r) \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} \cdot dV \approx$$

$$\approx \frac{(T_n^{m+1} - T_n^m)}{\Delta t} h_{pn} \left[C_{v,pn} \frac{h_{pn}}{2} \left(r_n - \frac{h_{pn}}{4} \right) + C_{v,sn} \frac{h_{sn}}{2} \left(r_n + \frac{h_{sn}}{4} \right) \right], \quad (2.10)$$

где T_n^m – температура в координате r_n в момент времени t_m ;

T_n^{m+1} – температура в координате r_n в момент времени t_{m+1} .

Первое слагаемое правой части (2.10) выражается как

$$\begin{aligned} \iiint_V \operatorname{div}[k(T, r) \cdot \operatorname{grad} T(r, t)] \cdot dV &= \iint_{\bar{S}} [k(T, r) \cdot \operatorname{grad} T(r, t)] \cdot d\bar{S} \approx \\ &\approx -k_{pn} (T_n^{m+\theta} - T_{n-1}^{m+\theta}) \left(r_n - \frac{h_{pn}}{2} \right) + \frac{k_{sn} (T_{n+1}^{m+\theta} - T_n^{m+\theta})}{h_{sn}} h_{pn} \left(r_n + \frac{h_{sn}}{2} \right), \end{aligned} \quad (2.11)$$

где \bar{S} – поверхность, ограничивающая объем V ;

θ – параметр неявного метода;

k_{pn} , k_{sn} – коэффициент теплопроводности в средних точках ячеек h_{pn} и h_{sn}

(рис. 2.6).

В (2.11) для интегрирования вдоль поверхности границы \bar{S} (кусочно-гладкой поверхности) используются условия непрерывности теплового потока на внутренней границе и формула Остроградского-Гаусса. Вводятся следующие обозначения:

$$\begin{aligned} h_{pn}^V &= \frac{h_{pn}}{2} \left(r_n - \frac{h_{pn}}{4} \right), \quad h_{sn}^V = \frac{h_{sn}}{2} \left(r_n + \frac{h_{sn}}{4} \right), \\ h_{pn}^S &= \frac{1}{h_{pn}} \left(r_n - \frac{h_{pn}}{2} \right), \quad h_{sn}^S = \frac{1}{h_{sn}} \left(r_n + \frac{h_{sn}}{2} \right), \\ h_{pn}^V &= \frac{h_{pn}}{2} \left(r_n - \frac{h_{pn}}{4} \right), \quad h_{sn}^V = \frac{h_{sn}}{2} \left(r_n + \frac{h_{sn}}{4} \right), \\ h_{pn}^S &= \frac{1}{h_{pn}} \left(r_n - \frac{h_{pn}}{2} \right), \quad h_{sn}^S = \frac{1}{h_{sn}} \left(r_n + \frac{h_{sn}}{2} \right), \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$D_n = C_{v,pn} \cdot h_{pn}^V + C_{v,sn} \cdot h_{sn}^V.$$

Плотность тепловыделения $q(r, t)$, входящая в (2.9), представляется по методу разделения переменных в следующем виде:

$$q(r,t) = Q(r) \cdot P(t) , \quad (2.13)$$

где $Q(r)$ – безразмерное распределение относительной плотности тепловыделения в радиальном направлении;

$P(t)$ – эталонное значение плотности тепловыделения, представленное в виде функции от времени, Вт/м³.

Далее второе слагаемое правой части (2.9) выражается как

$$\iiint_V q(r,t) \cdot dV \approx h_{pn} \cdot (Q_{pn} \cdot h_{pn}^V + Q_{sn} \cdot h_{sn}^V) \cdot P(t_{m+\theta}) . \quad (2.14)$$

Используя правые части полученных выражений для замены каждого члена выражения (2.9) его соответствующим приближенным представлением, (2.9) преобразуется в разностное аппроксимационное выражение для n -й точки ячейки:

$$\begin{aligned} \frac{(T_n^{m+1} - T_n^m) D_n}{\Delta t} = & -(T_n^{m+\theta} - T_{n-1}^{m+\theta}) k_{pn} \cdot h_{pn}^S + (T_{n+1}^{m+\theta} - T_n^{m+\theta}) k_{sn} \cdot h_{sn}^S + \\ & + (Q_{pn} \cdot h_{pn}^V + Q_{sn} \cdot h_{sn}^V) \cdot P(t_{m+\theta}) . \end{aligned} \quad (2.15)$$

Задавая $\theta = 1$ (полностью неявный метод), из (2.15) следует

$$\begin{aligned} \frac{(T_n^{m+1} - T_n^m) D_n}{\Delta t} = & -(T_n^{m+1} - T_{n-1}^{m+1}) k_{pn} \cdot h_{pn}^S + (T_{n+1}^{m+1} - T_n^{m+1}) k_{sn} \cdot h_{sn}^S + \\ & + (Q_{pn} \cdot h_{pn}^V + Q_{sn} \cdot h_{sn}^V) P(t_{m+1}) . \end{aligned} \quad (2.16)$$

T^{m+1} и T^m в (2.16) определяются используя среднюю температуру в узлах сетки $n-1$ и n , а также среднюю температуру в узлах n и $n+1$. После преобразования (2.16), дифференциальное уравнение в узле сетки n (в средней области) определяется как

$$a_n \cdot T_{n-1}^{m+1} + b_n \cdot T_n^{m+1} + c_n \cdot T_{n+1}^{m+1} = d_n^m , \quad (2.17)$$

где

$$\begin{aligned} a_n = & -k_{pn} \cdot h_{pn}^S \cdot \Delta t; \quad b_n = D_n - a_n - c_n; \quad c_n = -k_{sn} \cdot h_{sn}^S \cdot \Delta t; \\ d_n^m = & D_n \cdot T_n^m + \Delta t (Q_{pn} \cdot h_{pn}^V + Q_{sn} \cdot h_{sn}^V) P(t_{m+1}) . \end{aligned} \quad (2.18)$$

Обозначение узлов при расчете теплопроводности зазора между таблет-

кой и оболочкой шириной h_g показано на рис. 2.7.

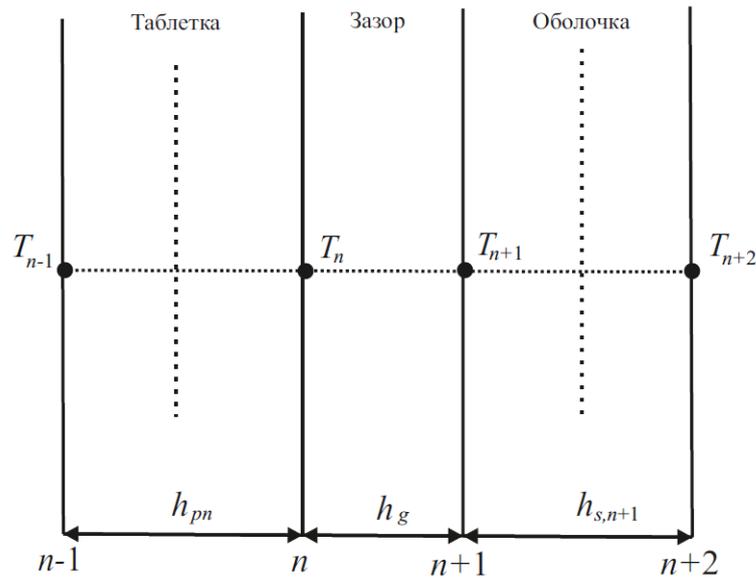


Рис. 2.7. Обозначение узлов при расчете теплопроводности зазора между таблеткой и оболочкой

По аналогии с (2.15), для области зазора между таблеткой и оболочкой справедливо

$$\frac{(T_n^{m+1} - T_n^m) D'_n}{\Delta t} = -(T_n^{m+1} - T_{n-1}^{m+1}) k_{pn} \cdot h_{pn}^s + (T_{n+1}^{m+1} - T_n^{m+1}) k_g \cdot h_{sn}^s + \quad (2.19)$$

$$+ Q_{pn} \cdot h_{pn}^V \cdot P(t_{m+1});$$

$$\frac{(T_{n+1}^{m+1} - T_{n+1}^m) D''_{n+1}}{\Delta t} = -(T_{n+1}^{m+1} - T_n^{m+1}) k_g \cdot h_{p,n+1}^s + (T_{n+2}^{m+1} - T_{n+1}^{m+1}) k_{s,n+1} \cdot h_{s,n+1}^s + \quad (2.20)$$

$$+ Q_{s,n+1} \cdot h_{s,n+1}^V \cdot P(t_{m+1}),$$

где $D'_n = C_{v,pn} \cdot h_{pn}^V$; $D''_{n+1} = C_{v,s,n+1} \cdot h_{s,n+1}^V$; $h_{sn}^s = \frac{1}{h_{sn}} \left(r_n + \frac{h_{sn}}{2} \right)$;

$$h_{p,n+1}^s = \frac{1}{h_{p,n+1}} \left(r_n - \frac{h_{p,n+1}}{2} \right); \quad h_{sn} = h_{p,n+1} = h_g;$$

k_g – коэффициент теплопроводности зазора, Вт/м·К.

Обозначение узлов при расчете теплопроводности в твэле показано на рис. 2.8.

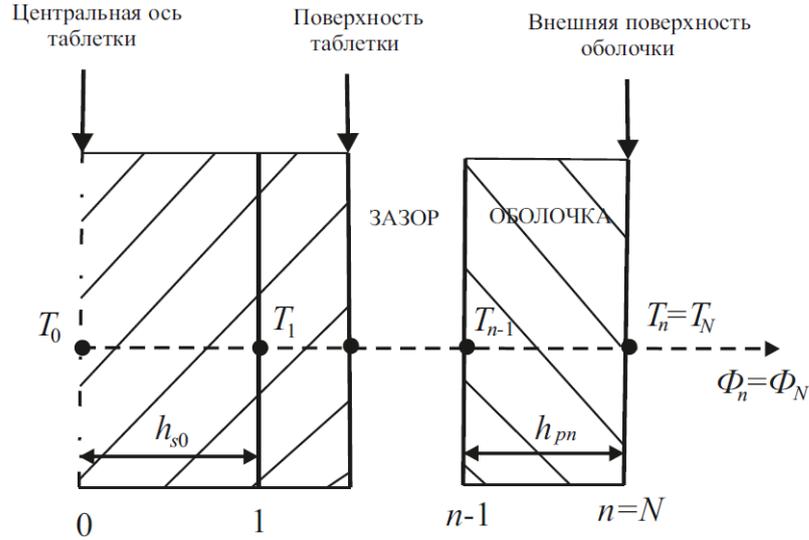


Рис. 2.8. Обозначение узлов при расчете теплопроводности в твэле:

Φ_N – плотность теплового потока на поверхности оболочки

Следует отметить, что окисный слой на внешней поверхности оболочки характеризуется более низким коэффициентом теплопроводности, чем металлическая фаза.

Для центра твэла выражение (2.15) трансформируется следующим образом:

$$\frac{(T_0^{m+1} - T_0^m)}{\Delta t} D_0'' = (T_1^{m+1} - T_0^{m+1}) \cdot k_{s0} \cdot h_{s0}^s + Q_{s0} \cdot h_{s0}^V \cdot P(t_{m+1}), \quad (2.21)$$

где $D_0'' = C_{v,s0} \cdot h_{s0}^V$.

Граничное условие для поверхности оболочки ($r = r_N$) имеет вид:

$$\frac{(T_N^{m+1} - T_N^m)}{\Delta t} D_N' = -(T_N^{m+1} - T_{N-1}^{m+1}) k_{pN} \cdot h_{pN}^s - r_N \cdot \Phi_N^{m+1} + Q_{pN} \cdot h_{pN}^V \cdot P(t_{m+1}), \quad (2.22)$$

где Φ_N – плотность теплового потока на поверхности оболочки, Вт/м²;

r_N – радиус внешней поверхности оболочки, м;

$$D_N' = C_{v,pN} \cdot h_{pN}^V.$$

Далее разностное аппроксимационное соотношение (2.22) выражается в виде

$$a_N \cdot T_{N-1}^{m+1} + b_N \cdot T_N^{m+1} = d_N, \quad (2.23)$$

где коэффициенты a_N , b_N и d_N задаются как

$$a_N = -k_{pN} \cdot h_{pN}^s \cdot \Delta t, \quad (2.24)$$

$$b_N = D'_N - a_N, \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} d_N &= D'_N \cdot T_N^m - r_N \cdot \Phi_N^{m+1} \cdot \Delta t + Q_{pN} \cdot h_{pN}^V \cdot P(t_{m+1}) \cdot \Delta t = \\ &= d'_N + d''_N \cdot \Phi_N^{m+1}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

В выражениях (2.22)...(2.25) неизвестными переменными являются T_{N-1}^{m+1} , T_N^{m+1} и Φ_N^{m+1} .

Вводя коэффициенты E и F , получаемые прямым исключением по методу исключений Гаусса, начиная от первой точки до точки $(N-1)$, выводится следующее соотношение:

$$T_{N-1}^{m+1} = -E_{N-1} \cdot T_N^{m+1} + F_{N-1}. \quad (2.27)$$

После подстановки (2.24)...(2.27) в (2.23):

$$A_1 \cdot T_N^{m+1} + B_1 = \Phi_N^{m+1}, \quad (2.28)$$

где

$$A_1 = (b_N - a_N \cdot E_{N-1}) / d''_N,$$

$$B_1 = (a_N \cdot F_{N-1} - d'_N) / d''_N.$$

Таким образом, A_1 и B_1 – известные величины. С другой стороны, для T_N^{m+1} и Φ_N^{m+1} справедливо:

$$\Phi_N^{m+1} = \alpha (T_N^{m+1} - T_{жс}^{m+1}), \quad (2.29)$$

где $T_{жс}^{m+1}$ – известная температура теплоносителя, К;

α – коэффициент теплоотдачи на поверхности оболочки, Вт/м²·К.

Решая совместно уравнения (2.28) и (2.29), находятся T_N^{m+1} и Φ_N^{m+1} . Итак, используя обратную подстановку по методу исключений Гаусса, можно последовательно получить T^{m+1} . Таким образом, уравнение теплопроводности для АС j (индекс j опущен) и соответствующей области зазора решается неявным методом преобразованием в разностные аппроксимационные соотно-

шения [8].

Исключая плотность теплового потока на поверхности оболочки Φ_N^{m+1} , распределение температуры в твэле в одномерной радиальной геометрии на временном шаге $m+1$ находится из уравнения

$$A_1 \cdot T_N^{m+1} + B_1 = \alpha(T_N^{m+1} - T_B^{m+1}), \quad (2.30)$$

где A_1, B_1 – функции теплофизических параметров в узле N на поверхности оболочки;

T_N^{m+1}, T_B^{m+1} – температура в узле N (на поверхности оболочки) и теплоносителя, соответственно, К.

Из (2.30) находились T_N^{m+1} и плотность теплового потока на поверхности оболочки Φ_N^{m+1} , далее определялась температура в расчетном узле $N-1$. Затем рассчитывались испускание газообразных ПД, поток газа в зазоре в осевом направлении, а также их обратное влияние на теплопроводность зазора.

Пренебрегая конвективной теплопередачей внутри зазора, для коэффициента теплопередачи зазора $k_{заз}$, Вт/см²·К, использовалось модифицированное соотношение модели Росса и Стаута [22]:

$$k_{заз} = k_{газ} + k_{кон} + k_{изл}, \quad (2.31)$$

где $k_{газ}, k_{кон}, k_{изл}$ – составляющие коэффициента теплопередачи зазора, учитывающие теплопроводность газа, областей плотного контакта топлива с оболочкой и излучением, соответственно.

$$k_{газ} = \frac{\lambda_{газ}}{C(R_{таб} + R_{об}) + (g_1 + g_2) + h_g}, \quad (2.32)$$

где $\lambda_{газ}$ – коэффициент теплопроводности смешанного газа, Вт/см·К;

C – безразмерный эмпирический коэффициент, $C = 2,77 - 2,55 \cdot 10^{-8} \cdot P_{кон}$,

$P_{кон}$ – контактное давление между таблеткой и оболочкой, Па.

$R_{таб}, R_{об}$ – шероховатость поверхностей соответственно таблетки и обо-

лочки, см ($R_{таб} \approx R_{об} \approx 1$ мк);

$g_1 + g_2$ – длина скачка температуры между твердой и жидкой фазами, см;

h_g – ширина радиального зазора, см;

$$k_{кон} = \frac{\lambda_{кон} \cdot P_{кон}}{0,5 \cdot R \cdot H}, \quad (2.33)$$

где $\lambda_{кон}$ – эффективный коэффициент теплопроводности контакта топливо-оболочка, Вт/см·К, определяемый из выражения

$$\lambda_{кон} = \frac{2 \cdot \lambda_{таб}(T_{таб,н}) \cdot \lambda_{об}(T_{об,вн})}{\lambda_{таб}(T_{таб,н}) + \lambda_{об}(T_{об,вн})}, \quad (2.34)$$

где $T_{таб,н}, T_{об,вн}$ – температура соответственно наружной поверхности таблетки и внутренней поверхности оболочки, К;

$\lambda_{об}, \lambda_{таб}$ – коэффициент теплопроводности соответственно оболочки и таблетки, Вт /см·К;

$$R = \sqrt{\frac{R_{таб}^2 + R_{об}^2}{2}};$$

H – твердость материала оболочки по Майеру, Па ($H = 2,8 \cdot \sigma_{0,2}$ [23-86],

$\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести материала оболочки);

$$k_{изл} = \left[\frac{1}{\varepsilon_{таб}} + \frac{1}{\varepsilon_{об}} - 1 \right]^{-1} \cdot \sigma \cdot \frac{T_{таб,н}^4 - T_{об,вн}^4}{T_{таб,н} - T_{об,вн}}, \quad (2.35)$$

где $\varepsilon_{таб}, \varepsilon_{об}$ – коэффициент излучения таблетки и черной окиси оболочки, соответственно;

σ – постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$ Вт/см²·К⁴).

Для определения коэффициента теплопроводности смешанного газа $\lambda_{газ}$ и длины скачка температуры между твердой и жидкой фазами $g_1 + g_2$ используются выражения модели MATPRO-09 [23]. В соответствии с моделью Росса и Стаута длина скачка температуры для гелия, азота, криптона и ксенона равна $10 \cdot 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-4}$ и $1 \cdot 10^{-4}$ см, соответственно.

При расчете давления газа $P_{газ}$ принимаются допущения, что газ в твэле ведет себя как идеальный газ и давление в твэле распределено равномерно [8].

Согласно модели MATPRO-09, коэффициент теплопроводности смешанного газа (смеси гелия, азота, криптона и ксенона) выражается как

$$\lambda_{газ} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i}{1 - \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \Phi_{ij} \frac{x_j}{x_i}} \right), \quad (2.36)$$

$$\text{где } \Phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{1/4} \right]^2}{2^{3/2} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{1/2}} \left[1 + \frac{2,41(M_i - M_j)(M_i - 0,142 \cdot M_j)}{(M_i + M_j)^2} \right];$$

x_i, M_i – молярные концентрация и масса i -го газа;

λ_i – коэффициент теплопроводности i -го газа, Вт/см·К.

Состав газа определяется испусканием газообразных ПД.

Длина скачка температуры между твердой и жидкой фазами определяется как

$$g_1 + g_2 = \sum_{i=1}^n (g_1 + g_2)_i \cdot \frac{10^5}{P_{газ}}, \quad (2.37)$$

где $(g_1 + g_2)_i$ – длина скачка температуры между твердой и жидкой фазами для i -го газа, см;

$P_{газ}$ – давление газа, Па.

В соответствии с моделью Росса и Стаута длина скачка температуры для гелия, азота, криптона и ксенона равна $10 \cdot 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-4}$ и $1 \cdot 10^{-4}$ см, соответственно.

При расчете давления газа $P_{газ}$ принимаются допущения, что газ в твэле

ведет себя как идеальный газ и давление в твэле распределено равномерно.

С учетом принятых допущений, давление газа внутри твэла рассчитывается как

$$P_{газ} = \frac{n_{общ} \cdot R}{\frac{V_{КО}}{T_{КО}} + \sum_{j=1}^M \left(\frac{V_{рад,j}}{T_{рад,j}} + \frac{V_{отв,j}}{T_{таб,j}^{max}} + \frac{V_{своб,j}}{T_{таб,j}^{cp}} \right)}, \quad (2.38)$$

где $n_{общ}$ – общее число молей всех газов, моль;

R – газовая постоянная ($R = 8,314$ Дж/моль·К);

$V_{КО}$ – КО твэла, м³;

$T_{КО}$ – температура газа КО твэла, К;

$V_{рад,j}$, $V_{отв,j}$ – объем соответственно радиального зазора и центрального отверстия таблетки в аксиальном сегменте j топливного стержня, м³;

$T_{рад,j}$, $T_{таб,j}^{max}$ – температура соответственно радиального зазора и в центре таблетки в аксиальном сегменте j , К;

$V_{своб,j}$ – объем свободного газа в аксиальном сегменте j , м³;

$T_{таб,j}^{cp}$ – средняя по объему температура таблетки в аксиальном сегменте j , К.

2.7.4. Принципы анализа механического взаимодействия между топливом и оболочкой

При анализе механического взаимодействия между топливом и оболочкой (МВТО) рассчитывались:

– величина деформации таблетки, вызванной термическим расширением, уплотнением, распуханием и релокацией;

– распределение напряжений решением уравнения жесткости для таблетки и оболочки с учетом растрескивания, эластичности/пластичности и ползу-

чести таблетки с ГУ, соответствующими режиму контакта между таблеткой и оболочкой; когда происходило МВТО и менялся режим контакта, выполнялся расчет с новыми ГУ.

Поскольку распределения температуры и деформации физически влияют друг на друга, при моделировании изменения свойств твэла уравнения теплопроводности и механической деформации компонентов твэла решались совместно путем организации расчетного цикла сходимости.

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 напряжений/деформаций в твэле выполнялся путем совместного решения уравнений теплопроводности и деформации по МКЭ, где четырехугольный элемент имеет 4 степени свободы. При анализе МВТО принят следующий порядок расчета [8]:

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

2) для таблетки и оболочки рассчитывалось распределение напряжений и деформаций путем решения уравнения жесткости с ГУ, соответствующими режиму контакта между таблеткой и оболочкой;

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

2.7.5. Соотношение для скорости деформации ползучести оболочки

В открытой литературе нет эмпирических соотношений для расчета с

учетом радиационных эффектов изменения со временем напряженного состояния, в частности, 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 для циркониевого сплава циркалой-4 [24]. По сравнению со сплавом Э-110, циркалой-4 обладает в условиях АКЗ РУ с ВВЭР-1000 несколько более худшими деформационными и коррозионными свойствами [8].

Исходя из перечисленных факторов, выбраны выражения модели MATPRO-A для топливной таблетки, изготовленной из спеченной двуокиси урана, и оболочки ТВЭЛА, изготовленной из циркалой-4, учитывающие многосное 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 [25].

Эмпирическое соотношение [24] для скорости эквивалентной деформации ползучести \dot{p}_e (с^{-1}) в зависимости от времени t (с) имеет вид

$$\dot{p}_e = K \cdot \Phi(\sigma_e + B \cdot e^{C \cdot \sigma_e}) \exp(-10000/R \cdot T) t^{-1/2}, \quad (2.39)$$

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;

После исключения времени из (2.39), записано:

$$\dot{p}_e = 2\{K \cdot \Phi(\sigma_e + B \cdot \exp(C \cdot \sigma_e)) \exp(-10000/R \cdot T)\}^2 / p_e. \quad (2.40)$$

σ_e выражалось через тангенциальную σ_θ и аксиальную σ_z компоненты на основе модели тонких цилиндрических оболочек, при допущении изотропно-

сти материала оболочки и неучете напряжения сдвига.

При этих допущениях справедливо:

$$\sigma_e = \sqrt{0,5[(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_z^2]} . \quad (2.41)$$

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

Тангенциальная и аксиальная компоненты напряжения в оболочке представляются на основе модели тонких цилиндрических оболочек следующим образом:

$$\sigma_\theta = [d_{ci} \cdot (P_{\text{кон}} + P_\Gamma) - d_{co} \cdot P_{\text{ж}}] / (d_{co} - d_{ci}) . \quad (2.42)$$

$$\sigma_z = [d_{ci}^2 \cdot (P_{\text{кон}} + P_\Gamma) - d_{co}^2 \cdot P_{\text{ж}}] / (d_{co}^2 - d_{ci}^2) , \quad (2.43)$$

где $P_{\text{кон}} = 0$ при отсутствии контакта таблетки и оболочки;

d_{ci} – внутренний диаметр оболочки, см;

d_{co} – внешний диаметр оболочки, см;

P_Γ – внутреннее давление, Па;

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

Контактное давление между таблеткой и оболочкой $P_{\text{кон}}$, используемое также для определения коэффициента теплопередачи зазора, находилось как

$$P_{\text{кон}} = E_c \cdot u_c (r_{co} - r_{ci}) / r_{ci}^2 , \quad (2.44)$$

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

u_c – радиальный сдвиг оболочки, м;

E_c – модуль Юнга оболочки, Па;

$$u_c = u_f + \delta - \delta_o ,$$

где u_f – радиальный сдвиг таблетки, м;

δ , δ_o – соответственно ширина радиального зазора между таблеткой и оболочкой и начальная величина ширины радиального зазора, м.

2.7.6. Соотношение для скорости коррозии оболочки твэла

Из анализа доступных в открытых источниках эмпирических выражений для скорости коррозии оболочки твэла в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора следует, что 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 МАТPRO-A [24], согласно которому толщина окисного слоя $S_{ок}$ (м) до перехода от пузырькового кипения к пленочному находится как:

$$S_{ок} = (4,976 \cdot 10^3 \cdot A \cdot t \cdot \exp(-15660/T) + S_o^3)^{1/3} \cdot (1 + k_{cor}), \quad (2.45)$$

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.

2.7.7. Метод конечных элементов

Согласно МКЭ, при анализе напряжений/деформаций по всей длине твэла используется двумерная осесимметричная модель твэла, в которой вся длина делится на аксиальные сегменты, и каждый сегмент далее делится в радиальном направлении на концентрические кольцевые элементы.

В соответствии с этой двумерной осесимметричной моделью твэла, четырехугольные элементы имеют четыре степени свободы (рис. 2.9).

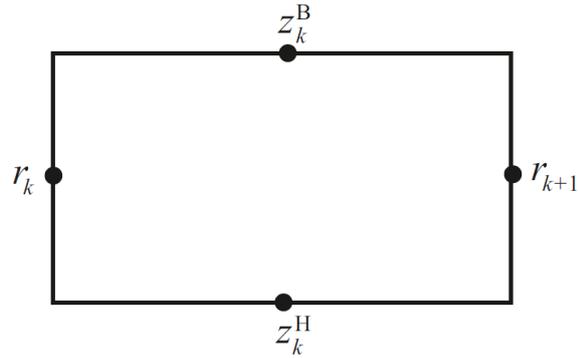


Рис. 2.9. Четырехугольный элемент модели с четырьмя степенями свободы

Соотношение между сеточным разбиением и степенью свободы каждого узла в аксиальном сегменте иллюстрируется на рис. 2.10.

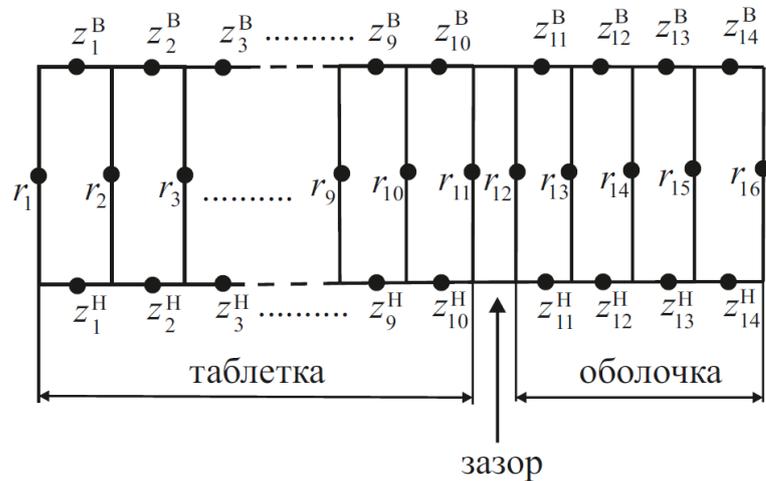


Рис. 2.10. Сеточное разбиение по МКЭ (для одного АС)

На рис. 2.10. количество радиальных ячеек таблетки и оболочки задается как 10 и 4, соответственно. Две внутренние ячейки оболочки (11, 12) – металлическая фаза, а две внешние (13, 14) – слой окиси циркония ZrO_2 .

С развитием коррозии толщина ячеек окисного слоя и металла изменяется и ячейки повторно объединяются [8].

Приращение объема окиси в течение каждого временного шага учитывается приращением аксиальной деформации ячейки окисного слоя. Относительная величина приращения объема X оболочки в результате процесса коррозии определяется как

$$X = k_{\text{ПБ}} - 1,0,$$

где $k_{\text{ПБ}}$ – коэффициент Пайлинга-Бедворта, $k_{\text{ПБ}} \approx 1,56$.

Полагается, что приращение объема X происходит на P_x ($P_x \approx 80\%$) за счет радиального направления, и на $100 - P_x$ (%) – за счет осевого направления.

При увеличении окисного слоя толщина металлической фазы уменьшается, и металл заново объединяется с окисной фазой. Механические характеристики, такие как модуль Юнга, коэффициент термического расширения, скорость ползучести и скорость роста под действием облучения различаются для металлической фазы и окисной пленки, что вызывает внутреннее напряжение внутри оболочки, главным образом в аксиальном направлении, и влияет на механическое поведение всей оболочки.

Поскольку для ZrO_2 не было получено никаких экспериментальных данных по скорости ползучести и скорости роста под действием облучения, в расчете ползучестью в окисном слое пренебрегается, а скорость роста под действием облучения для окиси задается равной той же величине для циркония, умноженной на некоторый коэффициент (по умолчанию равный единице) [8].

Как показано на рис. 2.10, каждый узел имеет одну степень свободы. Принимая допущение, что аксиальные смещения всех узлов равны, степень свободы одного элемента используется как типичное значение для степеней свободы таблетки ($z_1^{\text{H}} \dots z_{10}^{\text{H}}, z_1^{\text{B}} \dots z_{10}^{\text{B}}$) и оболочки ($z_{11}^{\text{H}} \dots z_{14}^{\text{H}}, z_{11}^{\text{B}} \dots z_{14}^{\text{B}}$) в аксиальном направлении.

Таким образом, справедливо

$$\begin{aligned} z_1^{\text{H}} &= z_2^{\text{H}} = \dots = z_{10}^{\text{H}} & (= z_{\text{таб}}^{\text{H}}), \\ z_1^{\text{B}} &= z_2^{\text{B}} = \dots = z_{10}^{\text{B}} & (= z_{\text{таб}}^{\text{B}}), \\ z_{11}^{\text{H}} &= z_{12}^{\text{H}} = z_{13}^{\text{H}} = z_{14}^{\text{H}} & (= z_{\text{об}}^{\text{H}}), \\ z_{11}^{\text{B}} &= z_{12}^{\text{B}} = z_{13}^{\text{B}} = z_{14}^{\text{B}} & (= z_{\text{об}}^{\text{B}}). \end{aligned} \tag{2.46}$$

Это допущение применяется для анализа напряжений/деформаций по всей длине твэла.

Согласно МКЭ находятся матрицы [8]:

- матрица деформация-перемещение $[\mathbf{B}]$;
- матрица напряжение-деформация $[\mathbf{C}]$, представляющая жесткость элемента путем определения взаимосвязи между векторами приращений упругой деформации $\{\Delta\varepsilon^{yp}\}$ и напряжения $\{\Delta\sigma\}$, учитывая модуль Юнга и коэффициент Пуассона.

На основе принципа виртуальных перемещений задается уравнение равновесия, что позволяет рассчитать вектор приращений перемещений узлов $\{\Delta u_{n+1}\}$ путем интегрирования и использования неявных решений для уравнений ползучести и пластичности. Тогда общая деформация связывается с узловым перемещением посредством соотношения

$$\{\Delta\varepsilon_{n+1}\} = [\mathbf{B}]\{\Delta u_{n+1}\}, \quad (2.47)$$

где $\{\Delta u_{n+1}\}$ – вектор приращений узловых перемещений.

Обозначая радиальное перемещение как u и аксиальное перемещение как v , перемещение (u, v) в произвольной точке внутри i -го элемента, показанного на рис. 2.10, записывается как

$$u = \frac{r_{i+1} - r}{r_{i+1} - r_i} u_i + \frac{r - r_i}{r_{i+1} - r_i} u_{i+1}, \quad (2.48)$$

$$v = \frac{z - z_i^H}{z_i^B - z_i^H} (v_i^B - v_i^H). \quad (2.49)$$

Вектор деформаций $\{\varepsilon\}$ любого элемента в осесимметричной задаче задается как

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial u / \partial r \\ u / r \\ \partial v / \partial z \end{Bmatrix} \equiv [\mathbf{B}]\{u\}, \quad (2.50)$$

где $[\mathbf{B}]$ – матрица деформация-перемещение;

$\{u\}$ – вектор перемещений элемента.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial r} &= -\frac{1}{r_{i+1} - r_i} u_i + \frac{1}{r_{i+1} - r_i} u_{i+1}, \\ \frac{u}{r} &= \frac{r_{i+1} - r}{r(r_{i+1} - r_i)} u_i + \frac{r - r_i}{r(r_{i+1} - r_i)} u_{i+1}. \end{aligned} \quad (2.51)$$

Задавая радиальную координату центральной точки i -го элемента как

$$r = \frac{r_i + r_{i+1}}{2}, \text{ из выражений (2.48) и (2.49) следует}$$

$$\frac{u}{r} = \frac{r_{i+1} - \frac{r_i + r_{i+1}}{2}}{\frac{r_i + r_{i+1}}{2}(r_{i+1} - r_i)} u_i + \frac{\frac{r_i + r_{i+1}}{2} - r_i}{\frac{r_i + r_{i+1}}{2}(r_{i+1} - r_i)} u_{i+1} = \frac{1}{r_i + r_{i+1}} u_i + \frac{1}{r_i + r_{i+1}} u_{i+1}, \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{v_i^B - v_i^H}{z_i^B - z_i^H}. \quad (2.53)$$

После подстановки (2.51)–(2.53) в (2.50) получаются компоненты матрицы деформация-перемещение $[\mathbf{B}]$:

$$[\mathbf{B}] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{r_{i+1} - r_i} & \frac{1}{r_{i+1} - r_i} & 0 & 0 \\ \frac{1}{r_{i+1} + r_i} & \frac{1}{r_{i+1} + r_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{z_i^B - z_i^H} & \frac{1}{z_i^B - z_i^H} \end{bmatrix}. \quad (2.54)$$

Объем i -го элемента V_i задавался как

$$V_i = \pi (r_{i+1}^2 - r_i^2) (z_i^B - z_i^H). \quad (2.55)$$

Взаимосвязь между векторами приращений упругой деформации $\{\Delta \varepsilon^{ynp}\}$ и напряжения $\{\Delta \sigma\}$ выражается следующим образом:

$$\{\Delta \sigma\} = [\mathbf{D}] \{\Delta \varepsilon^{ynp}\}, \quad (2.56)$$

где $[\mathbf{D}]$ – матрица напряжение-деформация, представляющая жесткость эле-

мента.

Чтобы найти компоненты матрицы напряжение-деформация $[\mathbf{C}]$, матрица $[\mathbf{C}]$ вводится как обратная $[\mathbf{D}]$, и из выражение (2.56) следует

$$\{\Delta\varepsilon^{ynp}\} = [\mathbf{C}]\{\Delta\sigma\}, \quad (2.57)$$

где элементы матрицы $[\mathbf{C}]$ записываются как

$$[\mathbf{C}] = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.58)$$

где E , ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона, соответственно.

При решении основных уравнений, описывающих напряжения-деформации, внешняя сила и вектор приращений начальной деформации задаются соответственно как $\{F\}$ и $\{\Delta\varepsilon^0\}$.

Если до n -го временного шага расчет уже выполнен и выполняется расчет для следующего, $(n+1)$ -го временного шага, то на основе принципа виртуальных перемещений задается уравнение равновесия:

$$\{F_{n+1}\} = \int_V [\mathbf{B}]^T \{\sigma_{n+1}\} dV, \quad (2.59)$$

где $\{F_{n+1}\}$, $\{\sigma_{n+1}\}$ – векторы соответственно внешней силы и напряжений на $(n+1)$ -м временном шаге.

Используется зависимость между приращениями упругой деформации $\{\Delta\varepsilon_{n+1}^{ynp}\}$, общей деформации $\{\Delta\varepsilon_{n+1}\}$ и известным начальным приращением деформации $\{\Delta\varepsilon_{n+1}^0\}$:

$$\{\Delta\varepsilon_{n+1}^{ynp}\} = \{\Delta\varepsilon_{n+1}\} - \{\Delta\varepsilon_{n+1}^0\}. \quad (2.60)$$

С учетом (2.60), вектор приращений перемещений $\{\Delta u_{n+1}\}$ рассчитывался путем интегрирования выражения (2.59).

Методика модификации базовых уравнений изложенного метода расчета при использовании неявных решений для уравнений ползучести и пластичности подробно описана в монографии [8].

2.7.8. Замыкающие соотношения математической модели расчета распределения температуры, напряжений и деформаций в твэле

В качестве замыкающих соотношений математической модели расчета распределения температуры, напряжений и деформаций в твэле использованы соотношения следующих моделей [8, 26–28, 81–84]:

1) Модель механического взаимодействия между таблеткой и оболочкой.

Согласно модифицированной модели Росса и Стаута, описываемой в предыдущем подразделе, в случае плотного контакта топлива и оболочки (когда имеется четко выраженная область контакта при МВТО), первое слагаемое в правой части (2.31) $k_{газ}$, учитывающее теплопередачу газовой фазы, вносит такой же численный вклад в значение коэффициента теплопередачи зазора, как и при состоянии открытого зазора, что противостоит естественному. Поэтому для режима плотного контакта таблетки и оболочки выражение (2.31) преобразовано следующим образом:

$$k_{газ} = (1 - F)k_{газ} + 10 \cdot F \cdot k_{кон} + k_{изл}, \quad (2.61)$$

где $F = \frac{P_{кон}^3}{P_{кон,0}^3 + P_{кон}^3}$;

$P_{кон}$ – контактное давление между таблеткой и оболочкой, Па;

$P_{кон,0}$ – стандартное контактное давление, Па (≈ 3 МПа);

2) Модель миграции трещин в топливной таблетке.

Форма трещин в таблетке меняется с выгоранием. Это изменение формы трещин моделируется следующим образом. Сначала возникающие трещины развиваются в радиальных направлениях, при этом пустой объем в таблетке, образовавшийся за счет растрескивания и релокации топлива, находится около центра таблетки. По мере увеличения выгорания эти радиальные трещины постепенно становятся все более ориентированными в тангенциальном направлении (происходит миграция трещин), и в результате формируются

трещины, ориентированные только в тангенциальном направлении.

При реализации моделирования миграции трещин используются допущения относительно закона изменения объема пустот трещин таблетки, а также глубины выгорания, при которой начинается миграция трещин [8].

Допущения моделирования миграции трещин:

1. Миграция трещин начинается в точке 1 ($B_1; V_1$), при определенных глубине выгорания B_1 и объеме пустот трещин V_1 , и заканчивается в точке 2 ($B_2; V_2$), при других определенных глубине выгорания B_2 и объеме пустот трещин V_2 .

2. В течение процесса миграции объем пустот трещин V таблетки изменяется от V_1 до V_2 по линейному закону в зависимости от глубины выгорания B .

3. В процессе контакта таблетки и оболочки уменьшение объема таблетки при воздействии на нее контактного давления происходит только за счет уменьшения объема тангенциально ориентированных трещин, тогда как на объем радиальных трещин, расположенных около центра таблетки, контактное давление не влияет.

4. При $B < B_1$, т.е. в области выгорания до начала миграции трещин, не предполагается фактического изменения в жесткости таблетки за счет ее растрескивания и используется неизменное значение модуля Юнга таблетки.

5. В области выгорания $B > B_1$, т.е. в области выгорания после начала миграции трещин, учитывается фактическое изменение в жесткости таблетки из-за ее растрескивания, которое считается пропорциональным увеличению объема тангенциально ориентированных трещин, и используется модель переменного модуля Юнга таблетки.

6. Когда выгорание B достигает уровня B_2 , при котором миграция трещин завершается, изменение жесткости таблетки из-за ее растрескивания становится незначительным.

7. Уровни выгорания B_1 и B_2 , при которых начинается и заканчивается миграция трещин, задавались $B_1 = 5$ Мвт·сут/кг-У и $B_2 = 20$ Мвт·сут/кг-У.

3) Модель восстановления жесткости треснувшей таблетки.

Развитие трещин в таблетке описывалось с помощью модели восстановления жесткости, в которой модуль Юнга треснувшей таблетки в радиальном направлении $E_{таб}$ представляется в виде линейной функции от упругой радиальной деформации таблетки $\varepsilon_{таб}$.

Модуль Юнга треснувшей таблетки в радиальном направлении определялся как

$$E_{таб} = \begin{cases} 0 & (\varepsilon_{таб} \geq 0), \\ -\frac{E}{\varepsilon_R} \varepsilon_{таб} & (-\varepsilon_R < \varepsilon_{таб} < 0), \\ E & (\varepsilon_{таб} \leq -\varepsilon_R), \end{cases} \quad (2.62)$$

где $E_{таб}$, E – соответственно истинный и исходный модуль Юнга таблетки, Па;

$\varepsilon_{таб}$ – радиальная упругая деформация сжатия таблетки ($\varepsilon_{таб} < 0$), вызываемая сжимающим таблетку контактным давлением $P_{кон}$, действующим со стороны оболочки;

ε_R – модуль радиальной деформации таблетки ($\varepsilon_R > 0$), при которой жесткость таблетки полностью восстановлена.

Для радиальной упругой деформации сжатия таблетки $\varepsilon_{таб}$ справедливо:

$$\varepsilon_{таб} = -\frac{\delta_{таб}}{r_{таб,н,0}}, \quad (2.63)$$

где $\delta_{таб}$ – радиальный сдвиг таблетки, вызванный сдавливанием таблетки со стороны оболочки в радиальном направлении, м;

$r_{таб,н,0}$ – начальный внешний радиус таблетки, м.

Как следует из (2.62), величина радиальной упругой деформации сжатия таблетки $\varepsilon_{таб}$ влияет на определение модуля Юнга треснувшей таблетки в радиальном направлении $E_{таб}$ только внутри диапазона $-\varepsilon_R < \varepsilon_{таб} < 0$.

Следовательно, используя известную зависимость

$$\frac{d\sigma_{ma\bar{b}}}{d\varepsilon_{ma\bar{b}}} = E_{ma\bar{b}}. \quad (2.64)$$

справедливо

$$\sigma_{ma\bar{b}} = -\frac{E}{\varepsilon_R} \cdot \frac{\varepsilon_{ma\bar{b}}^2}{2} (-\varepsilon_R < \varepsilon_{ma\bar{b}} < 0). \quad (2.65)$$

Решая (2.65) для $\varepsilon_{ma\bar{b}} < 0$, получается

$$\varepsilon_{ma\bar{b}} = -\sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_R (-\sigma_{ma\bar{b}})}{E}}. \quad (2.66)$$

Подставляя (2.66) в (2.62), для диапазона $-\varepsilon_R < \varepsilon_{ma\bar{b}} < 0$ имеем:

$$E_{ma\bar{b}} = \sqrt{\frac{2 \cdot E (-\sigma_{ma\bar{b}})}{\varepsilon_R}}. \quad (2.67)$$

Используя (2.65), в случае $\varepsilon_{ma\bar{b}} = -\varepsilon_R$ получается зависимость для сжимающего напряжения σ_R в момент, когда жесткость таблетки полностью восстановлена:

$$\sigma_R = -\frac{E \cdot \varepsilon_R}{2}. \quad (2.68)$$

После подстановки (2.68) в (2.62) находится модуль радиальной деформации таблетки ε_R , при которой жесткость таблетки полностью восстановлена [8]:

$$\varepsilon_R = 2 \cdot \varepsilon_{man}, \quad (2.69)$$

где ε_{man} – модуль потерянной из-за тангенциально ориентированных трещин части деформации.

Истинный модуль Юнга треснувшей таблетки $E_{ma\bar{b}}$ выражается в результате подстановки (2.63) и (2.69) в (2.62) как

$$E_{ma\bar{b}} = \frac{E}{2 \cdot \varepsilon_{man}} \cdot \frac{\delta_{ma\bar{b}}}{r_{ma\bar{b},n,0}} \quad (\varepsilon_{ma\bar{b}} > -\varepsilon_R, \text{ т.е. } \delta_{ma\bar{b}} < 2 \cdot r_{ma\bar{b},n,0} \cdot \varepsilon_{man}), \quad (2.70)$$

$$E_{ma\bar{b}} = E \quad (\varepsilon_{ma\bar{b}} \leq -\varepsilon_R, \text{ т.е. } \delta_{ma\bar{b}} \geq 2 \cdot r_{ma\bar{b},n,0} \cdot \varepsilon_{man}).$$

4) Модель контактной силы.

При допущении справедливости модели восстановления жесткости, контактное давление $P_{кон}$, действующее между таблеткой и оболочкой, определяется пропорционально увеличению ширины воображаемого перекрытия радиальных сдвигов таблетки и оболочки $\delta_{кон}$ [8].

Принимается допущение, что после того, как начинается текучесть оболочки, контактное давление $P_{кон}$ не превышает того значения, которое было достигнуто в момент начала текучести [29].

Контактное давление $P_{кон}$, т.е. сила, с которой оболочка толкает таблетку, может быть определено, зная модуль Юнга, толщину и внутренний радиус оболочки, при условии известности величины радиального сдвига оболочки, находящейся в контакте с таблеткой. Ширина радиального зазора между таблеткой и оболочкой δ выражается как

$$\delta = \delta_o + u_{об} - u_{таб}, \quad (2.71)$$

где δ_o – начальная ширина радиального зазора, м;

$u_{об}$, $u_{таб}$ – соответственно радиальный сдвиг оболочки и таблетки, м.

Когда расчетная ширина радиального зазора имеет отрицательное значение $\delta < 0$ в начале какого-либо временного шага, делается вывод, что таблетка находится в контакте с оболочкой и рассчитывается контактное давление $P_{кон}$. На этом временном шаге таблетка и оболочка имеют воображаемую зону взаимного перекрытия шириной

$$\delta_{кон} = -\delta = -(\delta_o + u_{об} - u_{таб}) > 0. \quad (2.72)$$

Таким образом, величина воображаемого перекрытия радиальных сдвигов таблетки и оболочки $\delta_{кон}$ известна в начале этого временного шага. Предполагается, что когда величина воображаемого перекрытия $\delta_{кон}$ положительна, оболочка толкает таблетку (и наоборот, таблетка толкает оболочку) до тех пор, пока $\delta_{кон}$ не станет равной нулю. Задавая обратный сдвиг таблетки, вы-

званный давлением оболочки внутрь, как $\delta_{таб}$, а сдвиг оболочки, вызванный давлением таблетки наружу, как $\delta_{об}$, справедливо:

$$\delta_{кон} = \delta_{таб} + \delta_{об} . \quad (2.73)$$

В случае, когда $\varepsilon_r = \varepsilon_\theta$, радиальная деформация ε_r определяется как

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \delta_{таб} / r_{об,вн} ,$$

где $r_{об,вн}$ – внутренний радиус оболочки, м.

Тогда контактное давление $P_{кон}$ со стороны таблетки определяется как

$$P_{кон} = \sigma_r = E_{таб} \cdot \varepsilon_r = E_{таб} \left(\frac{\delta_{таб}}{r_{об,вн}} \right) , \quad (2.74)$$

где $E_{таб}$ – истинный модуль Юнга таблетки, Па;

$\delta_{таб}$ – радиальный сдвиг таблетки, вызванный давлением оболочки внутрь, м.

Очевидно, что при контакте таблетки с оболочкой справедливо

$$r_{об,вн} = r_{таб,н} ,$$

где $r_{таб,н}$ – наружный радиус таблетки, м.

Со стороны оболочки справедливо

$$\varepsilon_\theta = \delta_{об} / r_{об,вн} ,$$

где $\delta_{об}$ – радиальный сдвиг оболочки, вызванный давлением таблетки наружу, м.

Обозначая модуль Юнга оболочки как $E_{об}$, для тангенциального напряжения σ_θ справедливо:

$$\sigma_\theta = E_{об} \cdot \varepsilon_\theta = E_{об} \frac{\delta_{об}}{r_{об,вн}} . \quad (2.75)$$

С учетом (2.75), $P_{кон}$ определяется как

$$P_{кон} = \sigma_r = \sigma_\theta \frac{t}{r_{об,вн}} = E_{об} \frac{\delta_{об}}{r_{об,вн}} \cdot \frac{t}{r_{об,вн}} , \quad (2.76)$$

где t , $r_{об,вн}$ – соответственно толщина и внутренний радиус оболочки, м.

Из (2.76) следует с учетом $t = r_{об,н} - r_{об,вн}$:

$$P_{кон} = E_{об} \frac{\delta_{об}(r_{об,н} - r_{об,вн})}{r_{об,вн}^2}, \quad (2.77)$$

где $r_{об,н}$ – наружный радиус оболочки, м.

Для радиального сдвига оболочки $\delta_{об}$ справедливо [8]:

$$\delta_{об} = \begin{cases} \frac{E_{таб} \cdot r_{об,вн} \cdot (\delta_{кон} - \delta_{таб} / 2)}{E_{об}(r_{об,н} - r_{об,вн}) + E_{таб} \cdot r_{об,вн}}, & (0 \leq \delta_{кон} < 2 \cdot \delta_{тан} + \frac{E \cdot r_{об,вн} \cdot \delta_{тан}}{E_{об}(r_{об,н} - r_{об,вн})}), \\ \frac{E \cdot r_{об,вн} \cdot (\delta_{кон} - \delta_{тан})}{E_{об}(r_{об,н} - r_{об,вн}) + E \cdot r_{об,вн}}, & (\delta_{кон} \geq 2 \cdot \delta_{тан} + \frac{E \cdot r_{об,вн} \cdot \delta_{тан}}{E_{об}(r_{об,н} - r_{об,вн})}), \end{cases} \quad (2.78)$$

где $\delta_{таб} = f(\delta_{тан}, \delta_{кон}, E_{об}, E, t, r_{об,вн})$ [8].

Таким образом, контактное давление $P_{кон}$ находится подстановкой в (2.77) радиального сдвига оболочки $\delta_{об}$, определяемого по (2.78).

5) Модель генерации и испускания газообразных продуктов деления в таблетке.

При расчете генерации и испускания газообразных ПД для топливного стержня (набора таблеток), стержень делится на 12 аксиальных сегментов, каждый аксиальный сегмент делится в радиальном направлении на 10 концентрических зон (кольцевых элементов).

Принимаются допущения относительно механизма генерации, испускания [29] и закона диффузии атомов газа [30], а также закона роста зерна топливной таблетки [31–34].

Скорость генерации газообразных ПД P_{ij} в j -м аксиальном сегменте и i -й радиальной зоне представляется с учетом: выхода газообразных ПД; энергии, генерируемой при одном делении ядра урана (≈ 200 МэВ); средней плотности энерговыделения j -го аксиального сегмента; профиля плотности энерговыделения в радиальном направлении [8].

Скорость генерации газообразных ПД P_{ij} на единичной длине в ij -й зоне (моль/см·с) находится как

$$P_{ij} = \frac{Y \cdot f_{ij} \cdot q_j}{E_f \cdot N_A}, \quad (2.79)$$

где Y – выход газообразных ПД ($Y = 0,3$);

E_f – энергия, генерируемая при одном делении ядра урана ($E_f \approx 200$ МэВ);

N_A – число Авогадро ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹);

q_j – средняя плотность энерговыделения j -го аксиального сегмента,

$$q_j = \frac{q_{l,j}}{\pi(1-h^2)}, \text{ Вт/см};$$

$q_{l,j}$ – линейная тепловая мощность j -го аксиального сегмента, Вт/см;

h – нормированный (безразмерный) радиус центрального отверстия таблетки;

$$f_{ij} = 2 \cdot \pi \int_{i-0,5}^{i+0,5} \Phi(r) \cdot r \cdot dr, \quad \Phi(r) \text{ – безразмерная функция профиля плотности}$$

энерговыделения в радиальном направлении.

б) Модель ограничителя термических напряжений в таблетке.

В этой модели оценивается ослабление термического напряжения в таблетке ползучестью за счет наружного давления P_n , приложенного к газовым пузырькам, расположенным на границе зерна.

Термическое напряжение в таблетке находится используя рестрикционное уравнение Ламе [8]. Распределение температуры внутри таблетки задается следующим образом:

$$T - T_{нов} = (T_{ц} - T_{нов}) \cdot \{1 - (r/R)^2\}, \quad (2.80)$$

где T – температура в точке таблетки, описываемой радиальной координатой r ;

$T_{нов}, T_{ц}$ – температура соответственно поверхности и центра таблетки;

R – внешний радиус таблетки.

Пусть контактное давление между таблеткой и оболочкой, полученное в термическом анализе, обозначается как $P_{кон}$, а аксиальное давление в таблетке $P_{таб}$ равно контактному давлению ($P_{таб} = P_{кон}$). Тогда внутреннее термическое напряжение в таблетке выражается как

$$\sigma_r = \frac{E}{4(1-\nu)} a(T_{ц} - T_{нов}) \left\{ \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right\} - P_{кон}, \quad (2.81)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{4(1-\nu)} a(T_{ц} - T_{нов}) \left\{ 3 \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 2 \right\} - P_{кон}, \quad (2.82)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{4(1-\nu)} a(T_{ц} - T_{нов}) \left\{ 4 \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right\} - P_{кон}, \quad (2.83)$$

где $\sigma_r, \sigma_{\theta}, \sigma_z$ – напряжение в направлении r, θ и z , соответственно, Па;

E – модуль Юнга таблетки, Па;

ν – коэффициент Пуассона таблетки;

a – коэффициент термического расширения таблетки, K^{-1} .

Напряжения $\sigma_{r,n+1}$, $\sigma_{\theta,n+1}$ и $\sigma_{z,n+1}$ на $n+1$ -м временном шаге рассчитываются на основе напряжений $\sigma_{r,n}$, $\sigma_{\theta,n}$ и $\sigma_{z,n}$, полученных на n -м временном шаге.

Напряжения на 0-м временном шаге (т.е. в состоянии нагруженного резерва) $\sigma_{r,0}$, $\sigma_{\theta,0}$ и $\sigma_{z,0}$ полагаются равными давлению газа в КО твэла. Используя выражения (2.81)–(2.83), записываются приращения термических напряжений $\Delta\sigma_{r,n+1}^{терм}$, $\Delta\sigma_{\theta,n+1}^{терм}$, $\Delta\sigma_{z,n+1}^{терм}$ между временными шагами [8].

Нулевое приближение для расчета напряжений на $n+1$ -м временном шаге имеет вид

$$\sigma_{r,n+1}^0 = \sigma_{r,n} + \Delta\sigma_{r,n+1}^{терм}, \quad (2.84)$$

$$\sigma_{\theta,n+1}^0 = \sigma_{\theta,n} + \Delta\sigma_{\theta,n+1}^{терм}, \quad (2.85)$$

$$\sigma_{z,n+1}^0 = \sigma_{z,n} + \Delta\sigma_{z,n+1}^{терм}. \quad (2.86)$$

Нулевое приближение среднего напряжения $\bar{\sigma}_{n+1}^0$ выглядит как

$$\bar{\sigma}_{n+1}^0 = \frac{1}{3}(\sigma_{r,n+1}^0 + \sigma_{\theta,n+1}^0 + \sigma_{z,n+1}^0). \quad (2.87)$$

Когда $\bar{\sigma}_{n+1}^0$ меньше давления газа $P_{газ}$ в КО твэла, принимается:

$$\bar{\sigma}_{n+1}^0 = P_{газ,n+1}. \quad (2.88)$$

Когда $\bar{\sigma}_{n+1}^0$ больше предела текучести $\sigma_{0,2}$:

$$\bar{\sigma}_{n+1}^0 = \sigma_{0,2,n+1}. \quad (2.89)$$

Приблизительный расчет ослабления термического напряжения в таблетке ползучестью выполняется, задавая эквивалентное напряжение $\sigma_{экв}$ как

$$\sigma_{экв} = |\bar{\sigma}_{n+1}^0|.$$

Изменение эквивалентной деформации ползучести топливной таблетки $\Delta\bar{\epsilon}^{полз}$ полагается пропорциональным скорости ползучести, определяемой функцией ползучести f :

$$\Delta\bar{\epsilon}_{n+1}^{полз} = f(T, \sigma_{экв}, G, f_{пл}, \dot{F}) \cdot \eta \cdot \Delta t, \quad (2.90)$$

где T – температура топлива, К;

$\sigma_{экв}$ – эквивалентное напряжение, psi;

G – диаметр зерна, мк;

$f_{пл}$ – относительная плотность топлива, равная отношению действительной плотности топлива к теоретической, %;

\dot{F} – интенсивность делений ядер урана, $1/\text{м}^3 \cdot \text{с}$;

Δt – ширина временного шага, ч;

η – эмпирически полученный корректирующий параметр ($\eta=10^{-4}$).

Первое приближение среднего напряжения $\bar{\sigma}_{n+1}^1$ находится после подста-

новки полученного таким образом $\Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^{нолз}$ в выражение

$$\bar{\sigma}_{n+1}^1 = \bar{\sigma}_{n+1}^0 + E \cdot \Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^{нолз}, \quad (2.91)$$

где E – модуль Юнга таблетки.

Далее выполняется итерационный расчет $\bar{\sigma}_{n+1}$ по методу Ньютона-Рафсона в предположении, что $-\sigma_{0,2,n+1} \leq \bar{\sigma}_{n+1} \leq -P_{газ,n+1}$ [8].

7) Модель испускания газообразных продуктов деления из периферийной зоны таблетки.

Модель определяет дополнительное атермическое испускание газообразных ПД из-за формирования периферийной зоны в таблетке. Атермическое испускание зависит от выгорания и не зависит от термически активированной диффузии.

Доля дополнительного атермического испускания газообразных ПД из периферийной области определяется с помощью модели Баттеля [35] или модели Каннингхэма [36].

1. Модель Баттеля.

В модели, предложенной в экспериментальной программе Баттеля для описания эффектов в области глубокого выгорания, состав газообразных ПД представляется только ксеноном и доля атермически испущенного из периферийной области газа $F_{пер}$ находится как

$$F_{пер} = 0,00625(B - 62,2), \quad (2.92)$$

где B – локальное выгорание в периферийной области таблетки, $B > 62,2$ МВт·сут/кг-U.

Развитие периферийной области с выгоранием представляется функцией от выгорания как

$$W = 2,19(B - 48,8), \quad (2.93)$$

где W – толщина периферийной области, мк.

Выражение (2.93) показывает, что даже при выгорании 150 МВт·сут/кг-U

толщина периферийной области не превышает 220 мк, и при расчете периферийная область может считаться заключенной внутри самой внешней кольцевой зоны таблетки.

Используя (2.92) и (2.93), отношение $R_{пер}$ количества ксенона, атермически испускаемого из периферийной области, к количеству ксенона, генерируемого в самой внешней кольцевой зоне, задается следующим образом:

$$R_{пер} = V_{пер} \cdot F_{пер}, \quad (2.94)$$

где $F_{пер}$ – доля атермически испущенного из периферийной области газа;

$$V_{пер} = \pi\{r_n^2 - (r_n - W)^2\} / \pi(r_n^2 - r_{вн}^2), \quad (2.95)$$

где $r_{вн}$, r_n – соответственно внутренний радиус самой внешней кольцевой зоны и наружный радиус таблетки, мк;

W – толщина периферической области, мк.

Полагая, что атермическое испускание газообразных ПД происходит из пузырей на границе зерен в самой внешней кольцевой зоне, концентрация атомов газообразных ПД $N_{зп}^{n+1}$ на границе зерен на временном шаге роста зерна $n+1$ задается в виде функции от [8]:

– числа атомов газообразных ПД, генерированных в зернах с радиусом a_{n+1} до моментов времени t^{n+1} и t^n ;

– скорости испускания газообразных ПД из-за формирования периферийной области до моментов времени t^{n+1} и t^n .

2. Модель Каннингхэма.

В модели Каннингхэма состав газообразных ПД представлен также только ксеноном, и количество дополнительного испускания рассчитывается по следующему выражению:

$$R_{пер} = F_{пер} \cdot P_{пер}, \quad (2.96)$$

где $R_{пер}$ – отношение числа атомов газообразных ПД, испущенных из периферийной области, к числу атомов газообразных ПД, генерированных во всей

таблетке;

$F_{пер}$ – отношение площадей поперечного сечения периферийной области и таблетки, умноженное на число газообразных ПД, испущенных из периферийной области, отнесенное к числу газообразных ПД, генерированных в периферийной области;

$P_{пер}$ – отношение среднего выгорания в периферийной области к среднему выгоранию в таблетке ($P_{пер} = 1,3$).

Для $F_{пер}$ справедливо следующее выражение:

$$F_{пер} = 7,90 \cdot 10^{-3} - 6,98 \cdot 10^{-4} \cdot B + 8,34 \cdot 10^{-6} \cdot B^2, \quad (2.97)$$

где B – локальное выгорание в периферийной области ($B > 65$ МВт·сут/кг-U).

8) Модель диффузии и течения газа в зазоре между таблеткой и оболочкой.

Принимаются допущения относительно:

- мгновенного перемешивания гелия и азота (или аргон), а также ксенона и криптона;
- встречной диффузии гелия и ксенона при их прохождении через радиальный зазор [37];
- мгновенного уравнивания давления в различных частях объема внутри твэла.

При расчете давления принимаются допущения:

- газ в твэле ведет себя как идеальный газ;
- давление в твэле распределено равномерно.

Учитывается различие в температуре отдельных частей пустого пространства внутри твэла путем различения КО в твэле, объема радиального зазора, объема центрального отверстия таблетки и объема свободного газа внутри сборки топливных таблеток [8].

Вводятся следующие обозначения:

N – число молей газа, моль;

n – молярная плотность, моль/м³;

D^{12} – константа встречной диффузии ($D^{12} = D^{21}$), м²/с;

T – температура, К;

V – объем, м³;

P – давление, Па;

C – молярная доля ($C_1 = n_1 / (n_1 + n_2)$).

Индексы имеют следующее значение:

i – тип газа (1 – ксенон; 2 – гелий);

j – номер аксиального сегмента ($j = 0, 1, 2, \dots, N, N + 1$), где номерами 0 и $N + 1$ обозначены нижний и верхний КО твэла, соответственно.

$n_{i,j}$, n_j – молярная плотность в j -м аксиальном сегменте i -го газа и всех газов, соответственно, моль/м³.

Общее количество i -го газа в j -м аксиальном сегменте определяется как

$$N_{i,j} = n_{i,j} \cdot V_j = C_{i,j} \cdot n_j \cdot V_j = \frac{P}{R} \cdot C_{i,j} \cdot \frac{V_j}{T_j}, \quad (2.98)$$

где j -й аксиальный сегмент имеет площадь поперечного сечения канала S_j и длину $2 \cdot l_j$.

Обозначая границу сегментов j и $j + 1$ посредством знака “*”, количество газа 1-го типа (Xe) $G_1(j \rightarrow j + 1)$, текущего от сегмента j через границу, определяется на основе закона Фика как

$$G_1(j \rightarrow *) = S_j \cdot D_j^{12} \frac{n_{1,j} - n_{1,*}}{l_j}. \quad (2.99)$$

Аналогично, количество газа 1-го типа, текущего через границу в сегмент $j + 1$, представляется как

$$G_1(* \rightarrow j + 1) = S_{j+1} \cdot D_{j+1}^{12} \frac{n_{1,*} - n_{1,j+1}}{l_{j+1}}. \quad (2.100)$$

Из условия неразрывности справедливо:

$$G_1(j \rightarrow *) = G_1(* \rightarrow j+1),$$

откуда следует:

$$S_j \cdot D_j^{12} \frac{n_{1,j} - n_{1,*}}{l_j} = S_{j+1} \cdot D_{j+1}^{12} \frac{n_{1,*} - n_{1,j+1}}{l_{j+1}}. \quad (2.101)$$

Решая (2.101) относительно $n_{1,*}$, получается:

$$n_{1,*} = \frac{S_j \cdot D_j^{12} \cdot l_{j+1} \cdot n_{1,j} + S_{j+1} \cdot D_{j+1}^{12} \cdot l_j \cdot n_{1,j+1}}{S_{j+1} \cdot D_{j+1}^{12} \cdot l_j + S_j \cdot D_j^{12} \cdot l_{j+1}}. \quad (2.102)$$

Используя (2.99), получается следующее соотношение:

$$\begin{aligned} G_1(j \rightarrow j+1) &= G_1(j \rightarrow *) = \\ &= \frac{S_j \cdot D_j^{12} \cdot S_{j+1} \cdot D_{j+1}^{12}}{S_{j+1} \cdot D_{j+1}^{12} \cdot l_j + S_j \cdot D_j^{12} \cdot l_{j+1}} (n_{1,j} - n_{1,j+1}). \end{aligned} \quad (2.103)$$

Задавая

$$F_{j,j+1} = \frac{S_j \cdot D_j^{12} \cdot S_{j+1} \cdot D_{j+1}^{12}}{S_{j+1} \cdot D_{j+1}^{12} \cdot l_j - S_j \cdot D_j^{12} \cdot l_{j+1}}, \quad (2.104)$$

выражение (2.103) переписывается как

$$G_1(j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1} (n_{1,j} - n_{1,j+1}). \quad (2.105)$$

Для газа 2-го типа (He) аналогичным образом справедливо:

$$G_2(j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1} (n_{2,j} - n_{2,j+1}). \quad (2.106)$$

Складывая выражения (2.105) и (2.106), общее количество приточного смешанного газа находится как

$$G(j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1} (n_j - n_{j+1}), \quad (2.107)$$

где $n_j = n_{1,j} + n_{2,j}$, $n_{j+1} = n_{1,j+1} + n_{2,j+1}$.

Поскольку в общем случае температура в зазоре для сегментов j и $j+1$ различная, в состоянии равновесия справедливо:

$$n_j \neq n_{j+1}. \quad (2.108)$$

В соответствии с (2.107), даже если сегменты j и $j+1$ находятся в состоянии равновесия, в численном расчете присутствует воображаемый поток из

Константа встречной диффузии.

В качестве константы встречной диффузии газа принимается константа Презента [37]:

$$D^{12} = \frac{3}{8} \left(\frac{\pi \cdot k \cdot T}{2 \cdot m^*} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{n \cdot \pi \cdot d_{12}^2}, \quad (2.112)$$

где $m^* = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}$, m_i – масса молекулы i -го типа, кг;

$d_{12} = 0,5(d_1 + d_2)$, d_i – диаметр молекулы i -го типа, м;

$n = n_1 + n_2$ – молярная плотность, моль/м³;

k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

T – температура, К.

Корректировка давления.

Общее число молей газа N_j для j -го аксиального сегмента в конце временного шага описывается следующим соотношением:

$$N_j = \sum_i N_{ij}, \quad (2.113)$$

где i – тип газа.

Для всего объема внутреннего пространства твэла число молей газа задается соотношением:

$$N = \sum_j N_j. \quad (2.114)$$

На основании закона идеального газа справедливо:

$$P = \frac{N \cdot R}{\sum_j \left(\frac{V}{T} \right)_j}. \quad (2.115)$$

Из (2.115) следует, что общее число молей газа N'_j в сегменте j после расчета корректировки давления задается следующим выражением:

$$N'_j = \frac{P}{R} \left(\frac{V}{T} \right)_j. \quad (2.116)$$

Расхождение между N_j и N'_j корректируется путем уравнивания входного и выходного потоков между верхним и нижним соседними сегментами, начиная от самой нижней части сборки таблеток [8].

Число молей газа из сегмента i в сегменте j после переноса дается посредством выражения

$$N'_{ij} = f_{ij} \left\{ N_j - \sum_k N_{j \rightarrow k} \right\} + \sum_l f_{il} \cdot N_{l \rightarrow j}, \quad (2.117)$$

где $N_{i \rightarrow j}$ – число молей смешанного газа, переносимого от сегмента i к сегменту j ;

f_{ij} – доля сегмента i в сегменте j до переноса.

Расчет компенсационного объема в твэле.

Поскольку необходимо учитывать различие в температуре отдельных частей пустого пространства внутри твэла, при расчете давления различаются:

- КО в твэле;
- объем радиального зазора;
- объем центрального отверстия таблетки;
- объем свободного газа внутри сборки топливных таблеток.

При расчете полагается, что во время облучения объем центрального отверстия таблетки и объем свободного газа внутри сборки топливных таблеток не изменяются. Объем центрального отверстия таблетки в аксиальном сегменте j задается следующим образом:

$$V_{отв,j} = \pi \cdot r_{таб,вн}^2 \cdot l_j, \quad (2.118)$$

где $r_{таб,вн}$ – начальный внутренний радиус таблетки, м;

l_j – длина аксиального сегмента j , м.

Объем свободного газа внутри сборки топливных таблеток включает следующие объемы:

- объем впадины;
- объем фаски;
- объем свободного пространства в месте контакта таблетка–таблетка;
- объем пустот в трещинах.

Для объема свободного пространства в месте контакта таблетка–таблетка $V_{кон}$ справедливо выражение:

$$V_{кон} = \pi \cdot r_{таб,н}^2 \cdot \Delta l / 2, \quad (2.119)$$

где $r_{таб,н}$ – наружный радиус таблетки, м;

Δl – ширина апертуры таблетка–таблетка ($\Delta l \approx 20$ мк), характеризующей наклон таблеток и определяемой как расстояние между двумя краями смежных таблеток, м [8].

Объем пустот в трещинах $V_{трещ}$ находится как

$$V_{трещ} = 2 \cdot \pi \cdot r_{таб,н} \cdot u^{рел} \cdot l_{таб}, \quad (2.120)$$

где $u^{рел}$ – радиальный сдвиг таблетки из-за релокации, м;

$l_{таб}$ – длина одной таблетки, м.

Обозначая объемы впадины и фаски одной таблетки соответственно как $V_{впад}$ и $V_{фас}$, объем свободного газа $V_{своб, j}$ (м³) в аксиальном сегменте j топливного стержня определяется из следующего соотношения:

$$V_{своб, j} = (V_{впад} + V_{фас} + \pi \cdot r_{таб,н}^2 \cdot \Delta l / 2 + 2 \cdot \pi \cdot r_{таб,н} \cdot u^{рел} \cdot l_{таб}) \frac{l_j}{l_{таб}}. \quad (2.121)$$

Поскольку длина аксиального сегмента l_j при облучении изменяется, то объем свободного газа и КО в твэле при облучении также изменяются.

Вводятся обозначения:

$\varepsilon_{таб, j}^{терм}$ – усредненная по объему таблетки деформация термического расширения;

$\varepsilon_{таб,j}^{упл}$ – усредненная по объему таблетки деформация уплотнения;

$\varepsilon_{таб,j}^{ме}$ – усредненная по объему таблетки деформация твердого распухания.

С учетом этих деформаций, длина j -го сегмента $\tilde{l}_{таб,j}$ определяется как

$$\tilde{l}_{таб,j} = (1 + \varepsilon_{таб,j}^{мерм} + \varepsilon_{таб,j}^{упл} + \varepsilon_{таб,j}^{ме}) l_j. \quad (2.122)$$

В оболочке, задавая термическую деформацию как $\varepsilon_{об,j}^{мерм}$ и деформацию из-за роста под действием облучения как $\varepsilon_{об,j}^{обл}$, длина сегмента $\tilde{l}_{об,j}$ есть

$$\tilde{l}_{об,j} = (1 + \varepsilon_{об,j}^{мерм} + \varepsilon_{об,j}^{обл}) l_j. \quad (2.123)$$

Подобным образом, длина КО в твэле $\tilde{l}_{КО}$ задается как

$$\tilde{l}_{КО} = (1 + \varepsilon_{КО}^{мерм} + \varepsilon_{КО}^{обл}) l_{КО}. \quad (2.124)$$

Тогда изменение КО в твэле $\Delta V_{КО}$ определяется как

$$\Delta V_{КО} = \pi \cdot r_{об,вн}^2 \left(\sum_{j=1}^N (\tilde{l}_{об,j} - \tilde{l}_{таб,j}) + \tilde{l}_{КО} - l_{КО} \right), \quad (2.125)$$

где N – число аксиальных сегментов;

$r_{об,вн}$ – внутренний радиус оболочки, м.

Зная $\Delta V_{КО}$, КО в твэле $\tilde{V}_{КО}$ находится с помощью следующего соотношения:

$$\tilde{V}_{КО} = V_{КО} + \Delta V_{КО}, \quad (2.126)$$

где $V_{КО}$ – начальный КО в твэле, м³.

Зная ширину зазора δ , объем радиального зазора $\tilde{V}_{рад,j}$ для аксиального сегмента j задается следующим образом:

$$\tilde{V}_{рад,j} = 2 \cdot \pi \cdot r_{об,вн} \cdot \delta \cdot \tilde{l}_{таб,j}. \quad (2.127)$$

Если расчетная ширина зазора $\delta < 0$, то полагается: $\delta = 0$.

Давление газа.

С учетом принятых допущений, что газ в твэле ведет себя как идеальный газ и давление в твэле распределено равномерно, давление газа внутри твэла $P_{газ}$ (Па) рассчитывается как

$$P_{газ} = \frac{n_{общ} \cdot R}{\frac{V_{КО}}{T_{КО}} + \sum_{j=1}^M \left(\frac{V_{рад,j}}{T_{рад,j}} + \frac{V_{отв,j}}{T_{таб,j}^{max}} + \frac{V_{своб,j}}{T_{таб,j}^{cp}} \right)}, \quad (2.128)$$

где $n_{общ}$ – общее число молей всех газов, моль;

R – газовая постоянная ($R = 8,314$ Дж/моль·К);

$V_{КО}$ – КО твэла, м³;

$T_{КО}$ – температура газа КО твэла, К;

$V_{рад,j}$, $V_{отв,j}$ – объем соответственно радиального зазора и центрального отверстия таблетки в аксиальном сегменте j топливного стержня, м³;

$T_{рад,j}$, $T_{таб,j}^{max}$ – температура соответственно радиального зазора и в центре таблетки в аксиальном сегменте j , К;

$V_{своб,j}$ – объем свободного газа в аксиальном сегменте j , м³;

$T_{таб,j}^{cp}$ – средняя по объему температура таблетки в аксиальном сегменте j , К.

2.8. Моделирование влияния перестановок ТВС на поврежденность оболочки твэла

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 мощностью реактора (рис. 2.2).

В соответствии с определяемым на начало каждой кампании распределением долгоживущих и стабильных ПД, вызывающих шлакование АКЗ, находилось распределение ТВС в выделенном сегменте АКЗ по годам кампании.

В выделенном сегменте АКЗ присутствует максимум 7 ТВС каждого года кампании. Обозначив числом номер ячейки, 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. 2.11).

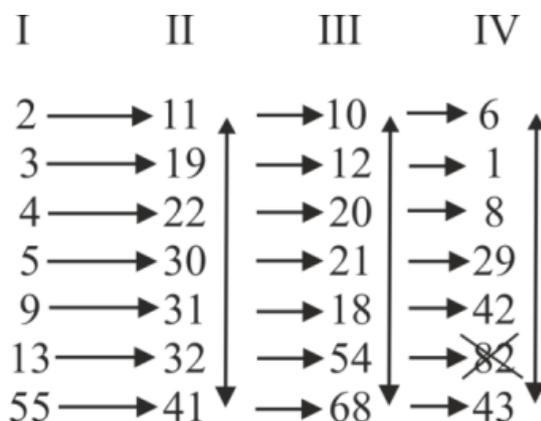


Рис. 2.11. Схема распределения ТВС по ячейкам

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. 2.11 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 [14, 85, 86].

В результате анализа подходов к перестановкам ТВС в пределах выделенного сегмента АКЗ выявлено, что только в одном из имеющихся в АКЗ 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 [38].

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-года.

Последний подход обеспечивает оптимальное использование топлива при обеспечении необходимой длительности кампании, поэтому наиболее харак-

терным вариантом перестановок ТВС в сегменте АКЗ является случай, когда ячейка № 82 не рассматривается при моделировании перестановок ТВС в пределах выделенного сегмента АКЗ, и для ТВС каждого года выделяется по 7 ячеек, за исключением ТВС 4-го года, для которых выделяется 6 ячеек (рис. 2.11).

2.9. Основной процесс накопления поврежденности оболочки твэла в нормальных условиях эксплуатации

В результате анализа экспериментов, доступных в открытых источниках и определяющих изменение деформации в оболочке твэла вплоть до ее разрушения, выявлено, что развитие деформированного состояния в тонкой оболочке при термомеханических условиях, близких к нормальным эксплуатационным условиям АКЗ легководного реактора, моделировалось в [11]. Исследовалась циклически нагружаемая при температуре 350 °С оболочка из циркониевого сплава циркалой-4 (SR – с отпущенными напряжениями) с внешним диаметром и толщиной 9,5 мм и 0,57 мм, соответственно (рис. 2.12).

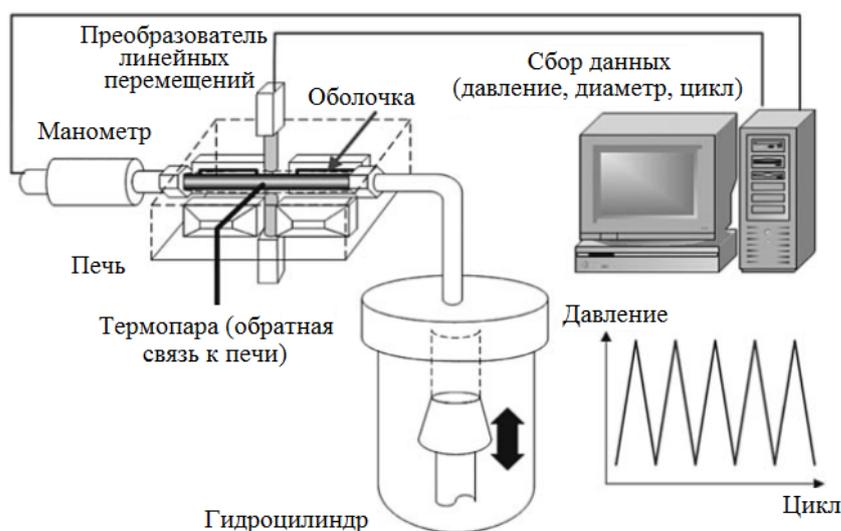


Рис 2.12. Схема установки для циклического нагружения оболочки [11]

Давление пилообразного профиля прикладывалось к оболочке с разными частотами нагружения ν , с максимальным и минимальным тангенциальным напряжением в оболочке $\sigma_{\theta}^{\max} = 310 \dots 470$ МПа и $\sigma_{\theta}^{\min} = \text{const} = 78$ МПа, соответственно.

Используя диаграмму напряжение-деформация (рис. 2.13), а также анализируя структуру металла и наличие бороздок усталости на поверхности разрушения, в экспериментах [11] обнаружено, что при $\nu \ll 1$ Гц основным механизмом деформации тонкой оболочки является ползучесть, тогда как усталостная составляющая деформации пренебрежимо мала.

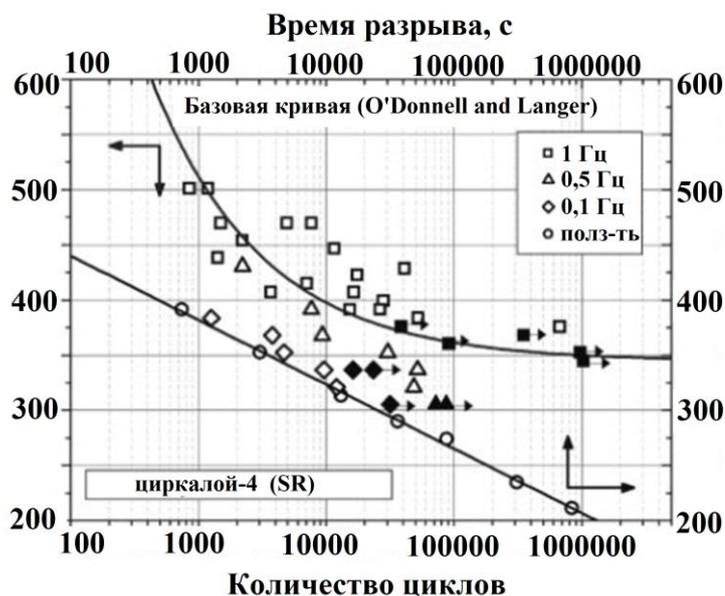


Рис. 2.13. Диаграмма напряжение/деформация [11]

Методология экспериментов [39], проводившихся для оболочек из разных сплавов (включая титановые), для разных циклов переменного нагружения оболочек, отличалась от методологии экспериментов [11]. Также отличались условия проведения экспериментов (рис. 2.14).

Однако, экспериментальные результаты [11] подтвердили на качественном уровне результаты экспериментов [39], согласно которым зависимости удельной энергии рассеяния $A(\tau)$, описывающей меру деформационной поврежденности оболочки вследствие ползучести, для переменных режимов

(Соснин, 1986)

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ:

Температура: $T = 400-500$ °С ;
 Внешний диаметр оболочки: 20 мм;
 Толщина оболочки: 1 мм;
 Профиль давления: ступенчатый;
 Частота нагружения ν : VAR;

Методы анализа:

- 1) Анализ диаграммы напряжение-разрушение;
- 2) Контроль изменения деформаций;
- 3) ЭВП (расчет A_0 по экспериментальным значениям деформации ползучести)

Эксперименты по циклически нагружаемой оболочке твэла (Kim, 2007)

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ:

Температура: $T = 350$ °С ;
 Материал оболочки: циркалой-4 (микроструктура: SR);
 Внешний диаметр оболочки: 9,5 мм;
 Толщина оболочки: 0,57 мм;
 Профиль давления: пилообразный;
 Частота нагружения ν : VAR;
 Максимальное тангенциальное напряжение: 310...470 МПа;
 Минимальное тангенциальное напряжение: 78 Мпа;

Методы анализа:

- 1) Построение диаграммы напряжение-разрушение;
- 2) Контроль изменения диаметра оболочки;
- 3) Анализ микроструктуры металла и контроль наличия бороздок усталости на поверхности разрушения.

ВЫВОД (Kim, 2007)

При $\nu \ll 1$ Гц основным механизмом деформации тонкой оболочки является ползучесть, тогда как усталостная составляющая деформации пренебрежимо мала, что подтвердило результаты экспериментов (Соснин, 1986)

Рис. 2.14. Сопоставление методологии и условий проведения экспериментов [39] и [11]

нагружения тонкой оболочки при $\nu \ll 1$ Гц подобны зависимостям $A(\tau)$ для стационарного нагружения и характеризуются одной величиной удельной энергии рассеяния A_0 в момент разрушения материала оболочки.

Из результатов [11] и [39] следует вывод, что оценка поврежденности оболочки по SC4 имеет значительную погрешность, выражающуюся в коэффициенте запаса, в 5 и более раз превышающем коэффициент запаса для остальных критериев приемки твэла прочностной группы, не только из-за пренебрежения зависимостью ограничивающих компонентов в критерии разрушения от совокупности факторов эксплуатации твэла, но также поскольку в SC4 не учитывается основной физический механизм накопления поврежденности в оболочке (ползучесть), и усталостная составляющая деформации согласно SC4 преобладает уже после двух лет эксплуатации РУ в маневренном режиме.

Погрешность оценки разрушения оболочки на основе связи между σ_0^{\max} и NC_i^{\max} из-за невозможности учета зависимости NC_i^{\max} от вариантов условий

эксплуатации оболочки, из-за противоречия между главным процессом разрушения оболочки, заложенным в SC4 (усталость при $\nu \geq 1$ Гц), и характерным для эксплуатации твэла (ползучесть при $\nu \ll 1$ Гц), привела к тому, что критерий на ее основе показал свою неадекватность для ряда циркониевых сплавов, например, французского производства [26].

2.10. Соотношения для учета основного процесса накопления поврежденности оболочки твэла в нормальных условиях его эксплуатации

Метод оценки эксплуатационного ресурса оболочки твэла в режимах нормального нагружения легководного реактора, основанный на учете ползучести как основного физического процесса накопления поврежденности в оболочке, может рассматриваться как развитие метода работы [7].

Метод диссертации [7], основанный на применении энергетического варианта теории ползучести (ЭВТП), был разработан для оценки момента разрушения оболочки при развитии в ВВЭР-1000 тяжелой аварии с потерей теплоносителя, сопровождаемой высокотемпературной ползучестью и разрушением корпуса реактора. В работе [7] уравнения механического состояния для оболочки записаны в виде

$$\dot{p}_e = f(k_i, T, \sigma_e, \omega(\tau)), \quad (2.129)$$

$$\dot{\omega}(\tau) = \frac{\sigma_e \cdot \dot{p}_e}{A_0}, \quad (2.130)$$

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 (2.129)–(2.130) находится удельная энергия рассеяния A_0 , накопленная к моменту разрушения оболочки и зависящая только от температуры.

При этом принимается 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 [7], 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.

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 ее разрушение.

Развивая метод расчета на основе ЭВПП поврежденности оболочки твэла в тяжелых авариях с потерей теплоносителя [7], в публикации [9] впервые предложено использовать ЭВПП [39], экспериментально подтвержденный для различных сплавов и режимов нагружения, который позволяет учесть

ползучесть как основной физической механизм разрушения оболочки твэла в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора.

ЭВТП-критерий разрушения оболочки для нормальных условий эксплуатации РУ записан в виде [9]:

$$\omega(\tau) = A(\tau) / A_0 = 1; \quad A(\tau) = \int_0^{\tau} \sigma_e \cdot \dot{p}_e \cdot d\tau, \quad (2.131)$$

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 (с⁻¹), соответственно.

Согласно экспериментально подтвержденному ЭВТП, величина предельного компонента A_0 в критерии разрушения материала оболочки не зависит от последовательности параметров нагружения материала и определяется только его свойствами [39].

2.11. Алгоритм расчета поврежденности оболочки твэла по ЭВТП-модели изменения свойств твэла

Соотношения ЭВТП-модели изменения свойств твэла базируются на определении развития напряжений/деформаций в твэле на основе МКЭ и увеличения $\omega(\tau)$ на основе ЭВТП, что обеспечивает:

- учет влияния изменения зазора δ между оболочкой и топливной таблеткой, а также толщины окисного слоя $S_{ок}$ на наружной поверхности оболочки на термомеханическое состояние оболочки;
- учет ползучести как основного физического механизма накопления $\omega(\tau)$ в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора;
- независимость ограничивающих компонентов в критерии разрушения

оболочки от условий ее эксплуатации, что снимает проблему несоответствия между условиями, для которых получены ограничивающие компоненты в критерии разрушения оболочки, и реальными условиями ее эксплуатации;

– учет влияния на $\omega(\tau)$ реальной последовательности изменения эксплуатационных условий оболочки твэла.

Математическая модель расчета распределения энерговыделения в твэле, выполняемого на основе двухгруппового диффузионного приближения, в качестве входных данных использует:

- конструкционные параметры твэла;
- режимные параметры РУ с ВВЭР-1000;
- характеристики программы изменения мощности РУ;
- координаты расположения РО СУЗ.

Выходными данными являются значения линейной мощности $\langle q_{l,i,j} \rangle$ в условно выделенных аксиальных слоях ТВС, расположенных в пронумерованных ячейках АКЗ.

Математическая 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 (длина одного АС принималась равной длине двух аксиальных слоев) твэла.

Математическая модель расчета распределения поврежденности оболочки твэла на основе ЭВП в качестве входных данных использует температуры, напряжения и деформации в АС оболочки твэла, а выходными данными

являются значения удельной энергии рассеяния и поврежденности в АС оболочки.

На временном шаге Δt_{n+1} эквивалентная деформация ползучести в оболочке твэла p_e определяется используя выражение

$$p_{e,n+1} = p_{e,n} + \Delta t_{n+1} \cdot \dot{p}_{e,n+1} \quad (2.132)$$

Для расчета $p_e(\tau)$ и $\sigma_e(\tau)$ выполнялись итерации между расчётами температуры и температуро-зависимых величин, при этом расчет деформации оболочки, а также изменения δ использовался для достижения конвергенции в конце каждого шага по времени (рис. 2.15).

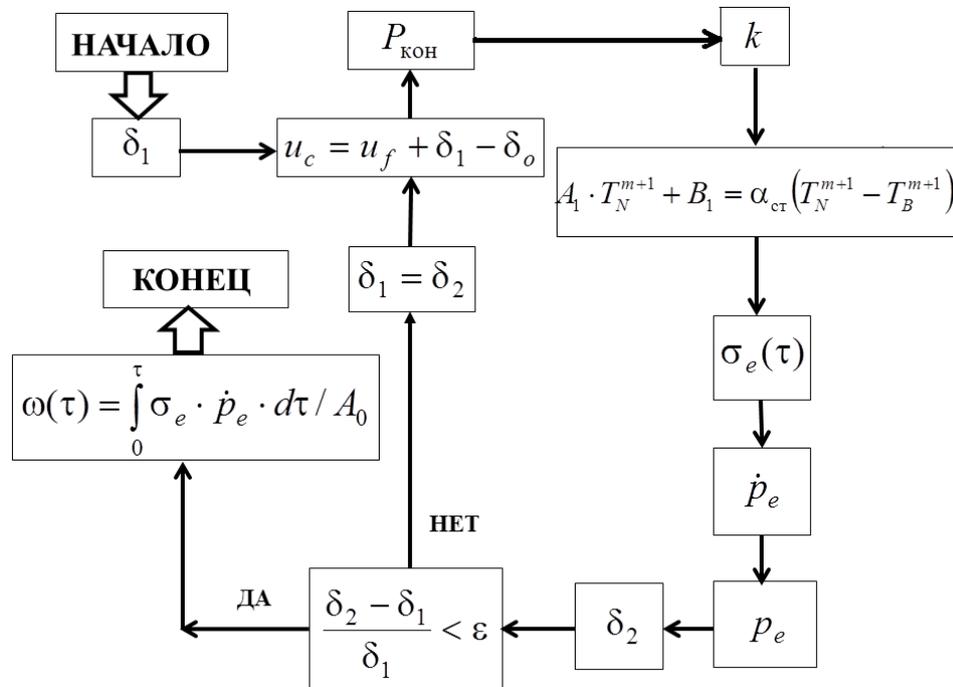


Рис. 2.15. Схема расчета поврежденности оболочки твэла

2.12. Выводы по второму разделу

1. В математической модели изменения свойств твэла РУ с 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 зависи-

мости 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 поврежденности в материале оболочки для произвольной комбинации переменного и стационарного режимов нагружения ВВЭР-1000 целесообразно использовать ЭВТП, поскольку в этом подходе учитывается ползучесть как основной механизм разрушения тонкой оболочки твэла в комбинированном режиме нагружения, и ЭВТП экспериментально обоснован для стационарных и переменных режимов нагружения материала.

3. Благодаря тому, что компоненты критерия разрушения оболочки на основе ЭВТП рассчитываются с учетом всей совокупности условий эксплуатации оболочки, а лимитирующая величина, входящая в состав критерия разрушения оболочки, не зависит от условий ее нагружения и определяется только свойствами материала оболочки, ЭВТП-критерий разрушения оболочки твэла возможно применить для управления свойствами твэлов.

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

- учитывает влияние всей совокупности условий эксплуатации оболочки на ее долговечность;

- учитывает физический механизм накопления повреждения в материале оболочки при частотах, характерных для режимов переменного нагружения ВВЭР-1000;

- использует МКЭ для анализа развития напряжений и деформаций в оболочке;

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

- учитывает изменение толщины окисного слоя на внешней поверхности

оболочки и влияние этого изменения на механические свойства оболочки;

– учитывает конструкционные и режимные параметры ВВЭР-1000, размещение органов СУЗ в АКЗ, распределение физических параметров в АКЗ ВВЭР-1000 и перестановки ТВС в АКЗ;

5. Для расчета условий разрушения оболочки твэла необходимо на основе ЭВТП-модели изменения свойств твэла разработать ЭВТП-метод расчета поврежденности оболочки твэла и установить основные факторы, определяющие поврежденность оболочки в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора.

РАЗДЕЛ 3

ЭВТП-МЕТОД РАСЧЕТА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА

3.1. Положения ЭВТП-метода расчета поврежденности оболочки

ЭВТП-метод расчета поврежденности оболочки твэла позволяет для нормальных условий эксплуатации твэла учесть основной процесс накопления поврежденности и определяющие ее параметры.

Положения ЭВТП-метода [9, 13, 27, 39, 40]:

– при управлении свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора 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 исключено путем оптимизации регламента эксплуатации и технологии производства оболочки;

– наиболее существенным для безопасной эксплуатации твэлов является корректное описание процесса разрушения оболочки, вызванного комбинацией многократных циклических и долговременных стационарных нагружений;

– для управления свойствами твэлов необходимо контролировать поврежденность оболочек, 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 твэла $\nu \ll 1$ Гц) режимах нормальной эксплуатации, метод расчета условий разрушения оболочки твэла при условиях нормальной эксплуатации легководного реактора должен быть построен на основе учета ползучести как основного механизма 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 оценивается через удельную энергию рассеяния $A(\tau)$, накопленную на данный момент в процессе ползучести;

– лимитирующий компонент A_0 критерия разрушения оболочки не зависит от 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 оболочки твэла, модели МАТПРО-А и двухгрупповой диффузионной модели изменения пространственного распределения нейтронного поля в АКЗ, 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):

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

В результате расчетов $A(\tau)$ по ЭВТП-методу для различных условий нагружения оболочки из циркалоя-4 в условиях АКЗ РУ с ВВЭР-1000 сформулированы следующие выводы [25, 40, 41]:

– расчетные зависимости $A(\tau)$ для оболочки подобны экспериментальным и расчетным зависимостям [39] для различных условий нагружения различных сплавов (рис. 3.1 и 3.2);

– величина A_0 , определенная по условию (3.1), составляет $A_0=55 \text{ МДж/м}^3$ и не зависит от последовательности условий нагружения оболочки даже в случае их значительного отличия, что соответствует ЭВТП – рис. 3.1 (знаком “№” обозначен номер ячейки АКЗ);

– при определении A_0 на основе критерия SC2

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

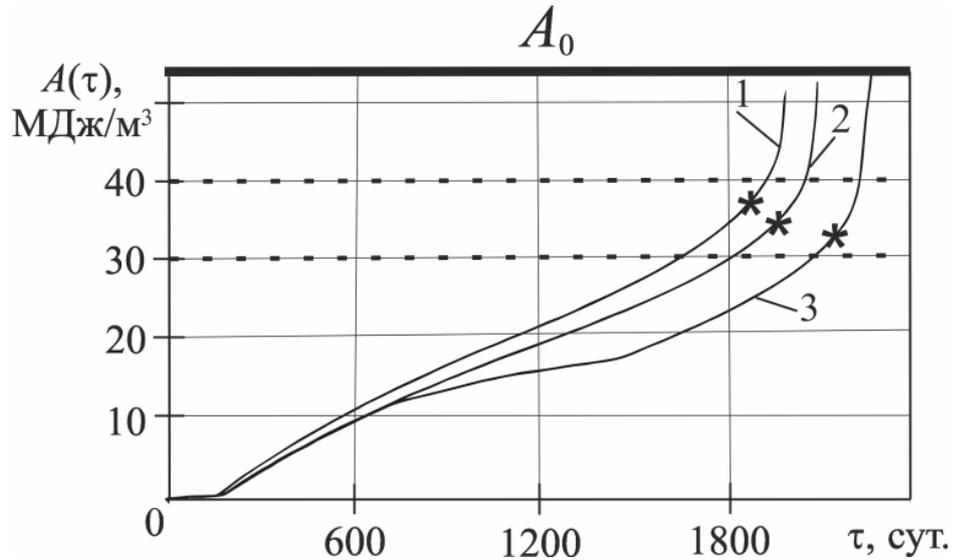


Рис. 3.1. Изменение $A(\tau)$: (1) № 55 ($N=100\%$); (2) № 44 (дн. цикл); (3) № 55-44-10-43-44-44 (дн. цикл); (*) τ_0 по (3.2)

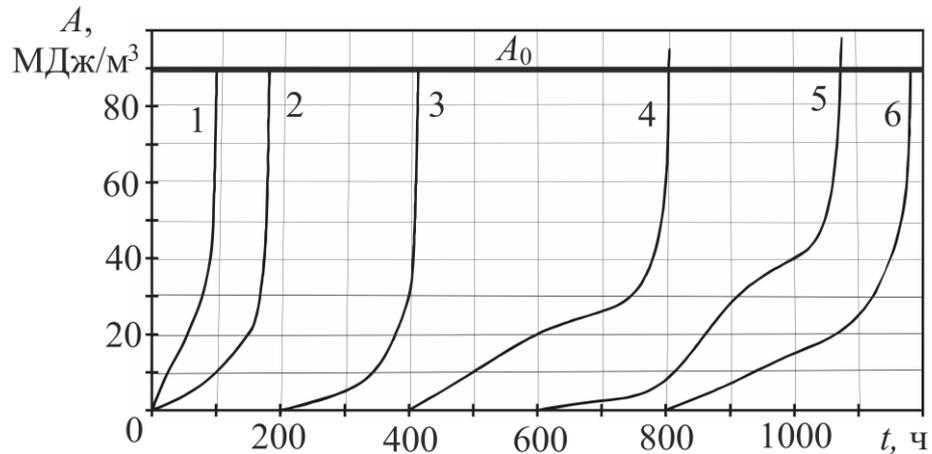


Рис. 3.2. Изменение $A(\tau)$ для титанового сплава ОТ-4 [39]. Случай одноосного нестационарного ступенчатого нагружения при разных условиях циклического нагружения с $\nu \ll 1$ Гц (линии 1...6): (толстая горизонтальная линия) A_0 по [39]. $A_0 = 9 \text{ кг}\cdot\text{мм}/\text{мм}^3 = 88 \text{ МДж}/\text{м}^3$

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: 37,12 (рис. 3.1, кривая 1), 34,44 (рис. 3.1, кривая 2) и 31,94 МДж/м³ (рис. 3.1, кривая 3).

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 параметров 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 $A_0 = \text{const} = 30$ МДж/м³.

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

– ЭВТП-метод позволяет достичь независимости ограничивающего компонента в критерии разрушения оболочки от условий ее нагружения, значительно снизить коэффициент запаса при расчете поврежденности, предложить алгоритм управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора [27, 41].

3.2. Программное средство для расчетного анализа развития напряжений и деформаций в оболочке

При выборе программного средства (ПС) FEMAXI, служащего в Японии эталоном для верификации всех других кодов, анализирующих поведение топлива легководного реактора, для расчетного анализа развития напряжений и деформаций в оболочке твэла реактора типа ВВЭР, учитывались такие его важные достоинства, как

- совместное решение уравнений теплопроводности и механической деформации [29];

- ПС позволяет определять реакцию одиночного твэла легководного реактора (типов PWR и BWR) на комбинированное воздействие с учетом изменений линейной мощности в твэле, параметров теплоносителя и конструктивных характеристик твэла, и пригодно для анализа поведения твэла в нормальных условиях эксплуатации до глубин выгорания топлива более 50 МВт·сут/кг-U.

Согласно расчетной модели, использованной в программе FEMAXI, твэл разделен на 10 АС, в центральной точке каждого из них задается максимальная линейная мощность, пропорциональная текущей мощности реактора. Линейная мощность в других точках АС вычисляется путем экстраполяции значений, заданных для центральных точек.

Распределение температуры в твэле (с расхождением между численным и аналитическим решением не более 0,1 %) предсказывается для одномерной радиальной геометрии на основе учета внутреннего тепловыделения, изменений теплопроводности таблетки и зазора, теплообмена между поверхностью твэла и теплоносителем.

С помощью ПС рассчитываются упругая и пластическая деформация, сила механического взаимодействия таблетки с оболочкой, и деформация ползучести. Согласно принятой в ПС модели выхода газообразных продуктов деления 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 как минимум из четырех значений обеспечивающих выполнение каждого из следующих требований:

- линейная мощность в течение одного временного шага изменяется в пределах 10 Вт/см;
- выгорание в течение одного временного шага изменяется в пределах 0,5 МВт·сут/кг;
- деформация ползучести в течение одного временного шага не превышает упругую деформацию;
- ширина последующего временного шага превышает ширину предшествующего временного шага не более чем в 1,5 раза.

Первые два условия обеспечивают стабилизацию численного решения, а вторые два – позволяют избежать расходимости при расчете ползучести для всех АС [8].

Поскольку расчет температуры топлива с помощью ПС FEMAXI выполняется с разницей между численным и аналитическим решениями не более 0,1 % [8] (расчет максимальной линейной мощности в твэле ВВЭР-1000 выполняется с помощью ПС “Имитатор реактора” с точностью 5 % [42]), можно принять, что данное ПС обеспечивает достаточную точность реализации численного алгоритма анализа поведения твэла.

Численная ошибка, возникающая в виде остатка от итеративного расчета ползучести на каждом шаге по времени, включается в начальные условия для каждого последующего шага по времени, после чего выполняется новый итеративный процесс. Амплитуда этого вида погрешности не оценивается ввиду того, что в большинстве случаев эта погрешность перекрывается другими неопределенностями, в первую очередь, погрешностью модели теплопроводности [8].

Согласно ЭВТП-методу для расчета поврежденности оболочки твэла необходимо найти величину удельной энергии рассеяния, накопленную в зависимости от произвольной комбинации стационарного нагружения и много-

кратных циклических изменений мощности РУ, длительного воздействия температурно-силового нагружения конструкционного материала оболочки твэл в радиационных условиях [43, 44], поэтому решающим фактором при выборе ПС FEMAXI послужило то, что оно позволяет рассчитать методом конечных элементов эквивалентное напряжение σ_e и скорость эквивалентной деформации ползучести $\dot{\rho}_e$ оболочки для заданной истории уровней мощности и параметров теплоносителя реактора типа ВВЭР.

Скорость эквивалентной деформации ползучести $\dot{\rho}_e$ материала оболочки твэла рассчитывается с учетом радиационных эффектов и представляется в следующем виде [8]:

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

где $\bar{\epsilon}^H$ – безразмерный параметр упрочнения;

T – температура, К;

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

F – скорость делений, $1/\text{м}^3 \cdot \text{с}$.

Математическая модель, заложенная в ПС, применима для анализа поведения твэла реактора типа ВВЭР в области глубоких выгораний не только в стационарных условиях, но и в переходных процессах, характерных для переменных режимов эксплуатации РУ.

3.3. Основные факторы, определяющие поврежденность оболочек твэлов

3.3.1. Влияние характеристик цикла нагружения на поврежденность оболочек твэлов

В ранних работах по ЭВТП-методу [9, 45–55] поведение оболочки первоначально анализировалось для случая эксплуатации реактора ВВЭР-1000 по недельному циклу нагружения РУ, что было связано со сравнительно боль-

шей трудоемкостью расчетного анализа изменения свойств оболочки при суточном цикле нагружения. Рассчитывалась удельная энергия рассеяния $A(N)$ для циркаловой оболочки твэла РУ типа ВВЭР (марка циркалоя – разгруженный по напряжениям), в зависимости от количества недельных циклов нагружения N , для двух различных режимов нагружения ЯР (рис. 3.3).

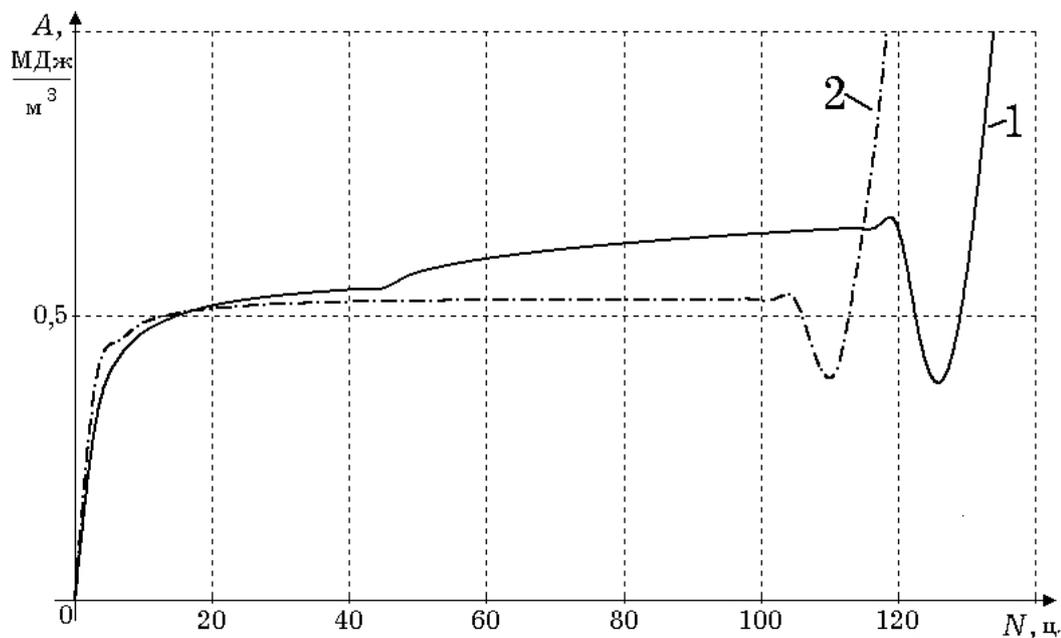


Рис. 3.3. Зависимость удельной энергии рассеяния от числа недельных циклов нагружения N : 1 – цикл: (5 суток – 100 %; 46 ч – 50 %); 2 – стационарная эксплуатация РУ на 100 % мощности

Кривая (1) соответствует недельному циклу нагружения, при котором РУ в течение пяти календарных суток работает на 100 % мощности, затем в течение 1 ч реактор переводится на уровень мощности 50 %.

Далее РУ работает в течение 46 ч на мощности 50 %, после чего возвращается в течение 1 ч на уровень мощности 100 %. Данный недельный цикл нагружения соответствует работе РУ на уровне мощности 50 % в выходные дни каждой календарной недели.

Кривая (2) соответствует стационарной работе РУ на 100 % мощности, т.е. в режиме базовой нагрузки.

Явление ползучести проявляется в виде трех характерных стадий: неустановившейся, установившейся и ускоренной ползучести (последняя стадия – стадия предразрушения) [39, 43, 44]. 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 ползучесть	Установившаяся ползучесть	Ускоренная ползучесть
1	$A_1(0) \dots A_1(15)$	$A_1(15) \dots A_1(118)$	$A_1(118) \dots A_1(140)$
2	$A_2(0) \dots A_2(10)$	$A_2(10) \dots A_2(101,7)$	$A_2(101,7) \dots A_2(140)$

Эквивалентная деформация ползучести p_e циркалоевой оболочки для обоих указанных режимов нагружения постепенно увеличивается с течением времени, причем на 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 календарных недельных циклов нагружения p_e достигает 5,00 % и 9,43 % при эксплуатации РУ в режиме нагружения (5 суток – 100 %, 46 ч – 50 %) и в режиме базовой нагрузки (на 100 % мощности) соответственно.

Величина накопленной удельной энергии рассеяния перед наступлением стадии ускоренной ползучести (рис. 3.3):

– для недельного цикла нагружения (5 суток – 100 %, 46 ч – 50 %):

$$A_{01} = A_1(118) = 0,658 \text{ МДж/м}^3;$$

– при стационарной эксплуатации РУ на 100 % мощности:

$$A_{02} = A_2(101,7) = 0,529 \text{ МДж/м}^3.$$

Для недельного цикла нагружения (5 суток – 100 %, 46 ч – 50 %) календарная продолжительность эксплуатации твэла до наступления стадии

ускоренного роста ползучести значительно больше соответствующего времени для случая эксплуатации РУ в режиме базовой нагрузки (табл. 3.1).

С точки зрения эксплуатации РУ, при анализе поведения твэла удобнее использовать понятие так называемых “эффективных” суток, т.е. суток эксплуатации РУ на 100 % номинальной мощности.

При эксплуатации РУ по недельному циклу нагружения (5 суток – 100 %, 46 ч – 50 %) в течение календарной недели будет 6 эффективных суток. Поэтому, чтобы получить число недельных циклов нагружения $N_{e,0}$ до начала стадии ускоренной ползучести в пересчете на эффективные сутки, для режима (5 суток – 100 %, 46 ч – 50 %) необходимо разделить число календарных недельных циклов нагружения $N_{0,1} = 118$ до начала стадии ускоренной ползучести на отношение числа календарных суток к числу эффективных суток в неделе, т.е. $7/6$, в результате имеем: $N_{e,0,1} = 101,1$, что практически равно $N_{e,0,2} = 101,7$ для стационарной эксплуатации РУ на 100 % мощности (рис. 3.3).

Таким образом, существует независимость числа эффективных циклов нагружения $N_{e,0}$ до начала стадии ускоренной ползучести от характеристик цикла нагружения РУ при малой частоте циклического нагружения твэла ($\nu \ll 1$ Гц)

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

Этот результат показывает, что при $\nu \ll 1$ Гц расчетная величина поврежденности в оболочке твэла определяется исключительно процессом ползучести, зависящим от максимальной линейной мощности в твэле, тогда как фактор усталости пренебрежимо мал.

Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) РУ в течение времени T определяется по следующему выражению:

$$\text{КИУМ} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\tau_i \cdot N_i)}{T \cdot N}, \quad (3.6)$$

где $\Delta\tau_i$ – время эксплуатации РУ на мощности N_i ;

T – суммарное время эксплуатации РУ;

N – установленная мощность реактора (100 %).

Представляют интерес четыре основных режима нагружения РУ:

1) Стационарная эксплуатация РУ на 100 % мощности: КИУМ = 1.

2) Недельный цикл нагружения, например: (5 сут. – 100 %, 46 ч. – 50 %), КИУМ = 0,860 – (рис. 3.4, линия 1).

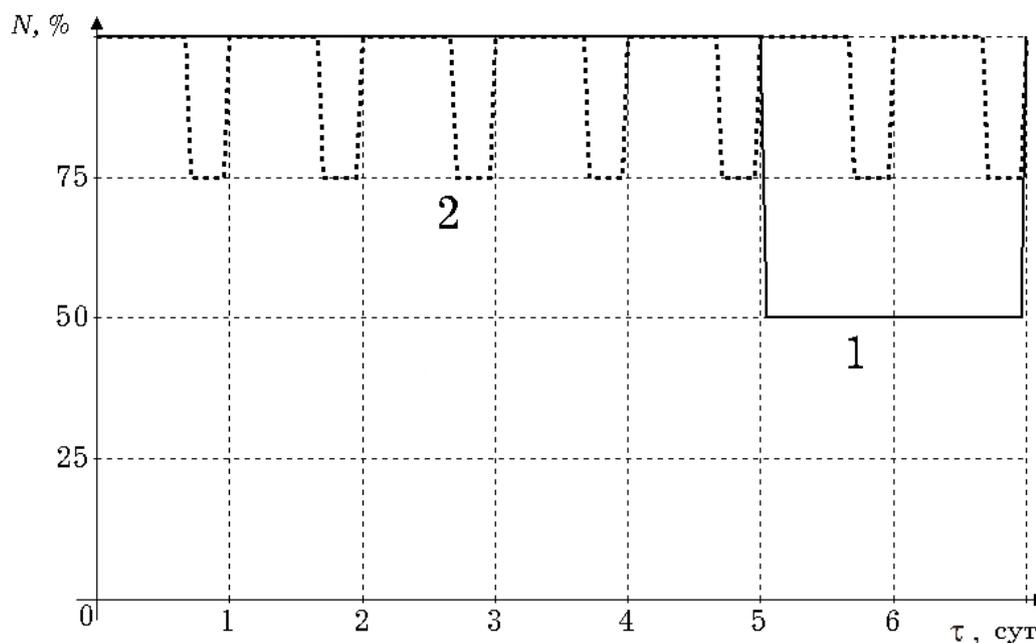


Рис. 3.4. Зависимость мощности РУ от времени для циклов: 1 – недельный цикл нагружения (5 сут. – 100 %, 46 ч. – 50 %); 2 – суточный цикл нагружения (16 ч. – 100 %, 6 ч. – 75 %)

3) Суточный цикл нагружения, например: РУ в течение 16 ч эксплуатируется на 100 % мощности, затем в течение 1 ч реактор переводится на уровень мощности 75 %.

Далее РУ эксплуатируется в течение 6 ч на мощности 75 %, после чего возвращается в течение 1 ч на уровень мощности 100 %.

Такой режим эксплуатации РУ – (16 ч – 100 %, 6 ч – 75 %), КИУМ = 0,927 (рис. 3.4, линия 2).

4) Режим, при котором РУ в будние дни недели эксплуатируется по суточному циклу (16 ч – 100 %; 6 ч – 75 %), затем в течение последнего часа каждых пятых суток недели мощность снижается до 50 %.

Далее РУ эксплуатируется в течение 47 ч на 50 % мощности, после чего в течение последнего часа каждых седьмых суток мощность РУ поднимается до уровня 100 %.

Такой режим эксплуатации РУ – комбинированный цикл нагружения (5 сут – 100 % + 75 %; 2 сут – 50 %), КИУМ = 0,805.

Рассчитана зависимость удельной энергии рассеяния $A(N)$ циркалоевой оболочки твэла РУ типа ВВЭР от числа суточных циклов нагружения (16 ч – 100 %; 6 ч – $k \cdot 100$ %), $k = 1; 0,75; 0,5$ [46].

Границы характерных стадий ползучести (для календарных суток) приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

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

k	Стадия ползучести циркалоевой оболочки		
	Неустановившаяся ползучесть	Установившаяся ползучесть	Ускоренная ползучесть
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 (3.6) величину КИУМ, число суточных циклов нагружения $N_{e,0}$ до начала стадии ускоренного роста ползучести в пересчете на эффективные сутки определяется по следующему выражению:

$$N_{e,0} = N_0 \cdot \text{КИУМ}, \quad (3.7)$$

где N_0 – число календарных суточных циклов нагружения до начала стадии ускоренного роста ползучести.

Величины накопленной после 1200 календарных суточных циклов эквивалентной деформации ползучести p_e , КИУМ, удельной энергии рассеяния

перед наступлением стадии ускоренной ползучести A_0 , N_0 и $N_{e,0}$ для $k = 1; 0,75; 0,5$ приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

p_e , КИУМ, A_0 , N_0 , $N_{e,0}$ для $k = 1; 0,75; 0,5$

k	p_e , % (1200 сут. циклов)	КИУМ	A_0 , МДж/м ³	N_0 , сут	$N_{e,0}$, 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

Согласно данным, приведенным в табл. 3.3, $N_{e,0} = \text{idem}$ (в пределах систематической погрешности расчета $\approx 1\%$) если $k = \text{var}$, что соответствует сделанному ранее выводу о независимости числа эффективных циклов нагружения $N_{e,0}$ до начала стадии ускоренной ползучести от характеристик цикла нагружения РУ при малой частоте циклического нагружения твэла ($\nu \ll 1$ Гц).

На рис. 3.5 представлена зависимость удельной энергии рассеяния $A(N)$ циркалоевой оболочки твэла РУ типа ВВЭР от числа недельных циклов нагружения N .

Рассматривались случаи:

- стационарная эксплуатация РУ на 100 % мощности;
- эксплуатация по суточному циклу (16 ч – 100 %; 6 ч – 75 %);
- эксплуатация по недельному циклу (5 сут – 100 %; 2 сут – 50 %);
- эксплуатация по комбинированному циклу (5 сут – 100 % + 75 %; 2 сут – 50 %).

Используя выражение (3.7), для приведенных на рис. 3.5 зависимостей рассчитано время эксплуатации оболочки твэла до начала стадии ускоренной ползучести – табл. 3.4.

Согласно данным, приведенным в табл. 3.4, $N_{e,0} = \text{idem}$ (в пределах систематической погрешности расчета $\approx 1\%$) если $k = \text{var}$, что подтверждает вывод

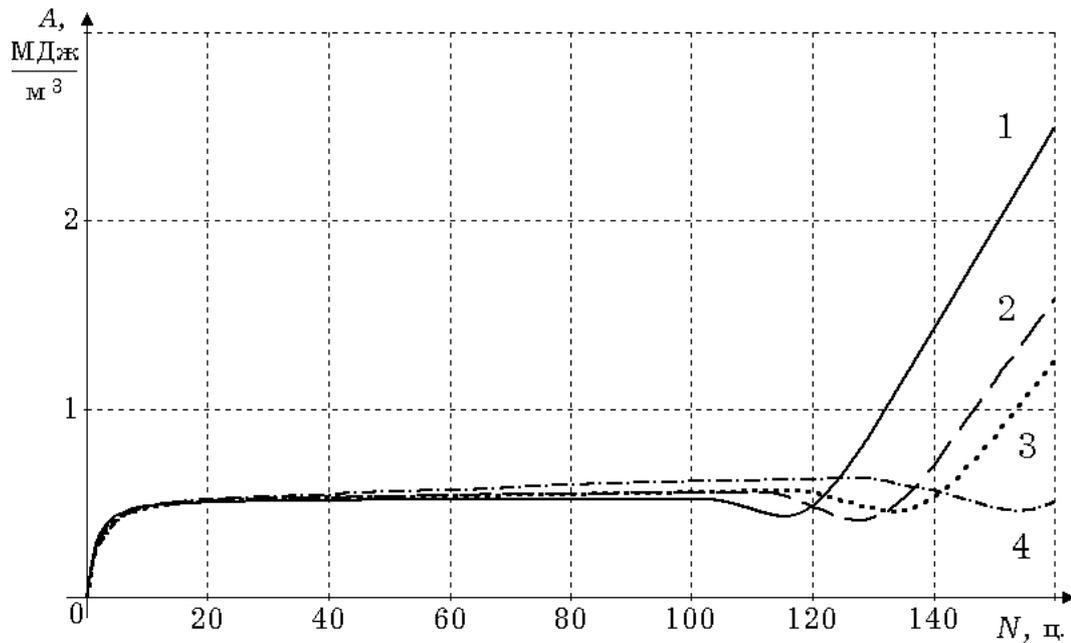


Рис. 3.5. Зависимость $A(N)$ от числа недельных циклов нагружения: 1 – стационарная эксплуатация РУ на 100 % мощности; 2 – суточный цикл: (16 ч – 100 %; 6 ч – 75 %); 3 – недельный цикл: (5 сут – 100 %; 2 сут – 50 %); 4 – комбинированный цикл: (5 сут – 100 % + 75 %; 2 сут – 50 %)

Таблица 3. 4

Время эксплуатации оболочки твэла в зависимости от режима нагружения РУ

Параметр	Режим нагружения РУ			
	100 %	Нед. цикл	Сут. цикл	Комб. цикл
КИУМ	1	0,86	0,927	0,805
N_0 , нед. циклов	100	117	109,9	127,1
$N_{e,0}$, эф. нед. циклов	100	100,6	101,9	102,3

о том, что число эффективных циклов нагружения $N_{e,0}$ до начала стадии ускоренной ползучести не зависит от характеристик цикла нагружения РУ при малой частоте циклического нагружения твэла ($\nu \ll 1$ Гц).

3.3.2. Влияние числа точек истории нагружения твэла на расчетную величину поврежденности оболочки

В работе [9] на примере суточного цикла нагружения РУ показано, что при увеличении числа точек истории нагружения от 4 до 8 в сутки расчетное время эксплуатации оболочки твэла до начала стадии ускоренного роста ползучести изменяется не более чем на 0,5 %. Следовательно, при расчетном моделировании эксплуатации РУ по суточному циклу нагружения задание 8 точек истории нагружения в сутки позволяет рассчитать время эксплуатации оболочки с достаточной точностью.

Аналогичным образом было получено, что при эксплуатации РУ по недельному циклу нагружения задание 56 точек истории нагружения в неделю позволяет рассчитать время эксплуатации оболочки с достаточной точностью.

3.3.3. Влияние режимных характеристик РУ на величину удельной энергии рассеяния в оболочке твэла

Накопленная в оболочке твэла удельная энергия рассеяния $A(N)$ зависит от режимных характеристик РУ [9, 27, 45]. Например, рассматривая недельный цикл нагружения (5 сут – 100 %, 46 ч – 50 %) РУ типа ВВЭР, с уменьшением средней по длине твэла температуры теплоносителя $\langle t_{т/н} \rangle$, остальные режимные характеристики РУ фиксированы, время наступления стадии ускоренного роста ползучести материала оболочки значительно сдвигается вправо по шкале числа недельных циклов нагружения (рис. 3.6).

С уменьшением средней по длине твэла линейной мощности $\langle q_l \rangle$, остальные режимные характеристики РУ при этом не меняются, время наступления стадии ускоренного роста ползучести оболочки также

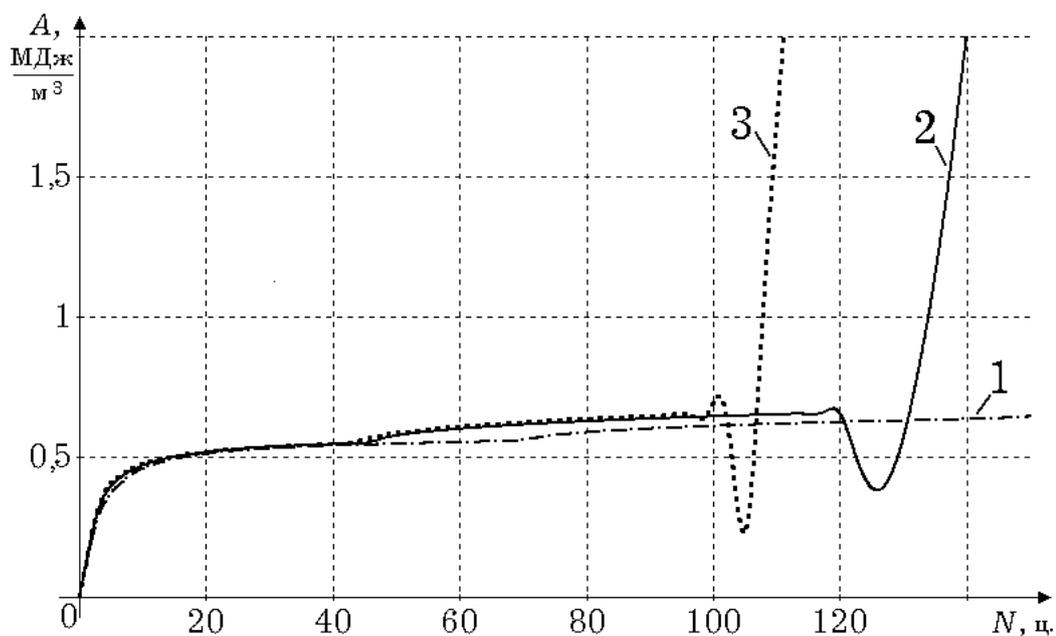


Рис. 3.6. Зависимость удельной энергии рассеяния $A(N)$ от $\langle t_{T/H} \rangle$:
 1 – $\langle t_{T/H} \rangle = 295^\circ\text{C}$; 2 – $\langle t_{T/H} \rangle = 305^\circ\text{C}$; 3 – $\langle t_{T/H} \rangle = 310^\circ\text{C}$.

значительно сдвигается вправо по шкале числа недельных циклов нагружения (рис. 3.7).

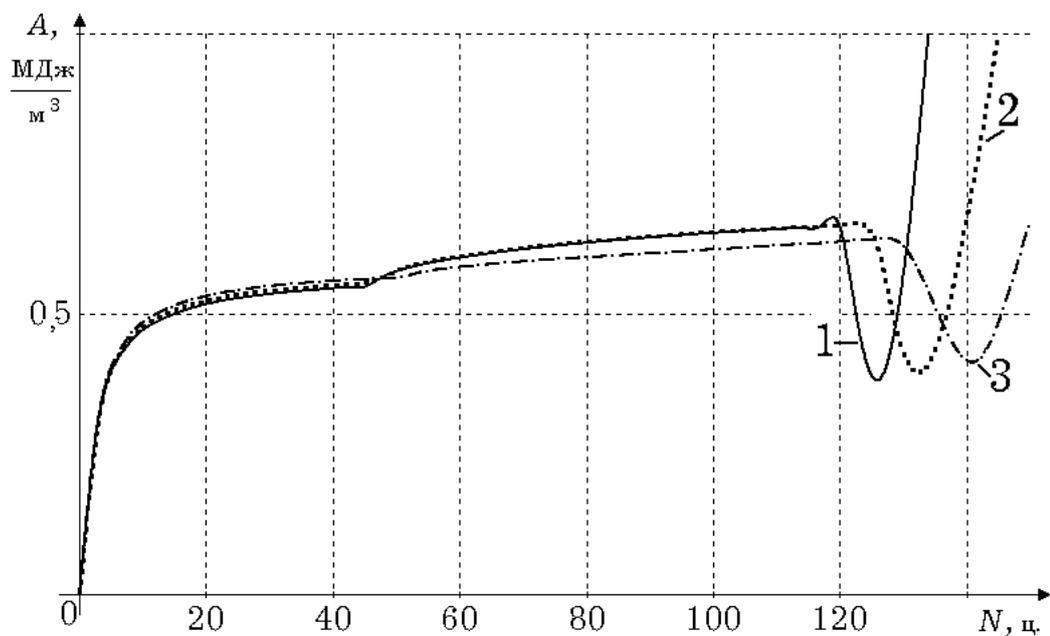


Рис. 3.7: Зависимость удельной энергии рассеяния от $\langle q_l \rangle$:
 1 – $\langle q_l \rangle = 180\text{ Вт/см}$; 2 – $\langle q_l \rangle = 175\text{ Вт/см}$; 3 – $\langle q_l \rangle = 170\text{ Вт/см}$

Следовательно, для расчета долговечности оболочки твэла конкретной РУ необходимо в качестве исходных данных задать конструкционные и режимные характеристики данного реактора, после чего, используя ЭВП-метод, возможно составить режимные карты, на которых будут нанесены значения максимального и усредненного параметра поврежденности $\omega(\tau)$ материала оболочки твэла для характерных историй нагружения РУ.

Поскольку в последнее время повысился интерес к работе ядерных энергоблоков Украины в переменной части графика электрической нагрузки энергосистемы, ЭВП-метод расчета долговечности оболочки твэла может оказаться незаменимым ввиду затруднительности получения аналогичных выводов путем точного аналитического решения задачи о ползучести материала оболочки или путем эксперимента.

3.4. Особенность изменения эквивалентной деформации ползучести в оболочке твэла перед началом стадии ускоренной ползучести

Эквивалентная деформация ползучести p_e оболочки твэла для всех рассмотренных режимов нагружения постепенно увеличивается с течением времени, однако перед началом стадии ускоренной ползучести наблюдается характерное кратковременное снижение p_e , после чего наступает быстрый рост деформации с достижением недопустимо больших ее значений с точки зрения надежности твэла – рис. 3.8.

Данное характерное снижение p_e перед началом стадии ускоренной ползучести было названо в работе [13] гистерезисным ввиду того, что в начале стадии ускоренного роста ползучести тенденция снижения σ_e сменяется тенденцией роста, при этом временно незначительно уменьшается p_e , что означает гистерезис, при котором эквивалентная деформация ползучести $p_e(N_e)$ отстает от эквивалентного напряжения $\sigma_e(N_e)$ по фазе – рис. 3.9.

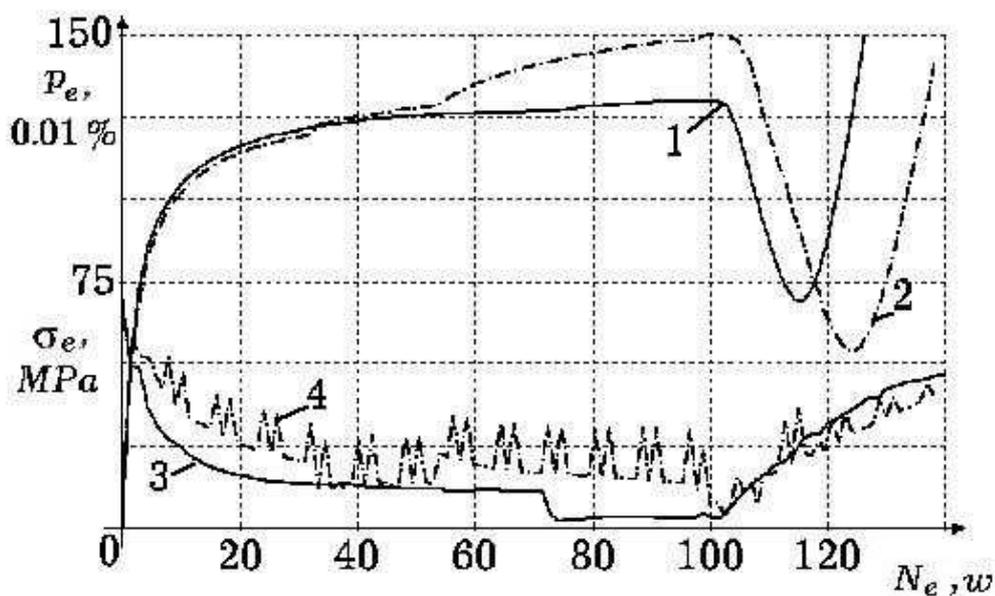


Рис. 3.8. Зависимости $p_e(N_e)$ и $\sigma_e(N_e)$: линия 1, 3 – $p_e(N_e)$, $\sigma_e(N_e)$, соответственно при эксплуатации РУ на 100 % мощности ($p_e(100) = 1,3 \%$, $\sigma_e(100) = 3,4$ МПа); линия 2, 4 – $p_e(N_e)$, $\sigma_e(N_e)$, соответственно для комбинированного цикла (5 сут – 100 % + 75 %; 2 сут – 50 %).

$$p_e(100) = 1,5 \%, \sigma_e(100) = 6,8 \text{ МПа}$$

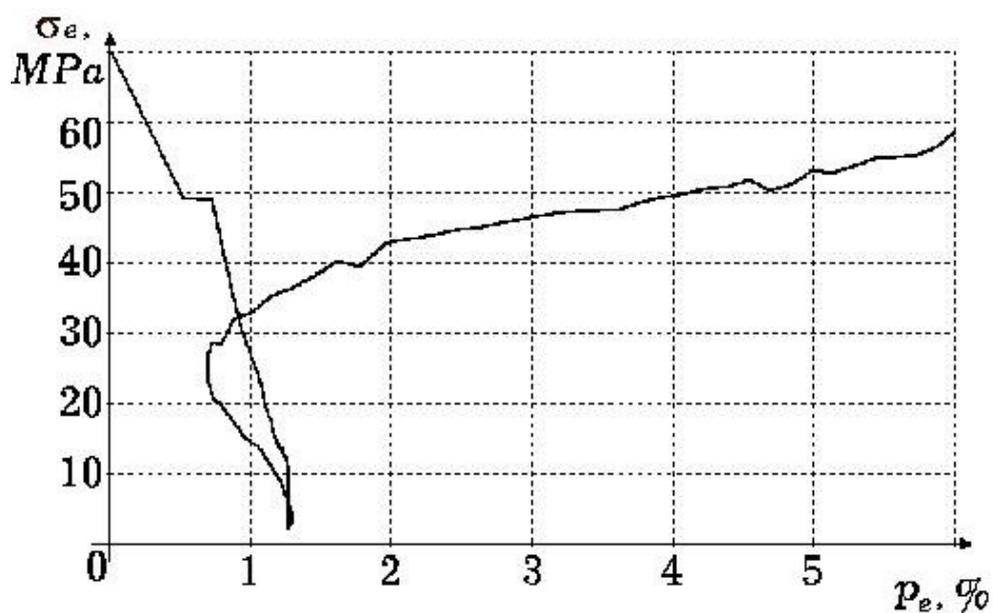


Рис. 3.9. Зависимость $\sigma_e(p_e)$ для стационарной эксплуатации РУ

Время данного характерного незначительного снижения эквивалентной деформации ползучести оболочки в начале стадии ускоренного роста ползучести совпадает с временем начала МВТО и может быть объяснено эффектом релокации трещин в топливной таблетке. Однако, подробно данное явление в работе не изучалось.

3.5. Необходимость совместного рассмотрения поврежденности оболочек твэлов и стабильности аксиального офсета при оптимизации алгоритма эксплуатации энергоблока в переменном режиме

Известны четыре основные программы регулирования (ПР) энергоблоков с ВВЭР [14, 50, 56–58]:

– ПР с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре (ПР № 1).

Преимущества: благоприятные условия для эксплуатации оборудования первого контура; возможность использования температурного эффекта реактивности для регулирования реактора; минимизация воздействия на ОР СУЗ.

Недостатки: повышение давления пара во втором контуре при снижении мощности энергоблока.

– ПР с постоянным начальным давлением пара во втором контуре (ПР № 2).

Преимущества: благоприятные условия для эксплуатации парогенерирующего оборудования второго контура; возможность использовать при номинальном режиме более высокие параметры пара перед турбиной.

Недостатки: требуется компенсатор давления увеличенных размеров; повышенные температурные напряжения в корпусе ЯР, а также в оболочках твэлов; для компенсации изменений реактивности за счет температурного эффекта требуется воздействие на ОР СУЗ.

– Компромиссная ПР с умеренным изменением средней температуры

теплоносителя в первом контуре и начального давления пара во втором контуре (ПР № 3).

Преимущества: возможность оптимального выбора параметров как первого, так и второго контура.

Недостатки: ПР № 3 присущи недостатки ПР № 1 и ПР № 2.

– Комбинированная ПР с поддержанием постоянного давления во втором контуре при малых нагрузках и постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре при больших нагрузках (ПР № 4) – в диапазоне мощности от 100 % до 80 % блок работает по ПР № 1, а при меньшей мощности – используется ПР № 2.

Преимущества: при маневрировании блок работает главным образом при постоянной средней температуре теплоносителя в первом контуре, при этом давление пара во втором контуре в случае значительных отклонений от номинальной мощности находится в приемлемых границах.

Недостатки: поддержание постоянной средней температуры теплоносителя в первом контуре при маневрировании затруднительно при разрешенном диапазоне изменения давления в парогенераторе 62...64 бар.

Задача перевода тепловой мощности АКЗ с одного уровня на другой сводится к разработке алгоритма, позволяющего контролируемо изменять мощность АКЗ, но при этом не допускать разрушения оболочек ТВЭЛов. В эксплуатационной практике применяются следующие основные способы устойчивого управления реактивностью [50, 56, 59–61]:

– Введение-выведение твёрдого поглотителя.

Преимущества: быстрое действие; легкость автоматизации.

Недостатки: введение ОР СУЗ в АКЗ приводит к искривлению поля энерговыделения, что может послужить причиной возникновения ксеноновых колебаний; при движении ОР СУЗ вверх, на границе движения, в оболочках ТВЭЛов, расположенных вблизи ОР СУЗ, из-за скачка мощности возникают значительные напряжения, способствующие разрушению оболочек.

– Изменение концентрации поглотителя в теплоносителе контура.

Преимущества: не изменяет геометрию поля энерговыделения по высоте при изменениях мощности АКЗ.

Недостатки: низкое быстродействие; образуются дебалансные воды, требующие переработки.

– Использование температурного коэффициента реактивности.

Преимущества: не изменяется геометрия поля энерговыделения по высоте при изменениях мощности АКЗ.

Недостатки: небольшой диапазон регулирования ограничен допустимым давлением в парогенераторе; температура входа теплоносителя в реактор, растущая при увеличении давления в ГПК, жестко ограничена таблицей допустимых режимов; появляются циклические изменения параметров 2-го контура.

– Отравление – разотравление реактора.

Преимущества: если правильно выбрать время разгрузки блока, реактивность в процессе отравления –разотравления будет повторять график мощности энергосистемы.

Недостатки: низкое быстродействие.

С целью определения оптимального алгоритма суточного маневра мощностью АКЗ ВВЭР-1000, в работах [48–50, 62, 63] был предложен следующий алгоритм суточного маневра мощностью АКЗ.

Пусть энергоблок работает на номинальной мощности, ксеноновые колебания подавлены при помощи перемещения регулирующей группы. Первоначальное снижение (до 90 %) мощности РУ осуществляется вводом раствора борной кислоты, поддерживая при этом неизменной температуру теплоносителя на входе в реактор за счет повышения давления в ГПК. Вводом рабочей группы поддерживается оптимальный мгновенный АО как гарантия невозникновения ксеноновых колебаний.

В дальнейшем снижение мощности происходит за счёт отравления. Оп-

тимальный мгновенный АО удерживается за счет изменения положения рабочей группы. Приблизительно через 2-3 ч мощность реактора достигнет 80 % и вводом «чистого дистиллята» будет стабилизирована. После прохождения максимума «йодной ямы» мощность РУ частично восстановится за счёт разотравления.

Для восстановления номинальной мощности РУ вводится «чистый дистиллят» в контур с одновременным снижением давления в ГПК, что позволяет сохранить постоянной температуру входа. Регулирующая группа ОР СУЗ извлекается из АКЗ для поддержания оптимального мгновенного АО. После достижения номинального уровня мощности автоматический регулятор поддерживает его на заданном уровне. Подавление возникающих ксеноновых колебаний осуществляется перемещением регулирующей группы.

Таким образом, предложен алгоритм с умеренным изменением средней температуры первого контура и начального давления во втором контуре в диапазоне мощности от 100 до 80 % номинальной, тогда как при мощности менее 80 % номинальной используется ПР с постоянным начальным давлением пара во втором контуре.

Преимущества этого алгоритма: сравнительно небольшое число переключений, что снижает вероятность ошибочных действий персонала; уменьшение расхода чистого дистиллята и борного концентрата; уменьшенное количество дебалансных вод; улучшение условий работы топлива.

Предлагаемый алгоритм, подразумевающий при суточном маневре мощностью в пределах от 100 до 80 % номинала поддержание постоянной входной температуры теплоносителя при изменении давления пара в ГПК в пределах 58-60 бар, имеет описанные выше преимущества ПР с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре. При этом, за счет поддержания давления пара в парогенераторе и ГПК в регламентных пределах, предлагаемый алгоритм лишен описанных выше недостатков, присущих ПР с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре.

Сравним эффективность двух алгоритмов суточного манёвра мощностью энергоблока с ВВЭР-1000: предлагаемого алгоритма (альтернативного) и алгоритма, прошедшего испытания на Хмельницкой АЭС 18.04.2006 г (апробированного) [48–50].

Апробированный алгоритм:

- снижение мощности до 80 % за 1 ч;
- эксплуатация на мощности 80 % в течение 7 ч;
- повышение мощности до номинальной в течение 2 ч.

Альтернативный алгоритм:

- снижение мощности до 90 % в течение 0,5 ч вводом раствора борной кислоты;
- дальнейшее снижение мощности до 80 % в течение 2,5 ч за счёт отравления реактора;
- эксплуатация на мощности 80 % в течение 4 ч;
- повышение мощности до номинальной в течение 2 ч.

С помощью ПС ИР [27] выполнено сравнение этих двух алгоритмов суточного маневра мощностью. Высотная неравномерность поля энерговыделения описывается аксиальным офсетом, рассчитываемым как процентное отношение разности мощностей верхней P_v и нижней P_n половин АКЗ к полной мощности АКЗ [59]:

$$AO = \frac{P_v - P_n}{P_v + P_n} \cdot 100 \% . \quad (3.8)$$

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

В диссертации [50] с помощью ПС ИР для апробированного и альтернативного алгоритмов были рассчитаны в зависимости от времени τ мощность реактора $P(\tau)$, положение регулирующей группы стержней $H(\tau)$, мгновенный и равновесный АО(τ).

Автор отметил, что «Верхняя регламентная граница положения регулирующих стержней для ВВЭР-1000 – 90 % от низа АКЗ. Как правило, на номинальной мощности операторы поддерживают именно такое положение регулирующей группы ОР СУЗ. Поэтому для рассматриваемых алгоритмов манёвр начинается при $H = 90\%$ от низа АКЗ. Нижнее положение регулирующих стержней для апробированного алгоритма – $H = 78\%$, тогда как для альтернативного – $H = 84\%$. Таким образом: для альтернативного алгоритма в два раза уменьшается амплитуда необходимого движения регулирующей группы ОР СУЗ.

Для апробированного алгоритма, в отличие от альтернативного, характерна значительная дивергенция мгновенного и равновесного АО: амплитуда изменения АО в ходе маневра Δ АО для апробированного алгоритма примерно в 10 раз больше, чем для альтернативного» [50].

Поскольку оболочки твэлов являются первым барьером безопасности и самой уязвимой частью АКЗ, в работе [48] было предложено для сопоставления эффективности алгоритмов маневрирования мощностью РУ учитывать совместно стабильность АО и поврежденность оболочек твэлов.

Применяя ЭВТП-метод, получена зависимость накопленной энергии необратимых деформаций ползучести оболочки твэла РУ типа ВВЭР от числа эффективных суточных циклов нагружения для апробированного и альтернативного алгоритмов суточного маневра мощностью – рис. 3.10.

Результаты сравнительного анализа эффективности апробированного и альтернативного алгоритмов суточного маневра мощностью приведены в табл. 3.5 [26, 48, 49].

В работе [48] был сделан вывод, что, принимая во внимание меньшее число переключений для ввода жидкого поглотителя и чистого дистиллата во время маневра мощностью, незначительную дивергенцию графиков мгновенного и равновесного АО, меньшую амплитуду изменения

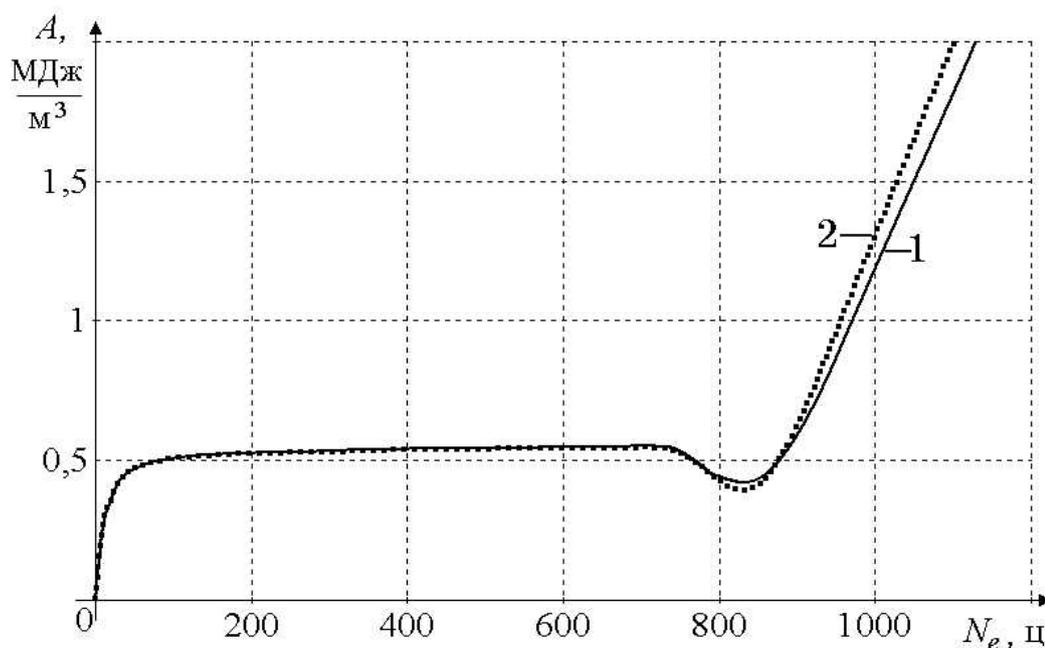


Рис. 3.10. Зависимость $A(N_e)$: 1, 2 – апробированный и альтернативный алгоритм суточного маневра мощностью, соответственно

Таблица 3.5

Сравнение эффективности двух алгоритмов суточного маневрирования

Алгоритм	ΔAO	КИУМ	$N_{e,0}$, эф. сут
апробированный	$\Delta AO_{\text{апр}} = 10 \cdot \Delta AO_{\text{альт}}$	0,929	704,6
альтернативный	$\Delta AO_{\text{альт}}$	0,942	705,9

линейной мощности в ходе маневра, более высокий КПД-брутто турбоустановки за счет более высокого КИУМ для альтернативного алгоритма, а также не меньшее прогнозируемое время эксплуатации оболочки твэла по альтернативному алгоритму, можно заключить, что альтернативный алгоритм суточного маневра мощностью более предпочтителен по сравнению с апробированным алгоритмом.

Необходимо отметить, что данный подход к оценке долговечности оболочки твэла в переменном режиме нагружения РУ, основанный на расчете количества эффективных суток $N_{e,0}$ до начала стадии ускоренного роста ползучести, применялся в ранних публикациях по ЭВП-методу и в дальнейшем

показал свою неэффективность ввиду независимости $N_{e,0}$ от характеристик цикла нагружения РУ при малой частоте циклического нагружения твэла ($\nu \ll 1$ Гц)

3.6. Сравнение долговечности оболочек твэлов ТВС разных производителей

Хотя традиционно в РУ ВВЭР-1000 проекта В-320 НАЭК “Энергоатом” эксплуатируются ТВС производства корпорации «ТВЭЛ», национальная стратегия развития ядерной отрасли предполагает диверсификацию поставок ядерного топлива для АЭС Украины. Таким образом, необходимо учитывать возможность поставок в рамках международных проектов (аналогичных проекту UNFQP-2009) партий кассет 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 [10].

Поэтому важно иметь независимую, альтернативную методику определения того, какой тип ТВС будет ограничивать ресурс АКЗ в случае ее смешанной (состоящей из нескольких типов ТВС) топливной загрузки, при работе РУ не только в базовом, но и в переменном режимах.

В работах [52, 53] предложена методика сравнения долговечности оболочек твэлов в режиме переменных нагрузок для различных вариантов топливной загрузки РУ ВВЭР-1000.

Согласно расчетной модели, длина твэла делилась на 10 АС, для центральной точки каждого из которых задавалась своя величина линейной мощности, пропорциональная текущему уровню мощности РУ. Линейная мощность в других точках АС находилась экстраполяцией значений в цен-

тральных точках. Результаты расчетов эквивалентной деформации ползучести и удельной энергии рассеяния будут приводиться для пятого, максимально нагруженного АС твэла (без учета влияния амплитуды перемещения ОР СУЗ).

ПС FEMAXI-5, используемому для расчета развития напряженно-деформированного состояния в оболочке твэла, присущи некоторые общие недостатки, характерные для современных кодов, анализирующих поведение топлива, а именно:

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

В качестве материала топливной таблетки в ПС FEMAXI выбрана двуокись урана, следовательно, если пренебречь различиями между технологиями изготовления топлива, влияющими на свойства топлива, модели физических процессов в топливе, заложенные в код, соответствуют топливу, применяемому как в ТВС производства корпорации "Westinghouse", так и в ТВС производства "ТВЭЛ".

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, применяемому в УТВС и ТВС-A (циркониевый сплав Э-110).

Таким образом, при использовании ПС FEMAXI-5 для оценки долговечности оболочки твэла возникает проблема корректного задания (в качестве исходных данных) свойств материалов топлива и оболочки.

С учетом этого ограничения, присущего коду, в данной работе выполнялось сравнение долговечности и эффективности эксплуатации твэлов различных типов ТВС, принимая во внимание только различия в их конструктивной реализации.

В соответствии с [8], 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 продуктов деления;
- коэффициент диффузии атомов газа в сферической твердой матрице;
- рост зерна топлива;
- испускание газообразных продуктов деления из-за формирования оболочной 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, набухание, 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-Xe [37].

В качестве материала топливных таблеток для всех сравниваемых типов ТВС принималась спеченная двуокись урана, а в качестве материала оболочки – циркалой марки SR (с отпущенными напряжениями) [8].

Для сравнительного анализа выбраны УТВС (серийная ТВС реактора ВВЭР-1000 проекта В-320), ТВС-А производства ОКБМ им. И.И. Африкантова и ТВС-W фирмы "Westinghouse" [17]. Одинаковые и различающиеся конструктивные характеристики твэлов указанных типов ТВС, режимные характеристики РУ ВВЭР-1000, принятые в качестве исходных данных при сравнительном анализе долговечности оболочки твэла различных топливных загрузок РУ ВВЭР-1000, приведены в табл. 2.1–2.3.

Рассматривался следующий комбинированный цикл переменного нагружения РУ (5 сут – (100 % + 75 %), 2 сут – 50 %). По будням – суточный цикл нагружения:

- в течение 16 ч – работа на 100 %;
- в течение 1 ч – снижение мощности РУ до 75 %;
- в течение 6 ч – работа на 75 %;
- в течение 1 ч – подъем мощности до 100 %.

В последний час каждого пятого расчетных суток, вместо подъема мощности до 100 %, в течение 1 ч выполняется снижение мощности РУ до 50 %, затем в течение 47 ч – работа РУ на 50 %. В последний час каждого седьмых расчетных суток выполняется подъем мощности РУ до 100 %.

Для максимально нагруженного радиального сегмента центрального (пятого) АС оболочки средненагруженного твэла трех указанных типов ТВС рассчитана зависимость A от количества эффективных суток N комбинированного цикла нагружения РУ (рис. 3.11).

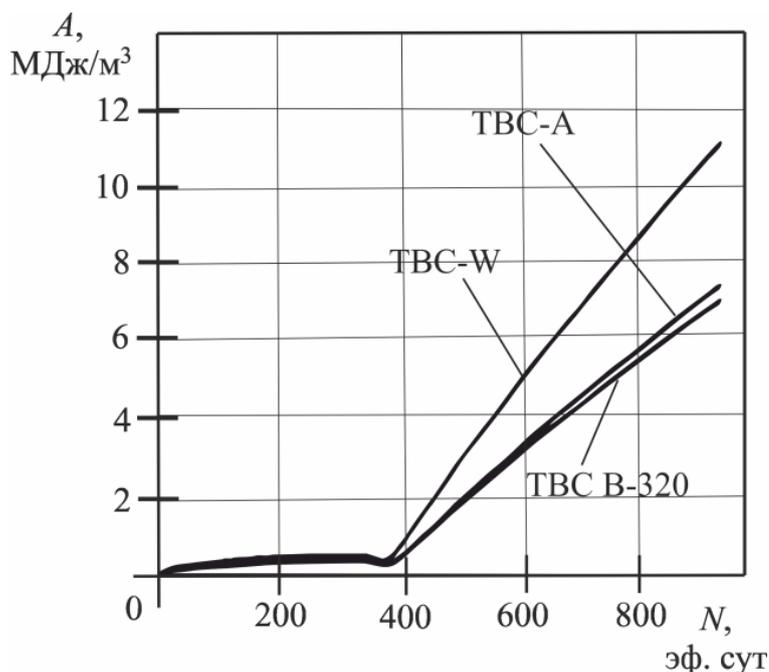


Рис. 3.11. Зависимость $A(N)$ для оболочки твэла ТВС В-320, ТВС-А и ТВС-В при комбинированном цикле нагружения

Максимальное значение $A(\tau)$ достигается для твэла ТВС-В с топливной таблеткой без центрального отверстия [53].

На рис. 3.12 для трех указанных типов ТВС представлена расчетная зависимость накопленной удельной энергии необратимой деформации ползучести A материала оболочки от числа эффективных суток N при эксплуатации РУ в базовом режиме нагружения.

На момент выполнения работы [53] еще не был предложен подход к расчету величины A_0 по предельному условию (3.1). Поскольку среди трех рассматриваемых вариантов ТВС максимальная величина удельной энергии рассеяния A достигается для ТВС-В как при эксплуатации в базовом, так и в переменном режиме нагружения РУ, то в работе [53] для сравнительной оценки поврежденности оболочек твэлов различных типов ТВС в базовом режиме нагружения принята величина A , достигнутая после эксплуатации ТВС-В в течение 900 эффективных суток в базовом режиме нагружения $A_6(900)=16,03$ МДж/м³.

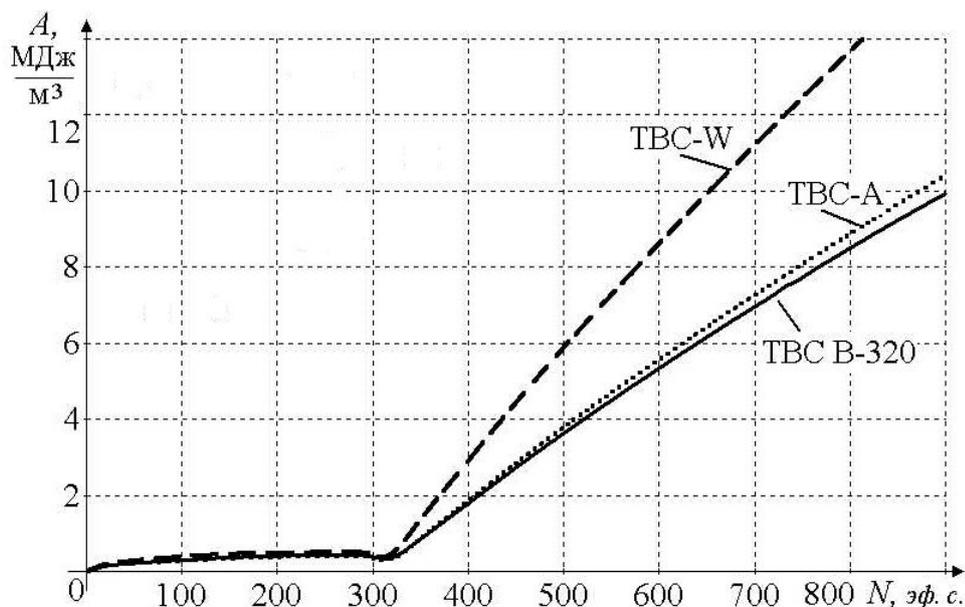


Рис. 3.12. Зависимость $A(N)$ для оболочки твэла ТВС В-320, ТВС-А, ТВС-В при базовом режиме нагружения РУ (100 %)

Аналогичным образом, в переменном режиме нагружения в качестве аналога A_0 принималась величина A , достигнутая после непрерывной работы ТВС-В в течение 900 эффективных суток в переменном режиме нагружения $A_n(900)=11,51$ МДж/м³. Используя $A_b(900)$ и $A_n(900)$, сравнительную оценку долговечности оболочек различных типов ТВС можно выполнить путем расчета для каждого типа ТВС величины относительной удельной энергии рассеяния, $A_{отн} = A(900)/A_b(900)$ – в базовом и $A_{отн} = A(900)/A_n(900)$ – в переменном режиме нагружения соответственно (табл. 3.6).

Таблица 3.6

$A_{отн}$ после 900 эффективных суток

Параметр	Базовый режим (100 %)			Переменный режим		
	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
$A_{отн}, \%$	62	65	100	63,5	67,1	100

В работе [53] был сделан вывод, что поскольку в паспортных данных на ТВС не содержится необходимых сведений по свойствам материалов топлива и оболочки, для корректного расчета долговечности оболочки твэла ТВС различных типов необходимо провести расчеты по предлагаемой методике на основе свойств материалов, предоставляемых разработчиками соответствующих ТВС.

В связи с этим, НАЭК “Энергоатом” целесообразно требовать от производителей ТВС предоставления полной информации по свойствам топлива, необходимой для независимого, альтернативного сравнительного анализа долговечности оболочек твэлов.

3.7. Чувствительность оценки поврежденности оболочки твэла к неопределенности в задании параметров

В работе [16] выполнен анализ чувствительности оценки поврежденности оболочки твэла реактора ВВЭР-1000, работающего в режиме переменных нагрузок, к неопределенности в задании основных режимных и конструктивных параметров АКЗ. Анализировалось поведение твэла ТВС-А. Режимные характеристики АКЗ ВВЭР-1000 и конструктивные характеристики ТВС-А разработки ОКБМ им. И. И. Африкантова задавались в соответствии с [17], за исключением материала оболочки (циркалой-4) [8].

Длина твэла делилась на 10 АС. Результаты расчета удельной энергии рассеяния материала оболочки приводятся ниже для пятого АС. Зависимости накопленной удельной энергии рассеяния $A(N)$ материала оболочки от количества эффективных суток N построены для цикла переменного нагружения РУ (5 сут – 100 % +75 %, 2 сут – 50 %).

Величина A_0 определялась как $A(\tau)$ в момент потери устойчивости τ_0 материала оболочки при достижении равенства между эквивалентным напря-

жением $\sigma_e^{\max}(\tau)$ для максимально нагруженного аксиального сегмента твэла и пределом текучести $\sigma_0^{\max}(\tau)$ для точки, расположенной на внутренней поверхности центрального аксиального сегмента и имеющей максимальную температуру:

$$\sigma_e^{\max}(\tau_0) = \sigma_0^{\max}(\tau_0). \quad (3.9)$$

Способ определения величины A_0 в соответствии с критерием (3.9) поясняется на рисунках.

На рис. 3.13 показана зависимость удельной энергии рассеяния $A(N)$ для материала оболочки SR-циркалой от времени в виде функции от количества эффективных суток N , для цикла переменного нагружения РУ (5 сут –100 % +75 %, 2 сут – 50 %) при трех значениях диаметра центрального отверстия таблетки $d_{\text{отв}}$: базовом – в соответствии с [17], увеличенном на 20 % и уменьшенном на 20 %.

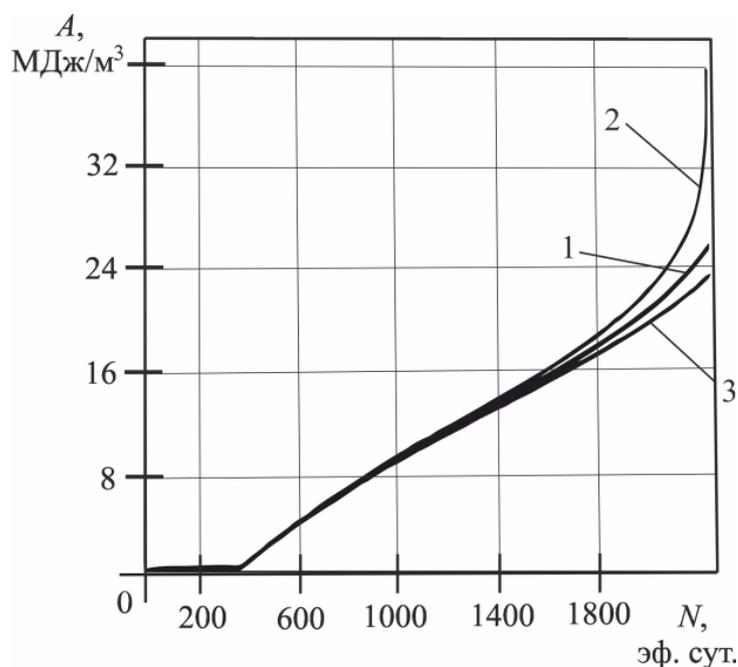


Рис. 3.13. Зависимость $A(N)$ для $d_{\text{отв}}$: 0,14 см - базовый (1), 0,112 см (2) и 0,168 см (3)

При уменьшении диаметра центрального отверстия таблетки (остальные

режимные параметры АКЗ и конструктивные параметры ТВС фиксированы и задаются в соответствии с [17]) накопленная удельная энергия рассеяния материала оболочки значительно увеличивается в области глубоких выгораний (больших N).

На рис. 3.14 показано достижение условия (3.9) в момент потери устойчивости материала оболочки $\tau_0 = 2074$ эф. сут для случая, когда $d_{отв}$ уменьшен на 20 % по сравнению с проектным значением.

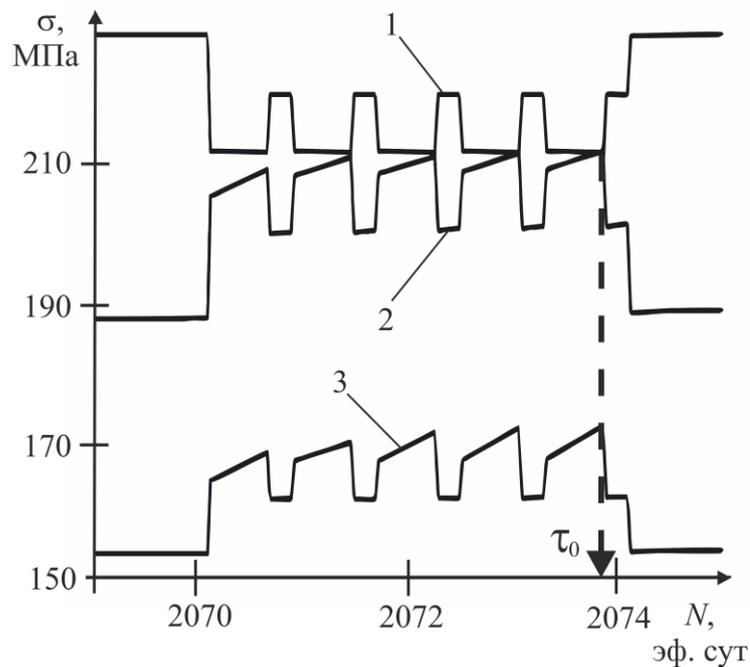


Рис. 3.14. Определение времени τ_0 для уменьшенного на 20 % $d_{отв}$:

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

Видно, что условие (3.9) для случая, когда $d_{отв}$ увеличен на 20 % по сравнению с проектным значением, в момент времени $N = 2074$ эф. сут не выполняется. Получив для уменьшенной на 20 % величины $d_{отв}$ значение $\tau_0 = 2074$ эф. сут, соответствующая величина $A_0 = 25,5$ МДж/м³ определяется на основе зависимости $A(N)$ – рис. 3.15.

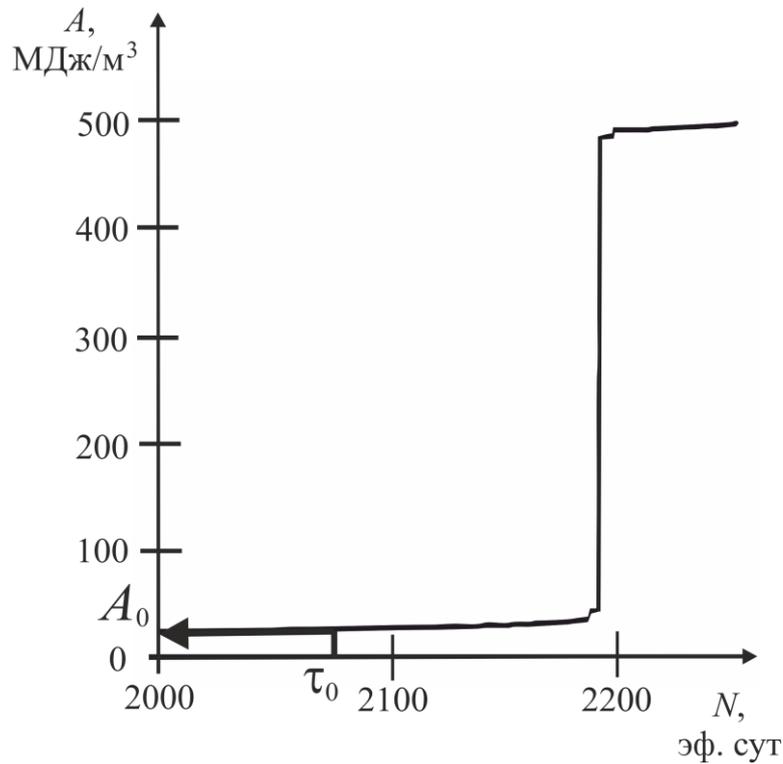


Рис. 3.15. Определение величины A_0 для уменьшенного на 20 % $d_{отв}$

Определив по этой методике характерную для начала разрушения материала оболочки удельную энергию рассеяния A_0 для конкретного набора режимных параметров АКЗ и конструктивных параметров ТВС (в данном случае $d_{отв}$ уменьшен на 20 %, тогда как остальные параметры проектные), можно для любого момента времени, после любого количества циклов переменного нагружения определить значение параметра поврежденности материала оболочки.

В работе [16] относительная разница $\Delta A_i(N)$ между удельной энергией рассеяния $A_i(N)$ для набора параметров $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{i,0} + \Delta X_i, \dots, X_{k,0}\}$ и удельной энергией рассеяния $A_0(N)$ для базового набора параметров $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{i,0}, \dots, X_{k,0}\}$, зависящая от количества эффективных суток N и отклонения ΔX_i i -го варьируемого параметра, определялась выражением

$$\Delta A_i(N) = \frac{A_i(N) - A_0(N)}{A_0(N)}. \quad (3.10)$$

В табл. 3.7–3.9 приведены значения $\Delta A_i(N)$ при варьировании ΔX_i (остальные параметры при этом фиксированы) после непрерывной работы по указанному циклу переменного нагружения в течение $n \times 250$ эф. сут, где $n = 1, 2, \dots, 9$.

В работе [16] сделан вывод, что основные режимные параметры АКЗ и конструктивные параметры ТВС по степени чувствительности к неопределенности в их задании результата оценки долговечности оболочки твэла в режиме переменных нагрузок могут быть условно разделены на 3 группы.

К 1-й группе относятся параметры, неопределенность в задании которых несущественно влияет на результат оценки долговечности оболочки (табл. 3.7).

Таблица 3.7

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

N , эф. сут		250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250
$\Delta(T_{\text{PL}} - T_{\text{Т/Н}})$ $\equiv \Delta X_1$, %	+20	-0,01	+0,25	-0,03	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
	-20	0,00	-0,04	-0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
$\Delta R_{\text{GR}} \equiv$ ΔX_2 , %	+20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,03
	-20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12
$\Delta U_{235} \equiv$ ΔX_3 , %	+20	0,25	-1,00	-0,64	-0,53	-0,50	-0,44	-0,41	-0,30	-0,12
	-20	-0,24	1,28	0,63	0,55	0,49	0,43	0,37	0,28	0,11
$\Delta V_{\text{PL}} \equiv$ ΔX_4 , %	+20	-0,19	0,12	-0,02	0,03	0,03	0,02	0,00	-0,02	-0,09
	-20	0,19	-0,14	-0,16	-0,06	-0,05	-0,03	0,00	0,02	0,10

Используя выражение (3.10) для относительной разницы $\Delta A_i(N)$ между удельной энергией рассеяния $A_i(N)$ для набора параметров $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{i,0} + \Delta X_i, \dots, X_{k,0}\}$ и удельной энергией рассеяния $A_0(N)$ для базового набора параметров $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{i,0}, \dots, X_{k,0}\}$, варьированию разницы температур газа верхнего компенсационного объема и теплоносителя (т/н) $\Delta(T_{\text{PL}} - T_{\text{Т/Н}}) \equiv \Delta X_1 =$

+20 % соответствует следующая относительная разница между значениями удельной энергии рассеяния $\Delta A_1(N)$: $\Delta A_1(250) = -0,01$ %; $\Delta A_1(500) = +0,25$ %; и так далее (табл. 3.7).

Аналогичным образом, варьированию $\Delta(T_{PL} - T_{т/н}) \equiv \Delta X_1 = -20$ % соответствует следующая относительная разница между значениями удельной энергии рассеяния $\Delta A_1(N)$: $\Delta A_1(250) = 0,00$ %; $\Delta A_1(500) = -0,04$ %; и так далее.

Например, при $\Delta V_{PL} \equiv \Delta X_4 = -20$ % соответствующая относительная разница $\Delta A_4(1000)$ равна $-0,06$ % (табл. 3.7).

Таким образом, в работе [16] расчетным путем получена относительная разница $\Delta A_1(N)$, $\Delta A_2(N)$, $\Delta A_3(N)$, $\Delta A_4(N)$ при варьировании соответственно разницы температур $\Delta(T_{PL} - T_{т/н}) \equiv \Delta X_1$, начального размера зерна таблетки $\Delta R_{GR} \equiv \Delta X_2$, обогащения топлива по урану-235 $\Delta U_{235} \equiv \Delta X_3$, величины верхнего компенсационного объема твэла $\Delta V_{PL} \equiv \Delta X_4$.

Ко 2-й группе относятся параметры, неопределенность в задании которых слабо влияет на результат оценки долговечности оболочки (табл. 3.8).

В табл. 3.8: $a \equiv X_5$ – толщина оболочки; $P_{He,0} \equiv X_6$ – начальное давление гелия под оболочкой; $He_0 \equiv X_7$ – начальное содержание гелия в газовой смеси под оболочкой; $k_{UO_2} \equiv X_8$ – коэффициент теоретической плотности двуокиси урана; $P_{т/н}^{вх} \equiv X_9$ – давление т/н на входе в реактор; $w_{т/н} \equiv X_{10}$ – скорость т/н; $\delta \equiv X_{11}$ – шаг тепловыделяющих элементов; $d_{таб}^{н.о} \equiv X_{12}$ – диаметр центрального отверстия таблетки.

Следует отметить, что относительная разница $\Delta A_{12}(2250) = 1681$ %, соответствующая варьированию диаметра центрального отверстия таблетки $\Delta d_{таб}^{н.о} \equiv \Delta X_{12} = -20$ % (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 результат оценки долговечности оболочки (табл. 3.9).

Таблица 3.8

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

N , эф. сут		250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250
$\Delta a \equiv$ ΔX_5 , %	+6	-46,9	-10,2	-11,1	-12,1	-12,5	-12,4	-12,0	-11,3	-8,96
	-6	17,1	8,11	11,5	9,88	10,3	10,8	10,8	10,5	9,36
$\Delta P_{\text{He},0} \equiv$ ΔX_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
$\Delta \text{He}_0 \equiv$ ΔX_7 , %	-20	-6,03	1,00	0,64	0,38	0,36	0,41	0,44	0,67	1,76
$\Delta k_{\text{UO}_2} \equiv$ ΔX_8 , %	+3	2,77	-0,69	-0,69	-0,55	-0,48	-0,55	-0,62	-0,81	-1,50
	-3	-3,21	0,99	0,59	0,54	0,45	0,56	0,66	0,97	3,09
$\Delta P_{\text{T/H}}^{\text{BX}} \equiv$ ΔX_9 , %	+6	19,8	8,53	2,15	1,03	0,53	0,14	-0,12	-0,55	-1,52
	-6	-18,3	-8,20	-1,63	-0,74	-0,21	0,25	0,53	0,99	2,33
$\Delta w_{\text{T/H}} \equiv$ ΔX_{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	4,70	4,78
$\Delta \delta \equiv$ ΔX_{11} , %	+3	-0,68	-11,7	-4,97	-3,52	-2,90	-2,56	-2,34	-2,20	-2,29
	-3	0,84	13,4	5,82	4,44	3,60	3,19	2,90	2,76	2,89
$\Delta d_{\text{таб}}^{\text{UO}} \equiv$ ΔX_{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	16,81

Таблица 3.9

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

N , эф. сут		250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250
$\Delta d_{\text{об}}^{\text{H}} \equiv$ ΔX_{13} , %	+1	6,99	-14,4	-7,42	-6,99	-6,33	-5,72	-5,49	-5,81	-8,06
	-1	-48,7	9,04	4,11	2,19	1,55	1,48	1,75	2,57	12,6
$\Delta d_{\text{таб}} \equiv$ ΔX_{14} , %	+1	-34,4	5,67	3,42	1,96	1,25	1,11	1,36	2,06	6,61
	-1	6,55	-7,63	-2,80	-2,85	-2,48	-1,97	-1,87	-2,23	-4,36
$\Delta q_l^{\text{max}} \equiv$ ΔX_{15} , %	+20	192	288	167	136	127	132	326	689	862
	-20	-16,9	-84,0	-81,8	-69,4	-63,6	-61,0	-60,0	-60,5	-63,5
$\Delta T_{\text{T/H}}^{\text{BX}} \equiv$ ΔX_{16} , %	+6	147	147	70,8	52,3	44,9	40,6	37,3	35,7	37,7
	-6	-12,7	-84,8	-75,9	-52,8	-43,8	-38,1	-34,3	-31,5	-30,3

В табл. 3.9: $d_{\text{об}}^{\text{H}} \equiv X_{13}$ – наружный диаметр оболочки; $d_{\text{таб}} \equiv X_{14}$ – диаметр

таблетки; $q_l^{\max} \equiv X_{15}$ – максимальная линейная мощность в твэле; $T_{т/н}^{\text{вх}} \equiv X_{16}$ – температура т/н на входе в реактор.

Влияние неопределенности в задании параметров 1-й, 2-й и 3-й групп на расчетные величины момента времени потери устойчивости τ_0 материала оболочки и соответствующей энергии рассеяния 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 [16].

Таблица 3.10

**Влияние неопределенности в задании параметров 1-й группы на
результат расчета τ_0 и A_0**

Параметр исходных данных	Численная величина параметра исходных данных	τ_0 , эф. сут	A_0 , МДж/м ³
Разница температур газа верхнего компенсационного объема и т/н ($T_{\text{PL}} - T_{\text{т/н}}$), °С	25 (базовая величина)	2246	27,36
	30 (увеличение на 20 % по сравнению с базовой величиной)	2246	27,36
	20 (уменьшение на 20 % по сравнению с базовой величиной)	2246	27,36
Начальный размер зерна таблетки R_{GR} , мк	10 (баз.)	2246	27,36
	12 (+20 %)	2247	27,42
	8 (-20 %)	2240	27,20
Обогащение топлива по урану-235 U_{235}	0,044 (баз.)	2246	27,36
	0,053 (+20 %)	2243	27,25
	0,035 (-20 %)	2247	27,46
Верхний компенсационный объем твэла V_{PL} , см ³	0,21 (баз.)	2246	27,36
	0,25 (+20 %)	2247	27,37
	0,17 (-20 %)	2243	27,31

В работе [16] был сделан вывод, что основные режимные параметры АКЗ РУ ВВЭР-1000 и конструкционные параметры ТВС-А условно делятся на три группы по степени влияния неопределенности их задания на результат оцен-

ки долговечности оболочки твэла при работе РУ в режиме переменных нагрузок.

К группе незначительно влияющих параметров, неопределенность задания каждого из которых величиной 20 % приводит к неопределенности оценки времени потери устойчивости τ_0 не более 0,1 %, относятся (табл. 3.10):

- разница между температурами газа верхнего компенсационного объема и теплоносителя;
- начальный размер зерна таблетки;
- обогащение топлива по урану-235;
- верхний компенсационный объем твэла.

К группе слабо влияющих параметров, неопределенность в задании каждого из которых величиной 3 % приводит к неопределенности оценки τ_0 не более 2 %, относятся (табл. 3.11):

- толщина оболочки;
- начальное давление гелия под оболочкой;
- начальное содержание гелия в газовой смеси под оболочкой;
- коэффициент теоретической плотности двуокиси урана;
- давление теплоносителя на входе в реактор;
- скорость теплоносителя;
- шаг тепловыделяющих элементов;
- диаметр центрального отверстия таблетки.

К группе сильно влияющих параметров, неопределенность в задании каждого из которых величиной 3 % приводит к неопределенности оценки τ_0 более 2 %, относятся (табл. 3.12):

- наружный диаметр оболочки твэла;
- диаметр таблетки;
- максимальная линейная удельная плотность энерговыделения;
- температура теплоносителя на входе в реактор.

Таблица 3.11

**Влияние неопределенности в задании параметров 2-й группы
на результат расчета τ_0 и A_0**

Параметр исходных данных	Численная величина параметра исходных данных	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 % по сравнению с базовой величиной)	2230	24,26
	0,065 (уменьшение на 6 % по сравнению с базовой величиной)	2230	29,44
Начальное давление гелия под оболочкой $P_{\text{He},0}$, МПа	2,0 (баз.)	2246	27,36
	2,4 (+20 %)	2201	27,80
	1,6 (-20 %)	> 2250	—
Начальное содержание гелия в газовой смеси под оболочкой	100 (баз.)	2246	27,36
	80 (-20 %, при этом доля азота: 20 %)	2223	27,05
Коэффициент теоретической плотности двуоксида урана k_{UO_2}	0,95 (баз., плотность UO_2 : 10,41 г/см ³)	2246	27,36
	0,92 (-3 %, плотность UO_2 : 10,08 г/см ³)	2206	26,72
	0,98 (+3 %, плотность UO_2 : 10,74 г/см ³)	> 2250	—
Давление т/н на входе в реактор $P_{\text{т/н}}^{\text{вх}}$, МПа	15,84 (баз.)	2246	27,36
	16,79 (+6 %)	> 2250	—
	14,89 (-6 %)	2218	27,01
Скорость т/н $w_{\text{т/н}}$, м/с	5,64 (баз.)	2246	27,36
	5,98 (+6 %)	> 2250	—
	5,30 (-6 %)	2230	28,14
Шаг тепловыделяющих элементов δ , см	1,275 (баз.)	2246	27,36
	1,313 (+3 %)	> 2250	—
	1,237 (-3 %)	2235	27,81
Диаметр центрального отверстия таблетки $d_{\text{таб}}^{\text{ц.о}}$, см	0,140 (баз.)	2246	27,36
	0,168 (+20 %)	> 2250	—
	0,112 (-20 %)	2074	25,52
	0,136 (-3 %)	2215	26,98

Выбор материала оболочки сильно влияет на расчетную долговечность оболочки в режиме переменных нагрузок.

Таблица 3.12

Влияние неопределенности параметров 3-й группы на τ_0 и A_0

Параметр исходных данных	Численная величина параметра исходных данных	τ_0 , эф. сут	A_0 , МДж/м ³
Наружный диаметр оболочки $d_{об}^H$, см	0,910 (базовая величина)	2246	27,36
	0,919 (увеличение на 1 % по сравнению с базовой величиной)	> 2250	—
	0,901 (уменьшение на 1 % по сравнению с базовой величиной)	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 удельная плотность энерговыделения q_l^{max} , Вт/см (100 % мощности)	248 (баз.), при этом средняя плотность потока быстрых нейтронов: $\langle \Phi \rangle = 1 \cdot 10^{14}$ 1/(см ² ·с)	2246	27,36
	298 (+20 %), $\langle \Phi \rangle = 1,2 \cdot 10^{14}$ 1/(см ² ·с)	1576	37,69
	198 (-20 %), $\langle \Phi \rangle = 0,8 \cdot 10^{14}$ 1/(см ² ·с)	> 2250	—
Температура теплоносителя на входе в реактор $T_{т/н}^{вх}$, °С	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
	РА- циркалой	1447	10,09

В этой связи в работе [16] отмечено, что для более точной оценки долговечности оболочки необходимо выполнить адаптацию ПС FEMAXI-5 к сплаву Э-110, применяемому в качестве материала оболочки ТВС РУ типа ВВЭР-1000.

3.8. Уточненный анализ чувствительности оценки поврежденности оболочки ТВЭЛ к неопределенности в задании параметров

В работе [41] выполнен уточненный анализ чувствительности оценки поврежденности оболочки твэла к неопределенности в задании параметров. Основные факторы, определяющие $\omega(\tau)$, найдены для комбинированного цикла переменного нагружения ВВЭР-1000 вычислив усредненную относительную разницу $\delta A_{i,\pm}(\tau)$ между удельной энергией рассеяния $A_{i,\pm}(\tau)$ для 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 $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{i,0}, \dots, X_{k,0}\}$:

$$\delta A_{i,\pm}(\tau) = \frac{|A_{i,+}(\tau) - A_B(\tau)| + |A_{i,-}(\tau) - A_B(\tau)|}{2 \cdot A_B(\tau) \cdot \Delta X_i}, \quad (3.11)$$

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) [41].

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 РУ $T_{\text{вх}}$	5,6	при $T_{\text{вх}} \uparrow, \omega(\tau) \uparrow$
3	наружный диаметр оболочки $d_{\text{об}}^H$	4,19	при $d_{\text{об}}^H \uparrow, \omega(\tau) \downarrow$
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 РУ $w_{\text{вх}}$	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 РУ $P_{\text{вх}}$	0,13	при $P_{\text{вх}} \uparrow, \omega(\tau) \downarrow$

Главными ДФ являются $q_{l,\max}$ и $T_{\text{вх}}$, что создает предпосылку для управления свойствами твэлов [41]. После непрерывной 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 В/см (табл. 3.14) [51].

Таблица 3.14

$A(\tau)$ 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

Согласно этим результатам, 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).

3.9. Необходимость совместного учета показателей безопасности и экономичности при управлении свойствами твэлов

Долговечность оболочки твэла не описывает все аспекты безопасности, надежности и экономичности эксплуатации РУ, поэтому для максимальной эффективности эксплуатации РУ необходим критерий эффективности алгоритма маневрирования мощностью РУ [48, 49]. При построении критерия необходимо учитывать то, что РУ является системой, состоящей из элементов, взаимосвязанных физически и функционально.

Состояние РУ характеризуется: состоянием ее отдельных элементов; структурой системы, то есть динамическими и функциональными связями

между ее элементами; интегральными технико-экономическими характеристиками системы, описывающими эффективность эксплуатации системы в течение длительного времени; надежностью управления системой.

Следовательно, для сохранения целостности, безопасности, эффективности и надежности РУ необходимо сохранять:

- целостность и безопасность ключевых элементов РУ;
- неизменность структуры РУ, то есть стабильность динамических процессов, определяющих выполнение функций РУ;
- высокий уровень интегральных технико-экономических показателей эксплуатации РУ;
- высокий уровень надежности управления РУ.

Можно выделить следующие уровни анализа РУ как системы [48, 49]:

1-й уровень – элементарный – РУ рассматривается на уровне ее элементов. При анализе эффективности алгоритма маневрирования мощностью РУ на уровне ее элементов целесообразно рассматривать поврежденность оболочки твэла, служащей первым барьером безопасности (возможно дополнительно учитывать и другие важные для безопасности элементы РУ, например, корпус реактора).

2-й уровень – структурный – рассматривается структура РУ. При анализе эффективности алгоритма маневрирования мощностью на уровне структуры РУ целесообразно рассматривать стабильность энерговыделения в АКЗ, оцениваемую через стабильность АО (возможно дополнительно учитывать стабильность и других ключевых процессов, например, циркуляции теплоносителя в первом контуре).

3-й уровень – экономический – рассматриваются технико-экономические показатели эксплуатации РУ, например, КИУМ.

4-й уровень – управленческий – рассматривается надежность системы управления РУ, определяемая вероятностью безотказной эксплуатации $P_{6/0}$ всех систем управления (включая действия персонала), обеспечивающих ма-

неврирование мощностью РУ.

Для удобства анализа эффективности алгоритма маневрирования мощностью РУ в переменном режиме введены приведенные параметры для поврежденности оболочки, АО, КИУМ, вероятности безотказной эксплуатации всех систем управления, обеспечивающих маневрирование мощностью РУ:

$$\omega^* = |\omega - 1|, \quad (3.12)$$

где ω – параметр поврежденности оболочки;

ω^* – приведенный параметр поврежденности оболочки.

$$AO^* = 1 - |\Delta AO|, \quad (3.13)$$

где $|\Delta AO|$ – амплитуда изменения АО в ходе маневра;

AO^* – приведенный АО.

$$КИУМ^* = КИУМ \cdot \frac{10}{N_{\text{нераб}} + 10}, \quad (3.14)$$

где $КИУМ^*$ – приведенный КИУМ, учитывающий суммарное время простоев;

КИУМ – коэффициент использования установленной мощности РУ без учета времени простоев;

$N_{\text{нераб}}$ – количество суток простоя РУ, приходящееся на каждые 10 суток эксплуатации ВВЭР-1000 на 100 % мощности;

$$P_{\delta/o}^* = \prod_{i=1}^M P_{\delta/o,i}, \quad (3.15)$$

где $P_{\delta/o,i}$ – интегральная вероятность безотказной работы всех систем управления РУ (с учетом вероятности ошибок персонала), обеспечивающих маневрирование мощностью в ходе i -го переключения (оперативного действия);

M – необходимое число переключений при маневрировании мощностью.

Используя параметры $\{\omega^*; AO^*; КИУМ^*; P_{\delta/o}^*\}$ в качестве компонентов критерия эффективности алгоритма маневрирования мощностью РУ, точка с

координатами $(\omega^* = 1; AO^* = 1; \text{КИУМ}^* = 1; P_{\delta/o}^* = 1)$ соответствует предельному наилучшему переменному режиму эксплуатации, а $(\omega^* = 0; AO^* = 0; \text{КИУМ}^* = 0; P_{\delta/o}^* = 0)$ – предельному наихудшему переменному режиму.

Для действующих РУ с ВВЭР-1000 либо предусматриваются проектом, либо могут быть определены некоторые минимально допустимые с точки зрения надежности, безопасности и эффективности эксплуатации РУ значения $(\omega_{\min}^*; AO_{\min}^*; \text{КИУМ}_{\min}^*; P_{\delta/o,\min}^*)$. Допустимые значения компонентов критерия $\{\omega^*; AO^*; \text{КИУМ}^*; P_{\delta/o}^*\}$ при эксплуатации РУ в переменном режиме заключены в следующих диапазонах:

$$\omega_{\min}^* \leq \omega^* \leq 1; AO_{\min}^* \leq AO^* \leq 1; \text{КИУМ}_{\min}^* \leq \text{КИУМ}^* \leq 1; P_{\delta/o,\min}^* \leq P_{\delta/o}^* \leq 1. \quad (3.16)$$

Для наглядности область допустимых значений компонентов комплексного критерия $\{\omega^*; AO^*; \text{КИУМ}^*; P_{\delta/o}^*\}$ при эксплуатации ВВЭР-1000 в переменном режиме удобно представить без учета компонента $P_{\delta/o}^*$, что соответствует идеальному случаю, когда $P_{\delta/o}^* = 1$ (рис. 3.16).

На рис. 3.16 компоненты комплексного критерия ограничены следующими минимально допустимыми значениями:

$$\omega_{\min}^* = 0,5 (\omega_{\max} = 0,5); AO_{\min}^* = 0,95 (|\Delta AO| = 5\%); \text{КИУМ}_{\min}^* = 0,75. \quad (3.17)$$

Во всех допустимых переменных режимах эксплуатации точка $(\omega_i^*; AO_i^*; \text{КИУМ}_i^*; P_{\delta/o,i}^*)$ 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.

В работах [48, 49] сделан вывод, что мерой эффективности i -го алгоритма является близость точки $(\omega_i^*; AO_i^*; \text{КИУМ}_i^*; P_{\delta/o,i}^*)$ к точке А, которая определяется количественно следующим образом:

$$Eff_i = 1 - L_i / L_{\max}, \quad (3.18)$$

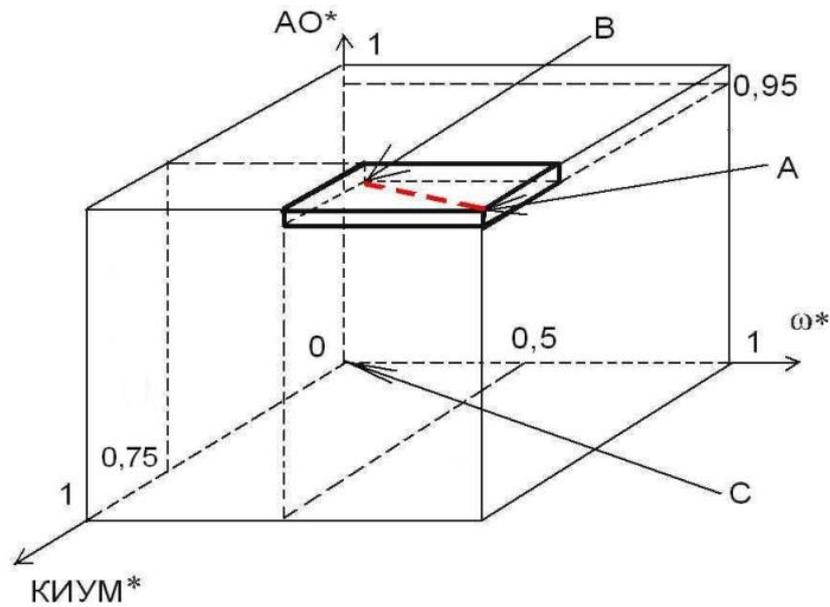


Рис. 3.16. Допустимая область эксплуатации ВВЭР-1000 в переменном режиме в пространстве трех компонентов критерия $\{\omega^*; АО^*; КИУМ^*; P_{6/o}^*\}$: А – предельный наилучший режим ($\omega^* = 1; АО^* = 1; КИУМ^* = 1$); В – предельный допустимый режим ($\omega_{\min}^*; АО_{\min}^*; КИУМ_{\min}^*; P_{6/o,\min}^*$); С – предельный наихудший режим ($\omega^* = 0; АО^* = 0; КИУМ^* = 0$)

$$\text{где } L_i = \sqrt{(1 - КИУМ_i^*)^2 + (1 - \omega_i^*)^2 + (1 - АО_i^*)^2 + (1 - P_{6/o,i}^*)^2}; \quad (3.19)$$

$$L_{\max} = \sqrt{(1 - КИУМ_{\min}^*)^2 + (1 - \omega_{\min}^*)^2 + (1 - АО_{\min}^*)^2 + (1 - P_{6/o,\min}^*)^2}; \quad (3.20)$$

Таким образом, критерий $\{\omega^*; АО^*; КИУМ^*; P_{6/o}^*\}$ позволяет численно оценивать эффективность того или иного алгоритма маневрирования мощностью РУ, анализируя состояние РУ на следующих четырех уровнях: элементарный; структурный; экономический; уровень надежности системы управления.

Это дает возможность одновременно учитывать требования целостности ключевых элементов РУ, стабильности ключевых физических процессов, протекающих в РУ, экономичности и управляемости РУ.

Используя критерий (3.18), в кандидатской диссертации [50] был прове-

ден модельный эксперимент по выбору наиболее эффективного алгоритма маневрирования мощностью РУ ВВЭР-1000/В-320. Рассматривались алгоритм суточного манёвра мощностью энергоблока с ВВЭР-1000, проходивший испытания на Хмельницкой АЭС 18.04.2006 г. (апробированный) и альтернативный алгоритм.

Апробированный алгоритм: снижение мощности РУ до 80 % номинальной за 1 ч; работа на мощности 80 % в течение 7 ч; повышение мощности до номинальной в течение 2 ч (используется ПР с постоянным начальным давлением пара во втором контуре).

Для поддержания заданного уровня мощности при разгрузке, в момент отравления реактора, вводился чистый конденсат. За три часа (с 23.00 до 2.00) операторы шесть раз включали подпитку чистого конденсата [50].

Общее количество переключений M_1 при маневрировании мощностью по апробированному алгоритму составило:

$$M_1 = 140. \quad (3.21)$$

Альтернативный алгоритм: снижение мощности до 90 % в течение 0,5 ч вводом раствора борной кислоты; дальнейшее снижение мощности до 80 % в течение 2,5 ч за счёт отравления реактора; работа на мощности 80 % в течение 4 ч; повышение мощности до номинальной в течение 2 ч (в диапазоне мощности от 100 до 80 % входная температура теплоносителя постоянна, а начальное давление пара во втором контуре изменяется в регламентных пределах 58...60 бар).

Общее количество оперативных действий M_2 при маневрировании мощностью по альтернативному алгоритму составило:

$$M_2 = 40. \quad (3.22)$$

На разных АЭС величина вероятности безотказной работы системы управления РУ, обеспечивающей маневрирование мощностью в ходе i -го оперативного действия, может значительно отличаться.

Благодаря внедренным организационно-техническим мероприятиям по

контролю переключений, на Запорожской АЭС вероятность отказа системы управления РУ (с учетом вероятности ошибок персонала), обеспечивающей маневрирование мощностью, в ходе одного переключения составляет 0,001 [50].

Тогда

$$P_{\bar{6}/o,i} = 0,999, \quad (3.23)$$

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

Вероятность безотказной работы системы управления РУ, обеспечивающей маневрирование мощностью по апробированному и альтернативному алгоритмам, имеет соответственно значения $P_{\bar{6}/o,1}^*$ и $P_{\bar{6}/o,2}^*$ [48, 49]:

$$P_{\bar{6}/o,1}^* \approx 0,869. \quad (3.24)$$

$$P_{\bar{6}/o,2}^* \approx 0,961. \quad (3.25)$$

Пусть заданы следующие минимально допустимые значения компонентов критерия $\{\omega^*; AO^*; \text{КИУМ}^*; P_{\bar{6}/o}^*\}$:

$$\omega_{\min}^* = 0,5; AO_{\min}^* = 0,95; \text{КИУМ}_{\min}^* = 0,75; P_{\bar{6}/o,\min}^* = 0,95 \quad (3.26)$$

Тогда по (3.20):

$$L_{\max} = 0,563. \quad (3.27)$$

Применяя ЭВТП-метод, получена зависимость накопленной энергии необратимых деформаций ползучести оболочки твэла ВВЭР-1000 (ТВС-А) от числа суточных циклов нагружения (в пересчете на эффективные сутки) для двух рассматриваемых алгоритмов (рис. 3.17).

Определение момента потери устойчивости $\tau_{0,2}$ материала оболочки твэла РУ ВВЭР-1000 (в эф. сут) при $q_{l,\max} = 298$ Вт/см поясняется на рис. 3.18 для альтернативного алгоритма.

Используя ЭВТП-метод, ПС ИР – для определения амплитуды изменения АО в ходе маневра, критерий $\{\omega^*; AO^*; \text{КИУМ}^*; P_{\bar{6}/o}^*\}$, получены характери-

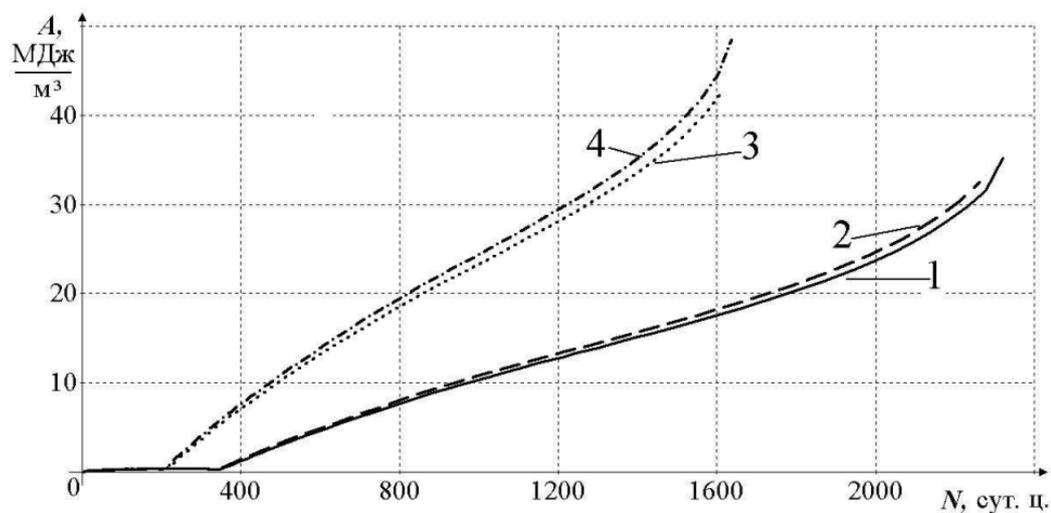


Рис. 3.17. Зависимость $A(N_e)$: 1, 3 – апробированный алгоритм для $q_{l,\max} = 248$ и 298 Вт/см, соответственно; 2, 4 – альтернативный алгоритм для $q_{l,\max} = 248$ и 298 Вт/см, соответственно

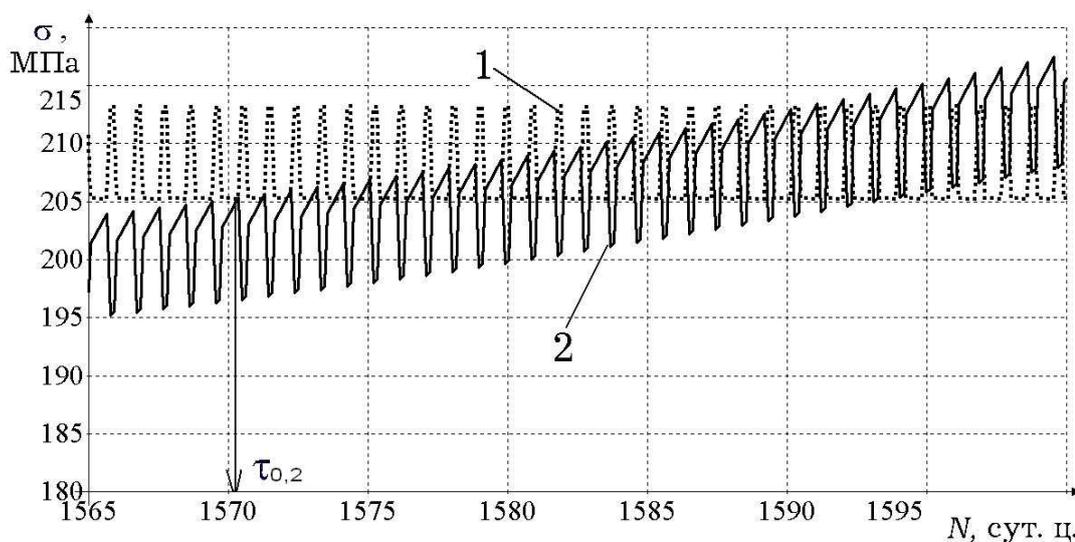


Рис. 3.18. Определение времени потери устойчивости материала оболочки $\tau_{0,2}$ в максимально нагретой точке оболочки для альтернативного алгоритма:

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

стики апробированного и альтернативного алгоритмов суточного маневра мощностью ВВЭР-1000 для $q_{l,\max} = 248$ Вт/см и 298 Вт/см (ТВС-А) – табл. 3.15, 3.16.

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 (1000 эф. сут)
248	Апроб.	3	0,929	29,59	2228	0,351
	Альтерн.	0,3	0,942	30,29	2209	0,357
298	Апроб.	3	0,929	41,15	1589	0,567
	Альтерн.	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*	$P_{6/o}^*$	L	Eff
248	Апроб.	0,649	0,774	0,97	0,869	—	—
	Альтерн.	0,643	0,785	0,997	0,961	0,419	0,256
298	Апроб.	0,433	0,774	0,97	0,869	—	—
	Альтерн.	0,424	0,785	0,997	0,961	—	—

Величины КИУМ*, приведенные в табл. 3.16, рассчитывались по (3.14) при $N_{\text{нераб}} = 2$.

На основе данных табл. 3.16 сделан вывод, что по результатам эксплуатации РУ ВВЭР-1000 в течение 1000 эф. сут альтернативный алгоритм суточного маневра мощностью предпочтительнее апробированного [48, 49].

При $q_{l,\max} = 248$ Вт/см точка $(\omega_i^*; AO_i^*; КИУМ_i^*; P_{6/o,i}^*)$ находится в пределах области допустимых значений, ограниченной диагональю АВ (рис. 3.16).

При $q_{l,\max} = 298$ Вт/см оба алгоритма характеризуются выходом точки $(\omega_i^*; AO_i^*; КИУМ_i^*; P_{6/o,i}^*)$ за пределы допустимой области.

Поскольку значение $q_{l,\max} = 298$ Вт/см соответствует максимально нагруженным твэлам в АКЗ ВВЭР-1000, то можно сделать выводы: в рамках принятых ограничений (3.26) непрерывная эксплуатация ВВЭР-1000 в течение 1000 эф. сут по обоим рассмотренным алгоритмам суточного маневрирова-

ния недопустима; поскольку в ПБЯ регламентируется максимальное количество негерметичных твэлов, для применения ЭВП-метода необходимо разработать вероятностную модель, учитывающую неопределенность в знании максимальной линейной мощности в твэле и других факторов, детерминирующих поврежденность оболочек; также необходимо учитывать плотность вероятности распределения максимальной линейной мощности по твэлам с учетом коэффициента радиальной неравномерности энерговыделения.

Предлагаемый подход позволяет определить допустимую длительность T непрерывной эксплуатации ВВЭР-1000 в переменном режиме исходя из требования нахождения точки $(\omega_i^*; \text{АО}_i^*; \text{КИУМ}_i^*; P_{6/o,i}^*)$ в пределах допустимой области для величины $q_{l,\max} = 298 \text{ Вт/см}$ (табл. 3.17).

Таблица 3.17

Допустимая длительность эксплуатации ВВЭР-1000

Алгоритм	T , эф. сут	ω^*	КИУМ*	АО*	$P_{6/o}^*$	L	Eff
апробир.	500	0,751	0,774	0,97	0,869	–	–
	600	0,679	0,774	0,97	0,869	–	–
	700	0,612	0,774	0,97	0,869	–	–
	800	0,549	0,774	0,97	0,869	–	–
	882	0,5	0,774	0,97	0,869	–	–
альтерн.	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	0,5	0,785	0,997	0,961	0,546	0,03
	882	0,493	0,785	0,997	0,961	–	–

Из данных табл. 3.17 следует, что предельно допустимая длительность эксплуатации РУ, лимитируемая $\omega_{\max}=0,5$, по апробированному и альтернативному алгоритмам равна $T_{\text{доп},1}=882$ эф. сут и $T_{\text{доп},2}=870$ эф. сут, соответственно, что дает относительную разницу $\Delta T_{\text{доп}} = (T_{\text{доп},1} - T_{\text{доп},2})/T_{\text{доп},1}$ около 1 %, находящуюся в пределах численной погрешности расчетной модели.

Альтернативный алгоритм имеет преимущество перед апробированным, поскольку при сохранении долговечности оболочки на том же уровне, характеризуется более высокими показателями использования установленной мощности РУ, стабильности поля энерговыделения, надежности системы управления РУ [48, 49].

3.10. Определение максимально нагруженного аксиального сегмента оболочки ТВЭЛ

В первых работах по ЭВТП-методу в качестве допущения принималось, что максимально нагруженным является центральный АС ТВЭЛ, для которого выполнялась оценка поврежденности оболочки. При условии количества АС $n = 8$ центральными АС будут сегменты 4 и 5, имеющие одинаковую среднюю линейную мощность, если не учитывать наличие АО и влияние размещения ОР СУЗ в АКЗ реактора.

Однако, из-за размещения ОР в верхней части АКЗ ВВЭР-1000 следует ожидать, что наиболее значительные относительные скачки линейной мощности в ТВЭЛ при увеличении мощности РУ (например, от 80 до 100 % номинала) будут не в центре АКЗ, а в ее верхней части. Поэтому для более корректного анализа поврежденности оболочки ТВЭЛ в переменном режиме необходимо найти влияние переменного режима на все АС ТВЭЛ, а не только на его центральный АС, с учетом различия в величинах стационарной мощности и скачка мощности между разными АС и ТВС.

3.10.1. Определение амплитуды скачка мощности аксиальных сегментов ТВЭЛ

Амплитуда скачка мощности АС ТВЭЛ при увеличении мощности РУ ВВЭР-1000 с 80 до 100 % была определена для альтернативного алгоритма

суточного маневра мощностью.

Допущения анализа: при увеличении мощности реактора с 80 до 100 % изменяется положение лишь десятой группы ОР, другие группы ОР при маневре мощностью полностью выведены из АКЗ; используется усовершенствованный алгоритм управления мощностью АКЗ (У-алгоритм); положение десятой группы ОР для уровней мощности ВВЭР-1000 80 и 100 % задавалось 84 и 90 % от низа АКЗ, соответственно; используются верифицированные ПС: ИР – для расчета амплитуды скачка мощности АС твэла [42], FEMAXI – для расчета напряжений в оболочке твэла [29].

Задавая режимные характеристики РУ ВВЭР-1000 в соответствии с [17], найдено, что все ТВС по амплитуде увеличения их мощности при росте мощности АКЗ N с 80 до 100 % (в 1,25 раз) могут быть условно разделены на три группы (табл. 3.18) [64–66].

Таблица 3.18

Увеличение мощности ТВС

Группа	Количество ТВС	Рост мощности ТВС, %	Порядковый номер ячеек 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 мощностью РУ, кроме 10-й группы ОР СУЗ, применяются также 8-я и 9-я группы – рис. 3.19.

В случае, если при маневрировании применяется только 10-я группа ОР, примером неблагоприятной для целостности оболочек твэлов истории перестановок ТВС в АКЗ может считаться следующая последовательность

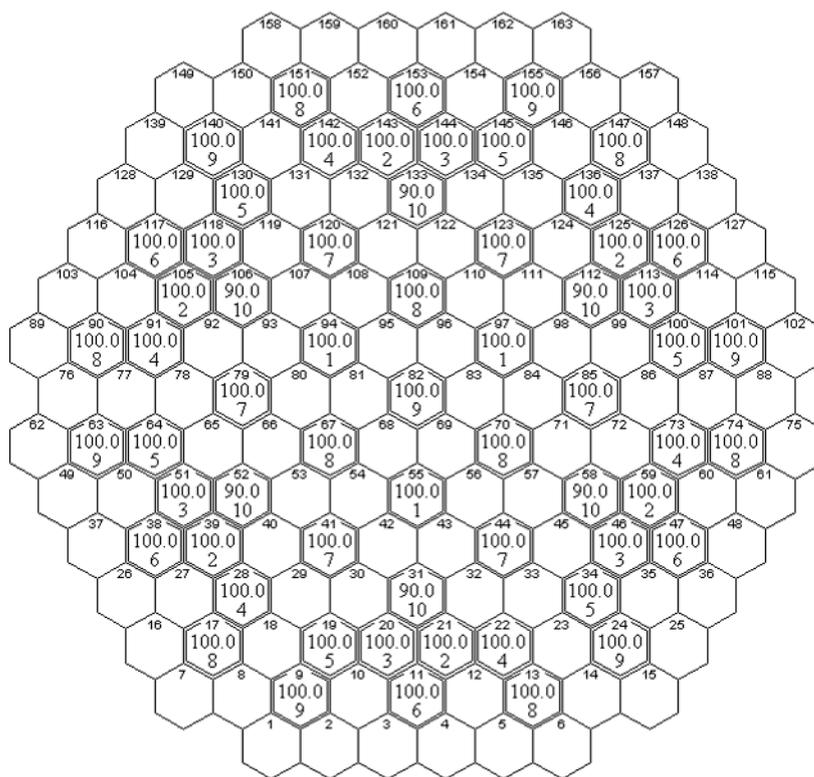


Рис. 3.19. Размещение ОР в АКЗ ВВЭР-1000 для У-алгоритма управления мощностью АКЗ: верхняя, средняя и нижняя цифра – номер ТВС, положение группы ОР (% от низа АКЗ), номер группы ОР, соответственно

перестановок ТВС в течение 4-летней кампании: в течение 1-го года ТВС стоит в 55-й ячейке АКЗ – в составе 2-й (условно выделенной) группы ТВС; в течение 2-го года ТВС стоит под регулированием в 31-й ячейке – в составе 1-й группы; в течение 3-го года ТВС стоит в 69-й ячейке – в составе 2-й группы; в течение 4-го года ТВС стоит в центральной 82-й ячейке – в составе 2-й группы.

С помощью ПС ИР для $N = 80$ и 100% найдена средняя линейная мощность ТВС № 55, 31, 69, 82 при маневрировании мощностью по альтернативному алгоритму – табл. 3.19.

Согласно данным табл. 3.19, средняя расчетная мощность указанных ТВС (при $N=100\%$) в течение четырех лет составляет для У-алгоритма 18,6 МВт.

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
$K_q(j)$	1,22	1,23	1,24	1,27	0,9	0,91	0,63	0,64
$Q_j, \text{МВт}$	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

Вместе с тем, на пятом блоке ЗАЭС, на котором не применяется У-алгоритм управления мощностью АКЗ реактора ВВЭР-1000, для 21-й кампании средняя мощность ТВС ($N=100$ %) в течение четырех лет составила 17,7 МВт. Таким образом, задавая У-алгоритм управления мощностью АКЗ, обеспечивается консервативность оценки величины параметра повреждения оболочки в переменном режиме по альтернативному алгоритму маневрирования.

На основе соотношений (2.2)–(2.4) с помощью ПС ИР рассчитано изменение $\langle q_{l,i,j} \rangle$ для всех аксиальных слоев указанных ТВС при изменении мощности РУ от 100 до 80 % по альтернативному алгоритму (рис. 3.20–3.23).

При анализе повреждения оболочки твэла в переменном режиме по ЭВТП-методу с помощью ПС FEMAXI необходимо учесть, что в FEMAXI число расчетных АС n может задаваться различным, но не более 12.

Было доказано, что при увеличении количества АС с $n = 8$ до $n = 12$ расчетная оценка с помощью программы FEMAXI долговечности оболочки твэла реактора типа ВВЭР-1000 меняется менее чем на 1 % [9].

При уменьшении количества АС в твэле n с 12 до 8 расчетная оценка $\omega(\tau)$ менялась менее чем на 1 % [65]. Рассчитав при $n = 8$ значения $\langle q_{l,i,j} \rangle$ для $N=80$ и 100 %, получив отношение $\langle q_{l,i,j} \rangle$ при $N = 100$ и 80 % для ТВС, размещенных в указанных ячейках, максимум различия между 1-м и 8-м АС по величине относительного скачка $\langle q_{l,i,j} \rangle$ был в ячейке № 31.

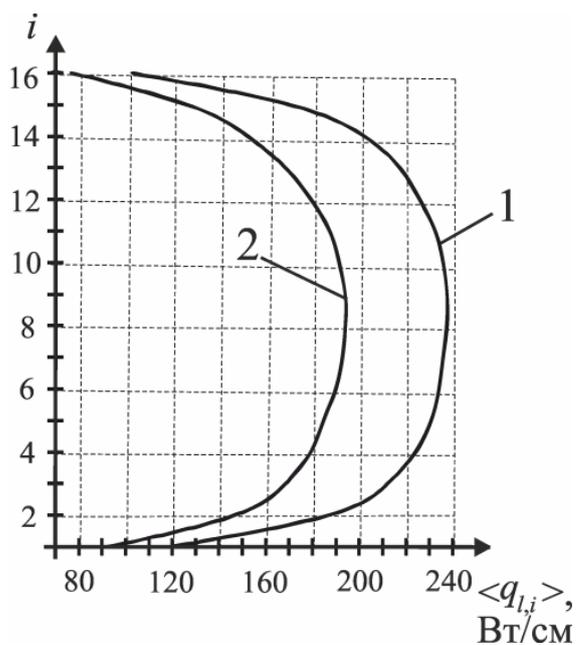


Рис. 3.20. Распределение средней линейной мощности по аксиальным слоям ТВС № 55: 1 – $N = 100\%$;
2 – $N = 80\%$

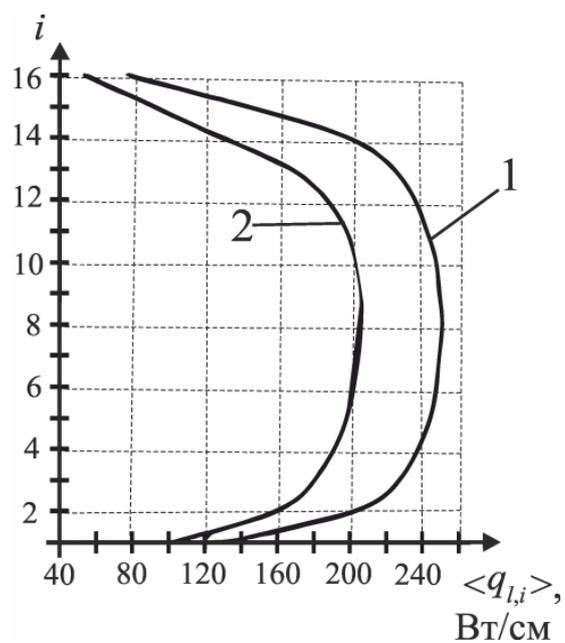


Рис. 3.21. Распределение средней линейной мощности по аксиальным слоям ТВС № 31: 1 – $N = 100\%$;
2 – $N = 80\%$

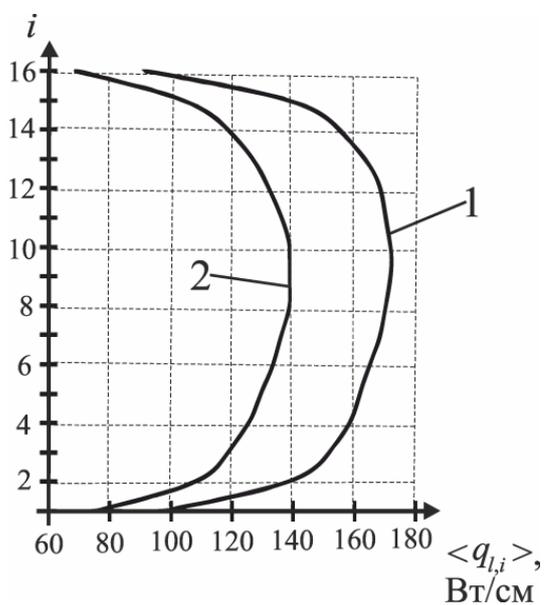


Рис. 3.22. Распределение средней линейной мощности по аксиальным слоям ТВС № 69: 1 – $N = 100\%$;
2 – $N = 80\%$

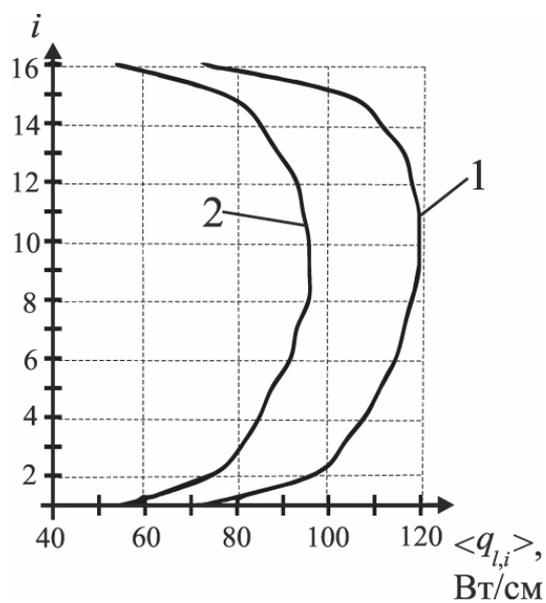


Рис. 3.23. Распределение средней линейной мощности по аксиальным слоям ТВС № 82: 1 – $N = 100\%$;
2 – $N = 80\%$

Принимая при анализе долговечности оболочки твэла, что длина твэла условно разделена на восемь АС и каждый АС содержит два аксиальных слоя, т.е. $m = 2 \cdot n$, при мощности реактора 80 и 100 % для указанных ТВС рассчитаны средние значения линейной мощности $\langle q_{l,i,j} \rangle$ по АС.

Отношение средних линейных мощностей для АС указанных ТВС при $N = 100$ и 80 % приведено в табл. 3.20 (мощность РУ изменялась от 100 до 80 % по альтернативному алгоритму).

Таблица 3.20

Отношение средних линейных мощностей для АС при $N = 100$ и 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

При увеличении мощности РУ с 80 до 100 % различие между первым и восьмым аксиальными сегментами по величине относительного скачка линейной мощности в твэле наиболее значительно для ТВС № 31, находящейся под регулированием (табл. 3.20).

3.10.2. Расчет аксиального распределения поврежденности оболочки

При расчете параметра повреждения материала оболочки твэла ВВЭР-1000 в качестве материала топливных таблеток для ТВС-А принималась спеченная двуокись урана, а в качестве материала оболочки – циркалой-4 (SR). Конструктивные характеристики твэла ТВС-А и режимные характеристики

РУ ВВЭР-1000, служащие исходными данными при анализе аксиального распределения повреждения оболочки твэла в режиме суточного маневрирования мощностью РУ по альтернативному алгоритму, задавались в соответствии с [17]. Распределение линейной мощности в твэле по аксиальной координате z 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	1,00	0,997	0,993	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	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 разрушения оболочки твэла записывался в виде, позволяющем учесть прочностной критерий приемки твэла SC2:

$$\omega(\tau) = A(\tau) / A_0 = 1; A(\tau) = \int_0^{\tau} \sigma_e \cdot \dot{p}_e \cdot d\tau; \sigma_e^{\max}(\tau_0) = \eta \cdot \sigma_0^{\max}(\tau_0), \quad (3.28)$$

где $\omega(\tau)$ – параметр повреждения оболочки твэла в момент времени τ ;

$A(\tau)$ – удельная энергия рассеяния в момент времени τ , Дж/м³;

A_0 – удельная энергия рассеяния в момент потери устойчивости τ_0 материала оболочки, при достижении равенства $\sigma_e^{\max}(\tau_0) = \eta \cdot \sigma_0^{\max}(\tau_0)$;

$\sigma_e^{\max}(\tau), \sigma_0^{\max}(\tau)$ – соответственно эквивалентное напряжение (Па) и предел текучести (Па) в точке оболочки анализируемого аксиального сегмента твэла, имеющей максимальную температуру;

η – некоторый коэффициент, $\eta \leq 1$;

$\dot{\rho}_e$ – скорость эквивалентной деформации ползучести, c^{-1} .

Используя критерий (3.28) при $\eta = 1$, получено аксиальное распределение поврежденности оболочки твэла при условии размещения какой-либо ТВС в 55-й ячейке АКЗ в течение всего времени пребывания данной ТВС в АКЗ (алгоритм перестановок 55-55-55-55), а также при условии ее размещения в 55-й ячейке только в течение первых 360 сут, а в течение всего последующего времени пребывания в АКЗ – в 31-й ячейке АКЗ (алгоритм перестановок 55-31-31-31) – рис. 3.24, 3.25.

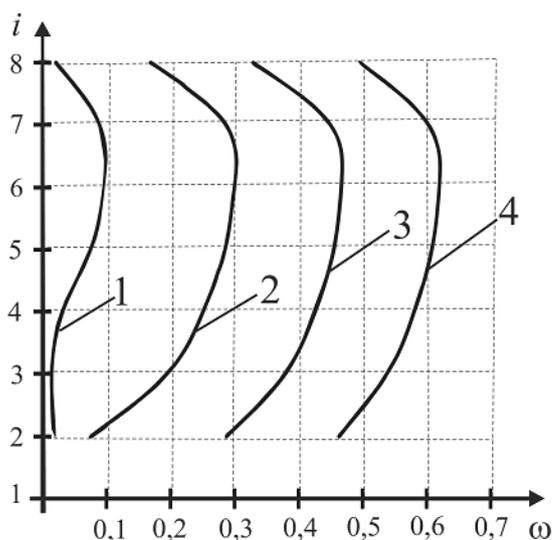


Рис. 3.24. Аксиальное распределение $\omega(\tau)$ при алгоритме 55-55-55-55:
1 – 360 сут; 2 – 720 сут; 3 – 1080 сут; 4 – 1440 сут

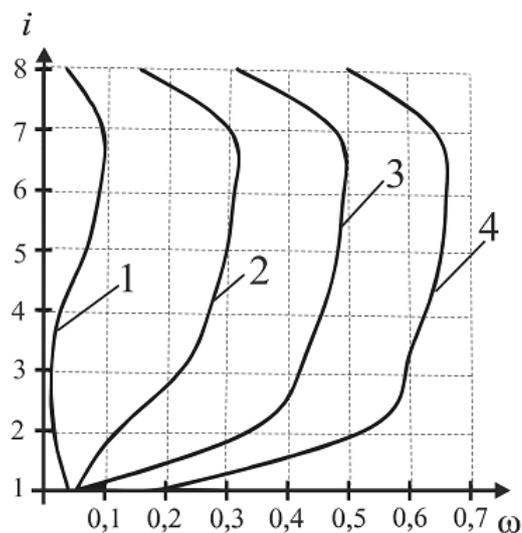


Рис. 3.25. Аксиальное распределение $\omega(\tau)$ при алгоритме 55-31-31-31:
1 – 360 сут; 2 – 720 сут; 3 – 1080 сут; 4 – 1440 сут

При размещении ТВС по алгоритмам перестановок 55-55-55-55 и 55-31-31-31, наибольшее значение $\omega(\tau)$ достигается для 6-го и 5-го АС (рис. 3.24, 3.25). При алгоритмах 55-31-69-69 и 55-31-69-82, наибольшее значение $\omega(\tau)$

достигается также для 6-го и 5-го АС [45–48].

Для первого АС оболочки, при условии размещения ТВС в 55-й ячейке в течение всего времени пребывания ТВС в АКЗ, потери устойчивости оболочки в соответствии с критерием (3.28) при $\eta = 1$ не происходит вплоть до $\tau = 2480$ сут (при $\tau > 2480$ сут расчет не выполнялся).

При условии размещения ТВС в течение первых 360 сут в 55-й ячейке, в течение следующих 360 сут – в 31-й ячейке, а в течение остального времени пребывания в АКЗ – в 69-й ячейке (алгоритм перестановок 55-31-69-69), для всех АС потери устойчивости оболочки в соответствии с критерием (3.28), $\eta = 1$ не происходит вплоть 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 условии размещения ТВС в течение первых 360 сут в 55-й ячейке, в течение следующих 360 сут – в 31-й ячейке, в течение следующих 360 сут – в 69-й ячейке (алгоритм перестановок 55-31-69-82), а в течение остального времени пребывания в АКЗ – в 82-й ячейке, для всех АС потери устойчивости оболочки в соответствии с критерием (3.28), $\eta = 1$ не происходит вплоть до $\tau = 2495$ сут (при $\tau > 2495$ сут расчет не выполнялся) – табл. 3.23.

Используя критерий (3.28), получено аксиальное распределение поврежденности оболочки для АС с четвертого по седьмой включительно при алгоритме перестановок ТВС 55-31-69-69 ($\eta = 0,75$), а также при алгоритме перестановок 55-31-69-82 ($\eta = 0,6$) – рис. 3.26 и 3.27, соответственно.

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

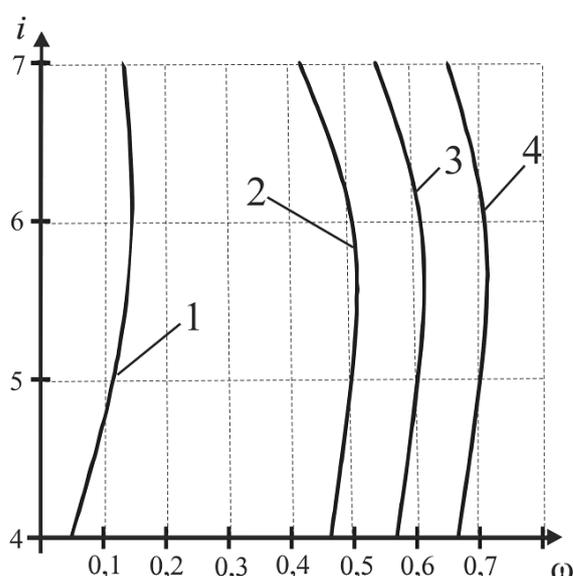


Рис. 3.26. Аксиальное распределение $\omega(\tau)$ при алгоритме перестановок ТВС 55-31-69-69: 1 – 360 сут; 2 – 720 сут; 3 – 1080 сут; 4 – 1440 сут

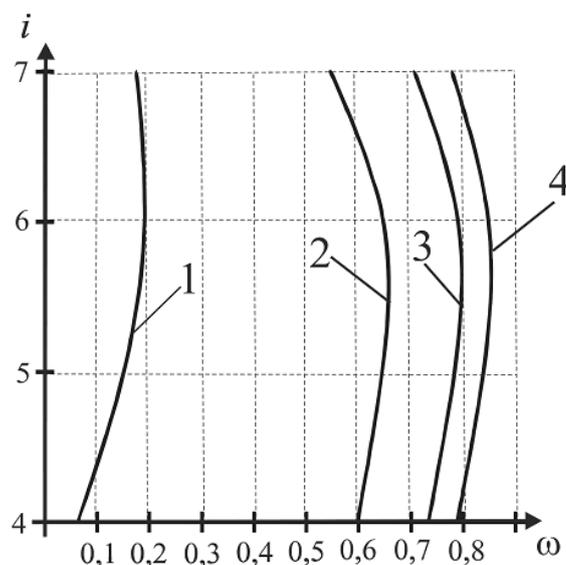


Рис. 3.27. Аксиальное распределение $\omega(\tau)$ при алгоритме перестановок ТВС 55-31-69-82: 1 – 360 сут; 2 – 720 сут; 3 – 1080 сут; 4 – 1440 сут

Для восьмого АС, а также для АС с первого по третий включительно при алгоритме перестановок ТВС 55-31-69-69 момент потери устойчивости материала оболочки по критерию (3.28), $\eta = 0,75$ не достигался вплоть до $\tau = 2480$ сут.

При алгоритме перестановок ТВС 55-31-69-82 для восьмого АС, а также для АС с первого по третий включительно момент потери устойчивости материала оболочки по критерию (3.28), $\eta = 0,6$ не достигался вплоть до

$\tau = 2495$ сут.

Смещение максимума $\omega(\tau)$ из 5-го АС вверх (в сторону 6-го АС) при учете размещения ОР в АКЗ отражает тот факт, что наиболее значительные относительные скачки линейной мощности в твэле при увеличении мощности РУ наблюдаются не в центре АКЗ, а в ее верхней части. При условном разбиении длины твэла на 8 равных АС, максимально опасными с точки зрения разгерметизации оболочки по механизму накопления $\omega(\tau)$ за счет ползучести являются 6-й и 5-й АС.

Учитывая циклическое изменение мощности и режимных параметров РУ для альтернативного алгоритма суточного маневрирования мощностью, принимая во внимание размещение ОР в АКЗ для У-алгоритма и перестановки ТВС в ходе четырехлетней кампании, получено, что $\omega(\tau)$ максимальна в АС оболочки, расположенных между координатами $z = 1,8$ и $2,7$ м считая от самого нижнего края самой нижней топливной таблетки твэла. Локализация АС с максимумом $\omega(\tau)$ создала предпосылку для разработки метода управления свойствами твэлов [41].

Выполненные расчеты аксиального распределения $\omega(\tau)$ [64–66] показали, что ЭВТП-критерий (3.28) 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 вплоть до $\tau \approx 6,8$ календарных лет (при больших τ анализ не проводился), что вынуждает вводить числовой параметр $\eta \leq 1$;

2) На основе критерия (3.28) не удастся удовлетворить необходимое для управления ресурсом оболочек твэлов требование

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

3.11. Влияние скорости коррозии оболочки на скорость накопления поврежденности

Хотя при разработке ЭВП-метода в качестве исходного допущения было принято, что влияние коррозии на долговечность оболочки ограничивается оптимизацией состава и процесса термической обработки сплавов, необходимо оценить влияние увеличения толщины окисного слоя оболочки со стороны теплоносителя на скорость накопления поврежденности.

Для оценки скорости коррозии циркалоевой оболочки чаще всего используются модели EPRI и MATPRO-A [8]. 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 также консервативна [8, 13, 27, 68–70].

Для варьирования модельной скорости коррозии использовался корректирующий параметр $k_{COR} = var$

$$\dot{S} = (1 + k_{COR}) \cdot \dot{S}, \quad (3.29)$$

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

Смещение ω^{\max} в 6-й АС в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000 получено для модели коррозии MATPRO-A при $k_{COR} = 1$.

Для алгоритма 55-31-69-82 и АС 6 получено, что время начала стадии ускоренного роста ползучести при $k_{COR} = -0,4; 0; 1; 2$ (MATPRO-A) существенно различное. При повышении скорости коррозии оболочки время начала ускоренной ползучести уменьшается (рис. 3.28) [13, 67].

Аналогичный результат был получен для модели коррозии EPRI.

Расчет для интервала времени [0; 2400 сут] средней температуры $\langle T_{об,вн} \rangle$ на внутренней поверхности оболочки (алгоритм суточного маневра мощностью с $T_{вх} = const$, АС 6, модель коррозии EPRI, алгоритм перестановок ТВС 55-31-69-82) позволяет сделать вывод, что влияние скорости коррозии наружной поверхности оболочки на скорость изменения $A(\tau)$ коррелирует с

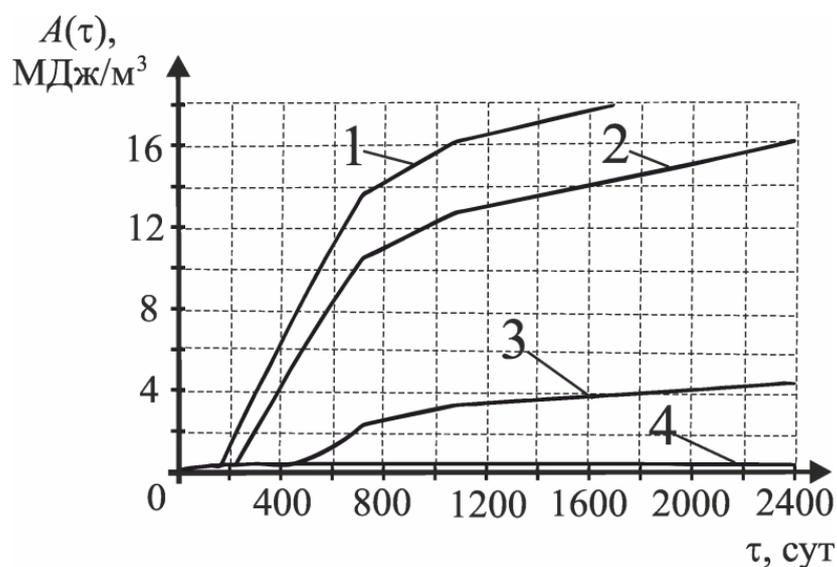


Рис. 3.28. Изменение удельной энергии рассеяния для 6-го АС, модель коррозии MATPRO-A: 1, 2, 3, 4 – $k_{COR} = 2, 1, 0, -0,4$, соответственно

зависимостью $\langle T_{об,вн} \rangle$ от скорости коррозии (табл. 3.24).

Таблица 3.24

**Средняя температура внутренней поверхности оболочки
в зависимости от k_{COR}**

k_{COR}	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-V, скорость эквивалентной деформации ползучести $\dot{p}_e(\tau)$ увеличивается при увеличении $\langle T_{об,вн} \rangle$.

Следовательно, скорость коррозии оболочки со стороны воды (k_{COR}) влияет на расчет $A(\tau)$ через $\dot{p}_e(\tau)$, зависящую от толщины металлической фазы оболочки (k_{COR}).

Для $\Delta\tau = 11; 5; 2$ ч рассматривался цикл переменного нагружения 100-80-100 % $N_{НОМ}$ (коэффициент использования установленной мощности

КИУМ=0,9): снижение N от 100 до 80 % в течение 1 ч – $N = 80$ % в течение Δt ч – повышение N до $N_{\text{ном}}=100$ % в течение 1 ч – $N = 100$ % в течение Δt ч, что отвечает соответственно $\nu=1; 2; 4$ цикл/сут ($\nu \ll 1$ Гц). Анализировался АС 6 средненагруженного твэла ТВС 55-й ячейки (при $N=100$ % $q_l^{\text{max}}=229,2$ Вт/см) для модели коррозии оболочки EPRI ($k_{\text{COR}}=1, T_{\text{ex}}=\text{const}$).

Расчет времени потери устойчивости τ_0 оболочки в зависимости от ν 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 нет (увеличение τ_0 на 1-1,5 % характеризует систематическую погрешность расчета τ_0 и вызвано увеличением в 2-4 раза количества точек истории нагружения). 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 ν

ν , цикл/сут	$\eta=0,4$		$\eta=0,6$	
	A_0 , МДж/м ³	τ_0 , сут	A_0 , МДж/м ³	τ_0 , 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

Таким образом, результаты расчетов долговечности оболочки твэла в условиях АКЗ ВВЭР-1000 по ЭВТП-модели находятся в качественном соответствии с экспериментальными результатами [11].

При $N = 100$ % для средненагруженного твэла ТВС ячеек № 55; 31; 69; 82 максимальная линейная мощность q_l^{max} равна 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.

3.12. Достоверность расчета поврежденности оболочки твэла по ЭВТП-методу

Результаты расчета поврежденности оболочки твэла легководного реактора по ЭВТП-методу являются достоверными, поскольку

1) Энергетический вариант теории ползучести является экспериментально подтвержденным [7, 39, 43, 44].

2) Преобладание процесса ползучести в деформационном разрушении тонкой оболочки при частоте ее циклического нагружения $\ll 1$ Гц, а при также термомеханических нагрузках, близких к характерным для АКЗ легководного реактора типа ВВЭР, доказано несколькими независимыми экспериментами [11, 39].

3) ЭВТП-метод учитывает ползучесть как основной физический процесс деформационного разрушения оболочки твэла и последовательность изменения всех основных факторов эксплуатации твэла в АКЗ.

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

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

6) Результаты расчетов поврежденности оболочки твэла по ЭВТП-методу соответствуют экспериментальным результатам [11, 39] на качественном уровне.

7) В ЭВТП-методе используются верифицированные ПС.

8) Методология управления свойствами твэлов легководного реактора на основе учета накопленной в нормальных условиях поврежденности их оболочек создана на примере широко применяемого в качестве материала оболочки твэла циркониевого сплава циркалой-4, для описания изменения свойств которого в АКЗ легководного реактора типа ВВЭР-1000 существуют универсальные и проверенные временем эмпирические зависимости.

Для дальнейшего повышения точности расчета по ЭВП-методу поврежденности оболочки твэла требуется адаптация ПС, рассчитывающего развитие напряженно-деформированного состояния в твэле, к материалам оболочки и топлива, применяемым в конкретной ТВС.

Использование ЭВП-метода подразумевает учет всех нормативных методов оценки долговечности оболочки твэла ВВЭР-1000, основанных на использовании лимитирующих зависимостей для критериев приемки твэлов, разбитых на четыре группы (прочностные, деформационные, теплофизические и коррозионные).

Главным препятствием к управлению поврежденностью оболочек твэлов в режиме нормальной эксплуатации ВВЭР-1000 является принципиальная ошибочность прочностного критерия SC4, отражаемая в коэффициенте запаса для этого критерия, равном $K=10$.

Принимая вместо SC4 критерий долговечности оболочки на основе ЭВП, имеющий коэффициент запаса $K=2$, сопоставимый с коэффициентами запаса для остальных критериев приемки твэла ($K=1...1,5$), становится возможным осуществить управление поврежденностью оболочек твэлов в нормальных условиях их эксплуатации ввиду не только уменьшенной в пять раз неопределенности при расчете поврежденности, но также в силу такого важного свойства ЭВП-критерия, как независимость лимитирующего компонента критерия от условий нагружения твэла.

Использование физически обоснованного ЭВП-критерия не отрицает контроля выполнения ограничений по всем остальным критериям приемки твэла, имеющим коэффициент запаса в пять и более раз меньше, чем SC4.

Решение проблемы управления поврежденностью оболочек твэлов при их нормальной эксплуатации подразумевает отказ от критерия SC4, не позволяющего управлять поврежденностью оболочек в принципе, и переход от сосредоточенной модели изменения поврежденности к распределенной.

3.13. Сопоставление результатов оценки ресурса оболочки по критерию SC4 и ЭВП-критерию

В результате расчетов по ЭВП-методу скорости коррозии оболочки (модель МАТPRO-A) и $A(\tau)$ для условий 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 [10] – рис. 3.29.

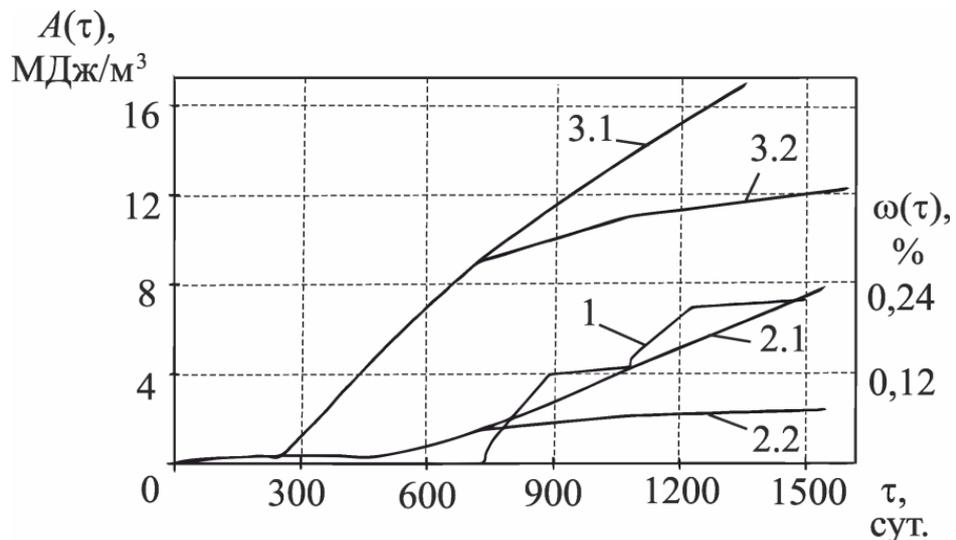


Рис. 3.29. Зависимости $A(\tau)$ [13] и $\omega(\tau)$ [10]: 1 – $\omega(\tau)$ для Э-110; 2.1, 2.2 – $A(\tau)$, $k_{\text{cor}}=0$; 3.1, 3.2 – $A(\tau)$, $k_{\text{cor}}=1$

На рис. 3.29: 2.1, 2.2 – алгоритмы перестановок ТВС 55-31-55-55 и 55-31-69-82, соответственно; 3.1, 3.2 – алгоритмы перестановок ТВС 55-31-55-55 и 55-31-69-82, соответственно.

Однако, в работе [10] не приведены условия эксплуатации твэла (например, алгоритм перестановок ТВС) и использованные при расчете $\omega(\tau)$ значения ограничивающих компонентов критерия SC4.

Скорость роста $A(\tau)$ существенно зависит от алгоритма перестановок ТВС в АКЗ, что объясняется влиянием $q_{l,\text{max}}$ – одного из двух выделенных главных факторов, детерминирующих $\omega(\tau)$, и является предпосылкой для

управления свойствами твэлов при эксплуатации легководного реактора.

При повышении скорости коррозии оболочки время наступления стадии ускоренного роста ползучести значительно уменьшается (рис. 3.29).

При использовании критерия SC4 подавляющий вклад в величину $\omega(\tau)$ вносит усталостная составляющая [10], что на качественном уровне не соответствует экспериментальным результатам [11, 39] и расчетам на основе ЭВТП-модели [13].

Контроль максимального тангенциального напряжения σ_0^{\max} , пластической деформации оболочки, а также максимальной температуры $T_{OK,H}^{\max}$ на наружной поверхности окисной пленки показал, что долговечность оболочки для исследованных условий не ограничивается по критериям SC1 и SC5, а также по условию $T_{OK,H}^{\max} \leq 352$ °С [17], что является предпосылкой для использования ЭВТП-метода.

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

Таблица 3.26

B_U и p_e для АС 6

Параметр	55-31-69-82		55-31-55-55	
	0	1	0	1
k_{COR}				
B_U , 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

Скорость роста $A(\tau)$ сильно зависит от алгоритма перестановок ТВС, что является предпосылкой для управления свойствами твэлов.

Поскольку алгоритм перестановок ТВС, характеризуемый меньшей p_e , одновременно характеризуется меньшей эффективностью использования

топлива, оцениваемой через глубину выгорания, целесообразно разработать метод управления перестановками на основе баланса между долговечностью оболочек и глубиной выгорания топлива [27].

Разработан ЭВТП-метод расчета поврежденности оболочки, учитывающий ползучесть как основной процесс ее разрушения при нормальных условиях эксплуатации. В результате применения ЭВТП-метода определена мера влияния параметров на поврежденность оболочки и получено, что максимальная линейная мощность в твэле и температурный режим теплоносителя определяют поврежденность оболочки.

Локализован сегмент, ограничивающий долговечность оболочки, что позволило минимизировать количество варьируемых и контролируемых параметров при моделировании изменения свойств твэла.

Показана целесообразность управления свойствами твэлов путем управления конструкционными параметрами твэла, температурным режимом теплоносителя и перестановками ТВС в АКЗ.

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

3.14. Выводы по третьему разделу

1. На основе учета ключевого механизма накопления поврежденности в оболочке твэла при маневрировании мощностью реактора (ползучесть), учета всей совокупности параметров режимов нормальной эксплуатации твэла и реактора, а также использования ЭВТП, разработан ЭВТП-метод оценки поврежденности оболочки твэла РУ с легководным реактором. ЭВТП-метод является универсальным, поскольку подходит для любого типа легководного реактора и любого материала оболочки твэла. ЭВТП-метод является физически обоснованным, поскольку учитывает весь комплекс эксплуатационных

факторов применительно к управлению ресурсом оболочек твэлов. Для лицензирования ЭВТП-метода целесообразно провести эксперименты, аналогичные [11, 39] для циркониевого сплава Э-110 украинского производства.

2. Лимитирующее значение удельной энергии рассеяния A_0 , входящее в ЭВТП-критерий разрушения оболочки, может находиться как на основе критерия прочности SC2, так и графическим методом на основе фундаментального принципа ЭВТП, заключающегося в независимости A_0 от параметров нагружения оболочки. Хотя при выявлении основных методов управления ресурсом оболочки ВВЭР-1000 определение A_0 на основе SC2 дало тот же качественный результат, что и на основе графического метода, при разработке практического метода управления ресурсом оболочек определение A_0 на основе SC2 не целесообразно, т.к. не позволяет записать критерий разрушения оболочки в одинаковом виде для всех рассматриваемых вариантов управления.

3. Систематическая погрешность ЭВТП-оценки долговечности оболочки на основе графического метода консервативного определения A_0 в 5 раз меньше систематической погрешности консервативной оценки долговечности оболочки по SC4. Для уменьшения консервативности оценки A_0 целесообразно провести эксперименты, аналогичные [11, 39] для циркониевого сплава Э-110 украинского производства.

4. Найдены режимные параметры реактора и конструкционные параметры твэла, определяющие условия разрушения оболочки твэла для переменного режима эксплуатации ВВЭР-1000, в результате чего проблема управления ресурсом оболочек твэлов разделяется на проблемы оптимизации конструкционных параметров твэла (диаметр и толщина оболочки; диаметр таблетки и ее центрального отверстия; эффективная плотность таблетки; начальное давление гелия под оболочкой и шаг решетки твэлов) и режимных параметров реактора ($q_{l,j,max}$; входные температура, давление и скорость теплоносителя;

и т.д.).

5. Принимая во внимание перестановки ТВС в АКЗ, учитывая размещение ОР СУЗ для У-алгоритма управления мощностью реактора ВВЭР-1000, получено, что АС, расположенные между $z = 1,8$ и $2,6$ м (АКЗ), являются наиболее нагруженными и ограничивают время эксплуатации оболочки при нормальных условиях ее эксплуатации. Тем самым обоснована ЭВТП-методика определения сегмента оболочки твэла, лимитирующего ее долговечность.

6. Для повышения долговечности оболочки твэла топливные таблетки, соответствующие максимально нагруженному АС, возможно изготавливать с центральными отверстиями. Для повышения долговечности твэла целесообразно разработать метод аксиального профилирования диаметра центрального отверстия таблеток в рамках метода управления конструкционными параметрами твэла.

7. Для условий АКЗ ВВЭР-1000 стадия ускоренного роста ползучести оболочки твэла вырождается при скорости коррозии оболочки со стороны теплоносителя на уровне 60 % от модельной для моделей коррозии сплава циркалой-4 МАТПРО-А и EPRI. Это доказывает возможность в течение по крайней мере 4 лет оставаться в пределах стадии установившейся ползучести оболочки, где эквивалентная деформация ползучести и общая радиальная деформация оболочки не превышают 1-2 %, при условии достаточной малости скорости коррозии оболочки со стороны теплоносителя. Тем самым разработана методика модельной оценки эксплуатационных условий, при которых влияние скорости коррозии оболочки твэла со стороны теплоносителя на суммарную поврежденность оболочки при переменном режиме эксплуатации РУ становится несущественным.

8. Расчет времени потери устойчивости τ_0 оболочки в зависимости от частоты нагружения оболочки ν 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 ($N=100\%$) наблюдается значительное сокращение τ_0 . Следовательно, результаты расчетов долговечности оболочки в условиях АКЗ ВВЭР-1000 по ЭВТП-методу находятся в качественном соответствии с экспериментальными результатами [11, 39].

9. В условиях АКЗ ВВЭР-1000 стадия ускоренного роста $A(\tau)$ (модель коррозии MATPRO-A) для циркалоя-4 (SR) наступает значительно раньше, чем стадия ускоренного роста $\omega(\tau)$ для сплава Э-110 по данным [10]. Скорость роста $A(\tau)$ существенно зависит от алгоритма перестановок ТВС в АКЗ. При повышении скорости коррозии оболочки время наступления стадии ускоренного роста ползучести значительно уменьшается. Использование модели MATPRO-A для коррозии циркалоевой оболочки в условиях АКЗ ВВЭР-1000 обеспечивает консервативность оценки долговечности оболочки твэла, изготовленной из сплава Э-110. При использовании критерия SC4 подавляющий вклад в величину $\omega(\tau)$ вносит усталостная составляющая [10], что на качественном уровне не соответствует экспериментальным результатам [11, 39] и расчетам на основе ЭВТП-модели [13].

10. Контроль максимального тангенциального напряжения, пластичной деформации оболочки, а также максимальной температуры $T_{ок,н}^{\max}$ на наружной поверхности окисной пленки показал, что долговечность оболочки для исследованных условий не ограничивается по критериям SC1 и SC5, а также по условию $T_{ок,н}^{\max} \leq 352\text{ °C}$ [17]. Следовательно, увеличение толщины окисного слоя на внешней поверхности оболочки не может вызвать превышение допустимого предела нормальной эксплуатации для температуры внешней поверхности раньше, чем будет достигнута потеря устойчивости материала оболочки по ЭВТП-критерию.

11. При оптимизации перестановок ТВС в АКЗ целесообразно, в дополнение к имеющимся методам оптимизации размещения ТВС на основе прин-

ципа минимизации радиального коэффициента неравномерности энерговыделения и вероятности разрушения оболочки при тяжелой аварии типа LOCA, разработать метод оптимизации перестановок на основе баланса между долговечностью оболочек твэлов и глубиной выгорания топлива.

РАЗДЕЛ 4

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ТВЭЛА И ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

4.1. Принципы критериальной модели эффективности управления свойствами твэлов

Для применения ЭВП-метода с учетом ограничивающих условий одновременно к безопасности и эффективности эксплуатации топлива [87–89] необходимо было разработать критериальную модель (КМ) эффективности управления свойствами твэлов [40, 41, 90–93].

Принципы КМ:

- целью управления свойствами твэлов является повышение эффективности эксплуатации твэлов за счет совместного учета поврежденности оболочек твэлов и экономико-технологических показателей эффективности эксплуатации РУ;

- управление свойствами твэлов осуществляется на основе требований к свойствам твэлов и АКЗ, определения контролируемых параметров и ДФ;

- структура критерия эффективности управления одинакова для всех задач управления, однако компоненты критерия неинвариантны;

- 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:

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

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

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

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

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;

$k_{i,j}$ – весовые коэффициенты, учитывающие различие между $c_{2i+1}^{\text{lim},*}$ и $c_{2j}^{\text{lim},*}$, в случае $\{\forall i: c_{2i+1}^{\text{lim},*} \approx c_{2i+3}^{\text{lim},*}\} \cup \{\forall j: c_{2j}^{\text{lim},*} \approx c_{2j+2}^{\text{lim},*}\} \cup \{\forall i, j: c_{2j}^{\text{lim},*} < c_{2i+1}^{\text{lim},*}\}$

определяемые как

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

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

Разработанная КМ дала возможность предложить общий алгоритм управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора на основе использования ЭВТП-метода, рассмотрения аль-

тернативных совокупностей факторов, детерминирующих свойства твэла, и организации итерационного процесса расчета наилучшей, с точки зрения удовлетворения технических, экономических и эксплуатационных требований к свойствам ядерного топлива, совокупности ДФ (рис. 4.1).

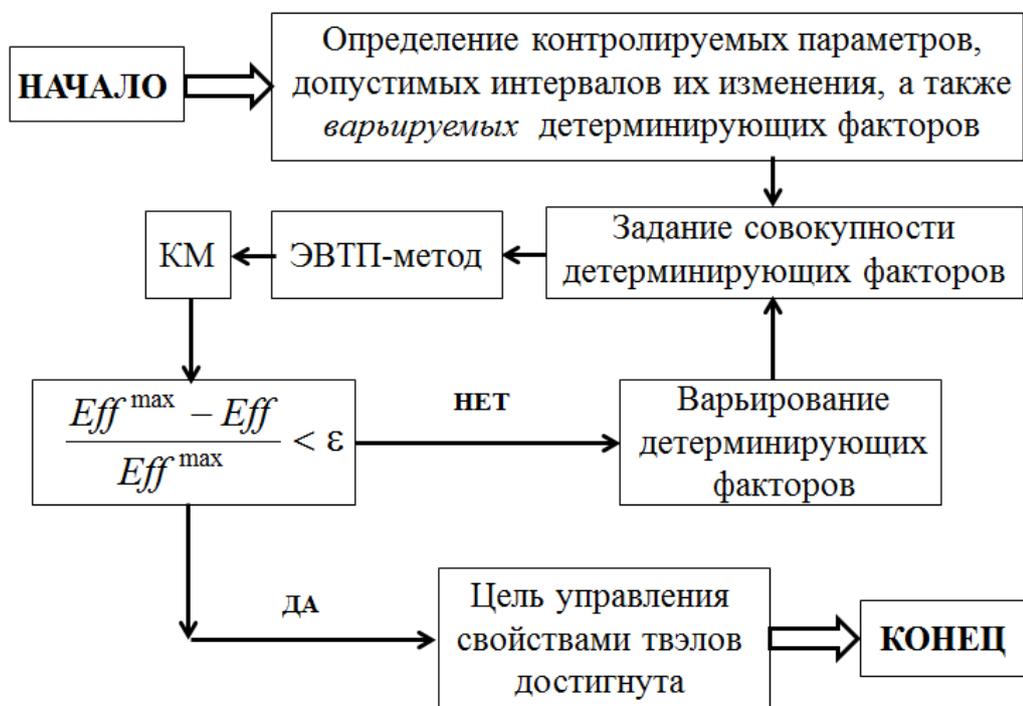


Рис. 4.1. Алгоритм управления свойствами твэлов

КМ даст возможность разработать метод управления конструкционными параметрами твэла, отличающийся учетом поврежденности оболочки, балансом безопасности и эффективности, предложить метод аксиального профилирования диаметра центрального отверстия таблетки, а также разработать метод управления температурным режимом теплоносителя, отличающийся учетом поврежденности оболочек твэлов и стабильности нейтронного поля в АКЗ.

4.2. Метод управления конструкционными параметрами твэла

Разработанная КМ позволила предложить методы управления свойствами

твэлов на основе ЭВТП-метода, рассмотрения альтернативных совокупностей ДФ и итерационного расчета наилучшей совокупности ДФ [40, 41].

Предложен метод управления конструкционными параметрами твэла, отличающийся учетом поврежденности оболочки твэла, 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_U топлива в ТВС). Ввиду огромного числа возможных сочетаний ДФ, применяется метод выборок Монте-Карло (рис. 4.2).

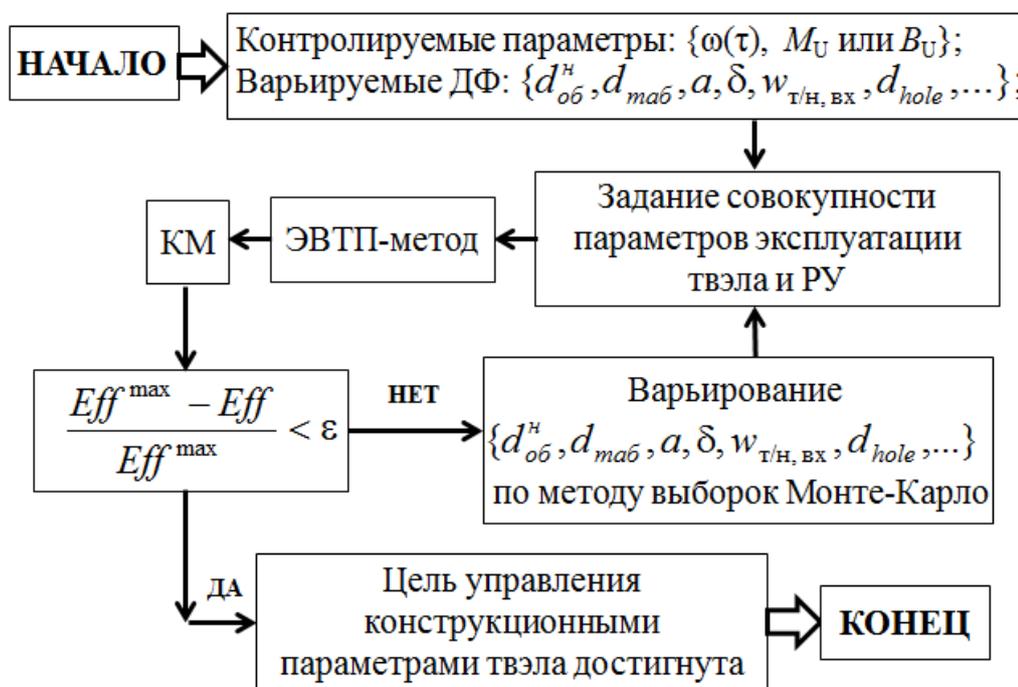


Рис. 4.2. Метод управления конструкционными параметрами твэла

4.3. Метод аксиального профилирования диаметра центрального отверстия топливной таблетки

Частным случаем метода управления конструкционными параметрами твэла является метод аксиального профилирования диаметра центрального отверстия топливной таблетки, характеризующийся высокой M_U при низкой $\omega(\tau)$ (рис. 4.3).

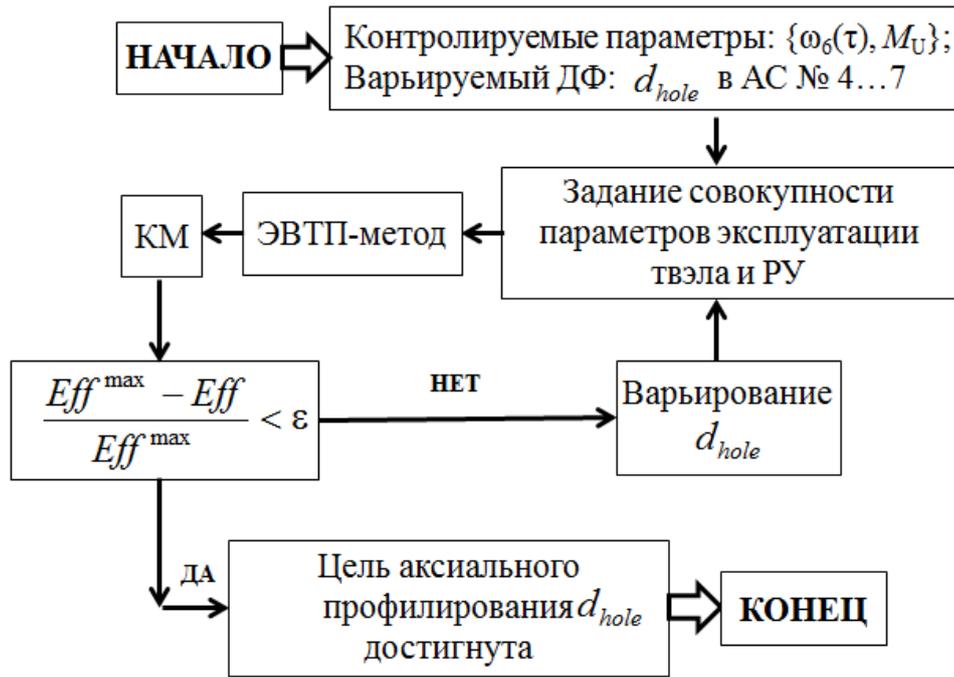


Рис. 4.3. Метод аксиального профилирования диаметра центрального отверстия топливной таблетки

Изготавливая топливные таблетки наиболее напряженных АС твэла (АС 4...7) 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 является АС 6 оболочки (при условном разбиении длины твэла на 8 равных АС), контролируемыми параметрами являются $\omega(\tau)$ в АС 6 (ω_6) и масса топлива в ТВС M_U , варьируемым ДФ является $d_{отв}$ в АС 4...7 [41].

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

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

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

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. Метод управления температурным режимом теплоносителя ВВЭР-1000

Разработан метод управления температурным режимом теплоносителя

ВВЭР-1000, отличающийся учетом поврежденности оболочек твэлов и аксиальной стабильности нейтронного поля в АКЗ, стабилизацией АО при маневровании мощностью путем выбора температурного режима и использования физических свойств АКЗ [41, 62, 63, 94].

4.4.1. 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 . Одной из важнейших задач при маневре N является предотвращение и подавление высотных ксеноновых колебаний энергораспределения в АКЗ путем управления величиной АО. Рассматривались три программы суточного маневра N :

- программа с постоянной входной температурой теплоносителя $T_{\text{вх}} = \text{const}$ (П1);
- программа с постоянной средней температурой теплоносителя $\langle T \rangle = \text{const}$ (П2);
- промежуточная между П1 и П2 программа, при которой $T_{\text{вх}}$ увеличивается на 1 °С при снижении N от 100 до 80 % $N_{\text{ном}}$ (П3) [13].

Программа П2 имеет такие преимущества, как наиболее благоприятные условия для работы оборудования 1-го контура; возможность регулирования АКЗ за счет температурного эффекта реактивности, что обеспечивает стабильность поля энерговыделения при минимуме воздействия на ОР. Однако, по П2 при снижении N значительно повышается давление пара во 2-м контуре p_2 , что требует рассчитывать парогенераторы и главный паровой коллектор (ГПК) на давление, превышающее номинальное.

Целесообразна разработка алгоритмов маневра N , обеспечивающих стабильность поля энерговыделения, благоприятные условия для оборудования 1-го контура, включая твэлы, не требующих значительного повышения p_2

при снижении N , использования дополнительных регулирующих групп СУЗ и существенного изменения регламента эксплуатации РУ [15; 62; 63].

4.4.2. Критерий эффективности 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 [59, 95–104]:

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

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

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

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

где AO_0 , $N_{\text{в},0}$, $N_{\text{н},0}$, $N_{\text{АКЗ},0}$ – стационарные значения соответственно аксиального офсета, мощности верхней, нижней половины АКЗ и мощности всей АКЗ;

δAO , $\delta N_{\text{в}}$, $\delta N_{\text{н}}$, $\delta N_{\text{АКЗ}}$ – достаточно малые (для линеаризации выражения, записанного в отклонениях) отклонения от стационарных значений

соответственно аксиального офсета, мощности верхней, нижней половины АКЗ и мощности всей АКЗ.

Для малых отклонений мощности верхней и нижней половины АКЗ при малом отклонении (в результате маневрирования мощностью РУ) средней температуры теплоносителя $\delta \langle T \rangle$ в соответствующей половине АКЗ справедливы выражения

$$\delta N_{\text{в}} = \frac{\delta N}{\delta \langle T \rangle} \cdot \delta \langle T_{\text{в}} \rangle; \delta N_{\text{н}} = \frac{\delta N}{\delta \langle T \rangle} \cdot \delta \langle T_{\text{н}} \rangle, \quad (4.14)$$

где $\delta \langle T_{\text{в}} \rangle, \delta \langle T_{\text{н}} \rangle$ – малое отклонение средней температуры теплоносителя в верхней и нижней половине АКЗ, соответственно;

$\delta N_{\text{в}}, \delta N_{\text{н}}$ – малое отклонение мощности верхней и нижней половины АКЗ при малом отклонении средней температуры теплоносителя $\delta \langle T_{\text{в}} \rangle, \delta \langle T_{\text{н}} \rangle$, 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 аксиального офсета при малом отклонении мощности РУ:

$$\delta \text{AO} = \frac{\delta N}{\delta \langle T \rangle} \cdot N_{\text{АКЗ},0}^{-1} \cdot [(1 - \text{AO}_0) \cdot \delta \langle T_{\text{в}} \rangle - (1 + \text{AO}_0) \cdot \delta \langle T_{\text{н}} \rangle]. \quad (4.16)$$

В случае справедливости допущения

$$\text{AO}_0 \ll 1 \quad (4.17)$$

выражение (4.16) упрощается:

$$\delta AO = \frac{\delta N}{\delta \langle T \rangle} \cdot N_{AK3,0}^{-1} \cdot [\delta \langle T_B \rangle - \delta \langle T_H \rangle]. \quad (4.18)$$

Из (4.18) следует критерий эффективности температурного режима теплоносителя с точки зрения стабильности аксиального оффсета в ходе маневрирования мощностью РУ по какой-либо программе регулирования:

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

где i – номер шага по мощности (малого изменения мощности);

m – количество шагов по мощности в каком-либо направлении при маневре мощностью РУ.

Использование критерия (4.19) позволяет обоснованно выбирать температурный режим теплоносителя, позволяющий обеспечить максимальную стабильность поля энерговыделения при маневрировании мощностью РУ [13].

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 % $N_{ном}$ поддержание $T_{вх} = \text{const}$ при $p_2 = [5,8...6]$ МПа, имеет преимущества П2 с $\langle T \rangle = \text{const}$, но, за счет поддержания p_2 в регламентных пределах, П1 лишена недостатков П2 [62, 63].

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.

$T_{вх}$ при $N = [100; 80]$ % по П1 задавалась 287 °С.

П2 рассматривалась в двух вариантах, отличающихся максимальной амплитудой ΔH^{\max} перемещения ОР при маневре:

– П2а: $\Delta H^{\max} = 4 \%$;

– П2б: $\Delta H^{\max} = 6 \%$.

В случае использования ПР № 2 входная температура теплоносителя задавалась переменной в соответствии с данными табл. 4.2.

Таблица 4.2

Изменение входной температуры теплоносителя при $\langle T \rangle = \text{const}$

$N, \%$	$T_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$	$\langle T \rangle, ^\circ\text{C}$
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).

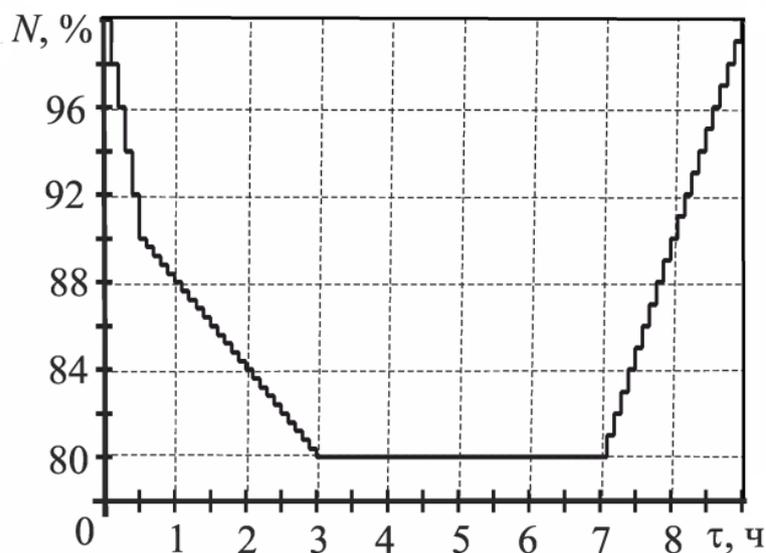


Рис. 4.4. Мощность РУ в зависимости от времени

Принималось, что

– при снижении N с $N_1 = 100 \%$ до $N_2 = 90 \%$ в течение 0,5 ч N изменяется по закону $dN_{1-2}/d\tau = -2 \%$ / 6 мин за счет ввода борной кислоты (параметр кри-

точности – концентрация борной кислоты в теплоносителе);

– при снижении N с $N_2=90\%$ до $N_3=80\%$ в течение 2,5 ч N изменяется по закону $dN_{2-3}/dt = -0,4\% / 6 \text{ мин}$ 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 с $N_3=80\%$ до $N_1=100\%$ в течение 2 ч N изменяется по закону $dN_{3-1}/dt = 1,0\% / 6 \text{ мин}$ за счет ввода чистого дистиллата при возврате ОР в регламентное положение (параметр критичности – концентрация борной кислоты);

– при подъеме N с $N_3=80\%$ 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).

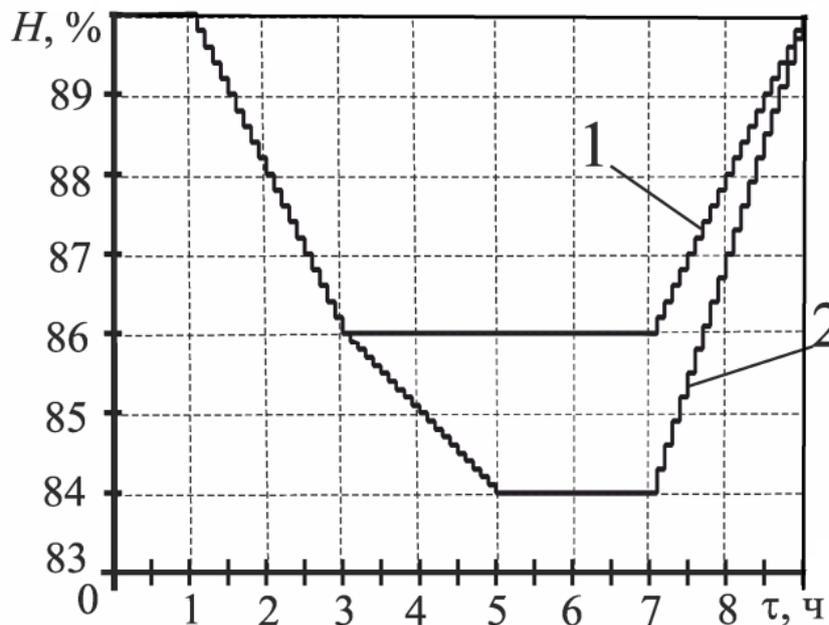


Рис. 4.5. Положение 10-й группы ОР СУЗ в зависимости от времени:

1 – для П1, П2а, П3; 2 – для П2б

Моделирование управления РУ в неравновесном состоянии выполнялось заданием управляющих параметров:

- параметра критичности;
- $T_{\text{вх},0}; dT_{\text{вх}}/dN$;
- $N_1; N_2; N_3$;
- $H_0; \Delta H^{\text{max}}$;
- $dN/d\tau$.

Для расчета распределения температуры теплоносителя по АС при использовании различных программ изменения температуры теплоносителя, задавая режимные характеристики РУ ВВЭР-1000 в соответствии с [17], с помощью программы ИР для рассматриваемых программ изменения температуры теплоносителя рассчитано изменение распределения линейной мощности по восьми аксиальным слоям АКЗ при изменении мощности ВВЭР-1000 от 100 % до 80 % $N_{\text{ном}}$ (табл. 4.3–4.5).

Используя относительные значения линейной мощности (табл. 4.3), рассчитаны соответствующие средние значения для АС (табл. 4.4).

Далее, представив $\langle q_{l,i} \rangle$ через максимальную по всем АС линейную мощность $q_{l,\text{max}}$ в виде $\langle q_{l,i} \rangle = k_i \cdot q_{l,\text{max}}$, где k_i – коэффициент линейной мощности для i -го сегмента, для АС рассчитаны соответствующие k_i (табл. 4.5).

При $\tau=0,1$ ч (времени начала маневра мощностью РУ) коэффициенты k_i имеют одинаковые значения для всех трех программ. Значения k_i в табл. 4.5 приводятся для программы П2а, поскольку с помощью критерия (4.19) можно сравнивать эффективность программ, у которых, кроме температурного режима теплоносителя, все прочие параметры одинаковы.

Приняв в качестве исходных данных полученные для программ 1, 2а, 3 распределения средней линейной мощности $\langle q_{l,i} \rangle$ по АС АКЗ, с помощью программы FEMAXI найдены значения средней температуры теплоносителя

Таблица 4.3

Относительные значения линейной мощности для АС

ПР	τ , ч	N, %	$\langle q_l \rangle$, Вт/см	k_i							
				Номер аксиального сегмента							
				1	2	3	4	5	6	7	8
1; 2; 4	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
2	0,6	90	151,7	0,725	1,04	1,125	1,165	1,165	1,125	1,015	0,65
2	1,1	88	148,3	0,715	1,03	1,125	1,16	1,165	1,135	1,025	0,66
2	1,6	86	144,9	0,71	1,025	1,115	1,165	1,17	1,135	1,025	0,65
2	2,1	84	141,5	0,7	1,015	1,115	1,165	1,175	1,145	1,025	0,65
2	2,6	82	138,2	0,7	1,015	1,115	1,17	1,18	1,145	1,025	0,645
2	3,1	80	134,8	0,695	1,015	1,12	1,17	1,19	1,15	1,02	0,645
4	0,6	90	151,7	0,725	1,045	1,13	1,165	1,155	1,12	1,01	0,645
4	1,1	88	148,3	0,72	1,035	1,125	1,165	1,165	1,125	1,02	0,65
4	1,6	86	144,9	0,715	1,03	1,125	1,165	1,17	1,135	1,02	0,65
4	2,1	84	141,5	0,71	1,025	1,125	1,165	1,175	1,135	1,02	0,645
4	2,6	82	138,2	0,71	1,025	1,125	1,17	1,18	1,14	1,02	0,635
4	3,1	80	134,8	0,705	1,025	1,125	1,175	1,185	1,14	1,01	0,635

в верхней $\langle T_b \rangle$ и нижней $\langle T_n \rangle$ половине АКЗ с временным шагом 0,5 ч.

Далее по имеющимся значениям $\langle T_b \rangle$ и $\langle T_n \rangle$ рассчитаны $\delta \langle T_b \rangle$ и $\delta \langle T_n \rangle$ при снижении мощности РУ от 100 до 80 % $N_{\text{ном}}$, что дало возмож-

ность найти для трех указанных программ $\Delta \delta T_{\Sigma} \equiv \left| \sum_{i=1}^6 \Delta \delta T \right|$, где

Таблица 4.4

Средние значения линейной мощности для АС

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

$\Delta\delta T \equiv \delta \langle T_b \rangle - \delta \langle T_n \rangle$ (табл. 4.6).

По выражению (4.19) найдено, что с точки зрения стабильности АО П1 ($\Delta\delta T_\Sigma = 2,65$) лучше, чем П2а ($\Delta\delta T_\Sigma = 2,85$) и П3 ($\Delta\delta T_\Sigma = 2,70$), П2а – наихудшая программа [94]. Рассчитано максимальное расхождение ΔAO^{\max} графиков мгновенного и равновесного АО по методу [96–98] – рис. 4.6.

ΔH^{\max} по П1, П2а и П3 одинакова (4 %), но ΔAO^{\max} по П1 ($\approx 1,9$ %) меньше,

Таблица 4.5

Коэффициенты линейной мощности для АС

ПР	τ , ч	N, %	$q_{l, \max}$, Вт/см	k_i							
				Номер аксиального сегмента							
				1	2	3	4	5	6	7	8
1; 2а; 4	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
4	0,6	90	176,7	0,623	0,897	0,970	1	0,992	0,962	0,867	0,554
4	1,1	88	172,8	0,618	0,888	0,965	1	1	0,965	0,876	0,558
4	1,6	86	169,5	0,611	0,880	0,962	0,996	1	0,971	0,872	0,556
4	2,1	84	166,3	0,604	0,872	0,957	0,991	1	0,966	0,868	0,549
4	2,6	82	163,1	0,602	0,869	0,953	0,991	1	0,966	0,865	0,538
4	3,1	80	159,7	0,595	0,865	0,950	0,992	1	0,962	0,852	0,536

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 мощности РУ по какой-либо программе регулирования, дает результат, качественно совпадающий с результатом анализа стабильности офсета путем расчета максимальной расходимости графиков мгновенного и равновесного офсета на протяжении маневра мощностью.

Таблица 4.6

Средняя температура теплоносителя в верхней и нижней половинах АКЗ для программ 1, 2а, 3

Прогр.	τ , ч	N , %	$\langle T_B \rangle$	$\langle T_H \rangle$	$\delta \langle T_B \rangle$	$\delta \langle T_H \rangle$	$\Delta \delta T$	$\left \sum_{i=1}^6 \Delta \delta T \right $
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	
	3,1	80	313,9	295,075	-0,6	-0,225	-0,375	2,85
2а	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	
	3,1	80	316,35	297,725	-0,3	0,1	-0,4	2,70
3	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	

Если для П2 ΔH^{\max} увеличена с 4 до 6 %, то $\Delta \text{АО}^{\max}$ уменьшается с 3 до 1,9 %, поэтому по П2 для стабильности АО необходимо перемещение ОР с большей ΔH^{\max} , чем по П1, при прочих равных условиях.

После 500 суточных циклов нагружения РУ, при маневрировании по П2а среднее по всем твэлам АКЗ значение $\omega_6(\tau)$ на 10 % больше, чем по П1

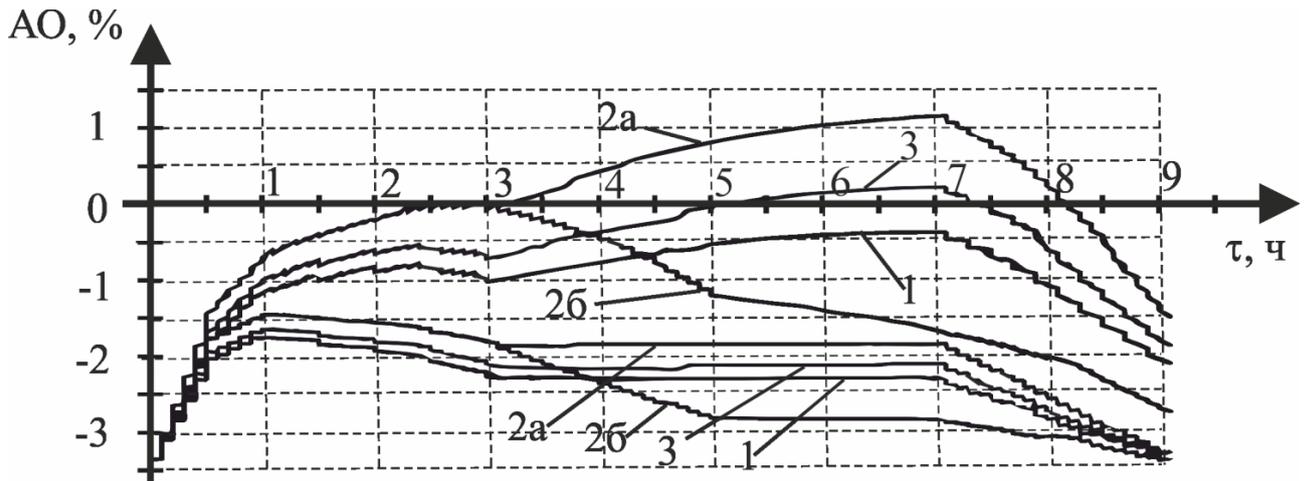


Рис. 4.6. АО в зависимости от времени для программ 1, 2а, 2б, 3
(нижние линии – равновесный АО, верхние – мгновенный АО)

($A_0 = 30 \text{ МДж/м}^3$) – табл. 4.7.

Таблица 4.7

$\omega_6(\tau)$ и $\omega_7(\tau)$ для П1, П2а, П3

Программа		П1	П2а	П3	
АС	6	$A, \text{ МДж/м}^3$	1,02	1,12	1,06
		$\omega(500 \text{ сут}), \%$	3,38	3,73	3,53
	7	$A, \text{ МДж/м}^3$	0,8	0,89	0,84
		$\omega(500 \text{ сут}), \%$	2,67	2,97	2,8

Поскольку при маневрировании мощностью ВВЭР-1000 по программе регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя амплитуда необходимого перемещения ОР СУЗ, при прочих равных условиях, на 50 % больше, чем по программе регулирования с постоянной входной температурой теплоносителя, это приведет к увеличению амплитуды скачка линейной мощности ТВЭлов вблизи концевиков ОР (эта величина в работе не оценивалась) при каждом маневрировании, что будет существенно уменьшать долговечность оболочек ТВЭлов [105, 106].

4.4.3. Формализация метода управления температурным режимом теплоносителя ВВЭР-1000

Предложен метод управления температурным режимом теплоносителя, учитывающий поврежденность оболочек твэлов и аксиальную стабильность нейтронного поля в АКЗ. Контролируемые параметры: $\omega_6(\tau)$ и ΔAO^{\max} , варьируемый ДФ – программа изменения $T_{\text{вх}}$ (рис. 4.7) [41, 90, 92, 93].

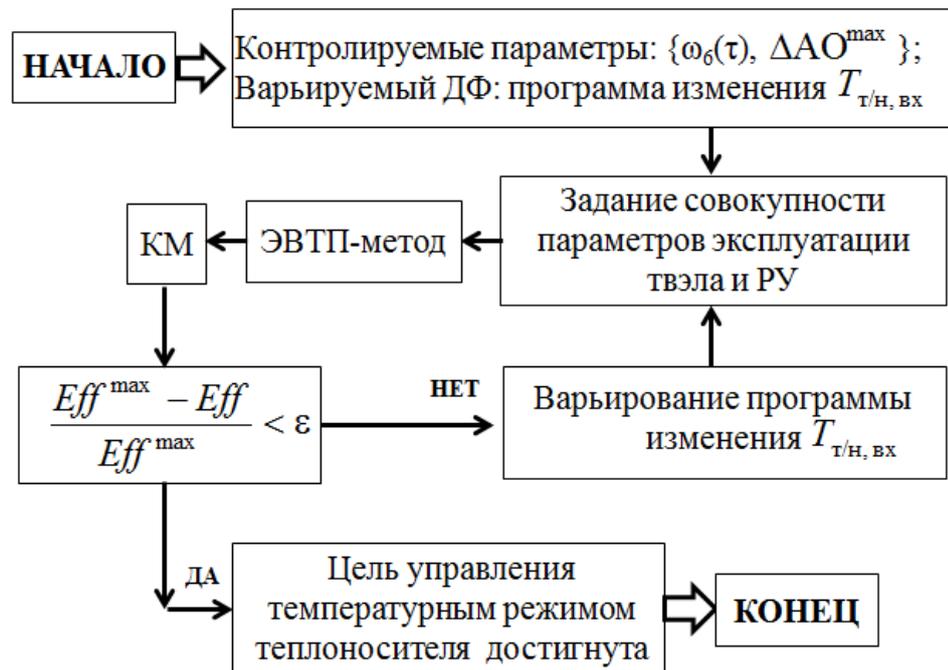


Рис. 4.7. Метод управления температурным режимом теплоносителя

Введены требования (индекс “max” у ΔAO^{\max} опущен):

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

Допустимые значения ω_6 и ΔAO лежат в пределах:

$$0,03 \leq \omega_6 \leq 0,1 ; 0,01 \leq \Delta AO \leq 0,05 . \quad (4.21)$$

Компоненты критерия Eff записаны в виде

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

Безразмерные величины определяются как

$$0,93 \leq \omega_6^* \leq 1; 0,96 \leq \Delta AO^* \leq 1, \quad (4.23)$$

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

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

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

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

Программа изменения $T_{\text{вх}}$	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 РУ 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 мощности РУ.

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 возможно в общем случае следующими способами [27, 41]:

- управлением конструкционными параметрами ТВЭла;
- управлением расположением регулирующей группы в АКЗ;
- управлением балансом стационарного и переменного нагружения РУ;
- управлением температурным режимом теплоносителя;
- управлением 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 поврежденность оболочек, могут применяться в методе управления расположением регулирующей группы.

Управление балансом стационарного и переменного нагружения РУ не исследуется, т.к. принято, что этот фактор определяется на макроэкономическом уровне.

Следовательно, если рассматривать наиболее сильно влияющие на поврежденность оболочек ТВЭлов эксплуатационные параметры РУ, управлять ресурсом оболочек ТВЭлов ВВЭР-1000 возможно прежде всего за счет оптимизации температурного режима теплоносителя и схемы перестановок ТВС по АКЗ реактора в ходе кампании.

Поскольку алгоритму перестановок ТВС, характеризующемуся большей глубиной выгорания топлива, соответствует меньшая долговечность оболочек ТВЭлов, алгоритм перестановок ТВС по АКЗ реактора в ходе кампании должен задаваться на основе оптимальности соотношения между глубиной выгорания топлива и долговечностью оболочек ТВЭлов.

Получила 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

безопасности и экономичности для этих условий.

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 загрузке ядерного топлива.

Разработан метод управления температурным режимом теплоносителя, 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 АО.

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

4.5. Выводы по четвертому разделу

1. Использование ЭВТП-метода, КМ и критерия эффективности температурного режима теплоносителя позволяет определить наилучший температурный режим теплоносителя с точки зрения одновременного обеспечения максимальной стабильности поля энерговыделения и минимальной поврежденности оболочек твэлов РУ с ВВЭР-1000.

2. Амплитуда необходимого для стабилизации АО перемещения регулирующей группы СУЗ при маневрировании мощностью по программе с $T_{\text{вх}} = \text{const}$ и максимальном расхождении графиков мгновенного и равновесного

офсетов 1,9 % составляет 4 %, тогда как при маневрировании мощностью по программе с $\langle T \rangle = \text{const}$, при прочих равных условиях, амплитуда требуемого перемещения регулирующей группы составляет 6 %.

3. Поскольку при маневрировании мощностью ВВЭР-1000 по программе с $\langle T \rangle = \text{const}$ амплитуда необходимого перемещения ОР СУЗ, при прочих равных условиях, на 50 % больше, чем по программе с $T_{\text{вх}} = \text{const}$, происходит увеличение амплитуды скачка линейной мощности твэлов при каждом маневрировании, особенно вблизи концевиков ОР, что будет существенно уменьшать долговечность оболочек твэлов в переменном режиме нагружения РУ.

4. Усредненная по все твэлам ВВЭР-1000 поврежденность материала оболочки после 500 циклов дневного переменного нагружения для наиболее нагруженного 6-го АС при маневрировании мощностью с $\langle T \rangle = \text{const}$ на 8,7 % больше, чем при маневрировании мощностью с $T_{\text{вх}} = \text{const}$, при условии что стабильность АО одинакова для обоих методов.

5. Управлять ресурсом оболочек твэлов в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000 возможно в первую очередь за счет оптимизации температурного режима теплоносителя и схемы перестановок ТВС по АКЗ реактора в ходе кампании. Поскольку алгоритму перестановок ТВС, характеризующемуся большей глубиной выгорания топлива, соответствует меньшая долговечность оболочек твэлов, алгоритм перестановок ТВС по АКЗ реактора в ходе кампании должен задаваться на основе оптимальности соотношения между глубиной выгорания топлива и долговечностью оболочек твэлов.

РАЗДЕЛ 5

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕСТАНОВКАМИ ТВС В АКЗ И СВОЙСТВАМИ ТВЭЛА

5.1. Метод управления перестановками ТВС

На основе ЭВП-метода, КМ и выбора алгоритма перестановок ТВС предложен метод управления перестановками ТВС, отличающийся учетом $\omega(\tau)$ и глубины выгорания топлива $B(\tau)$. 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) [40, 41, 90–93].

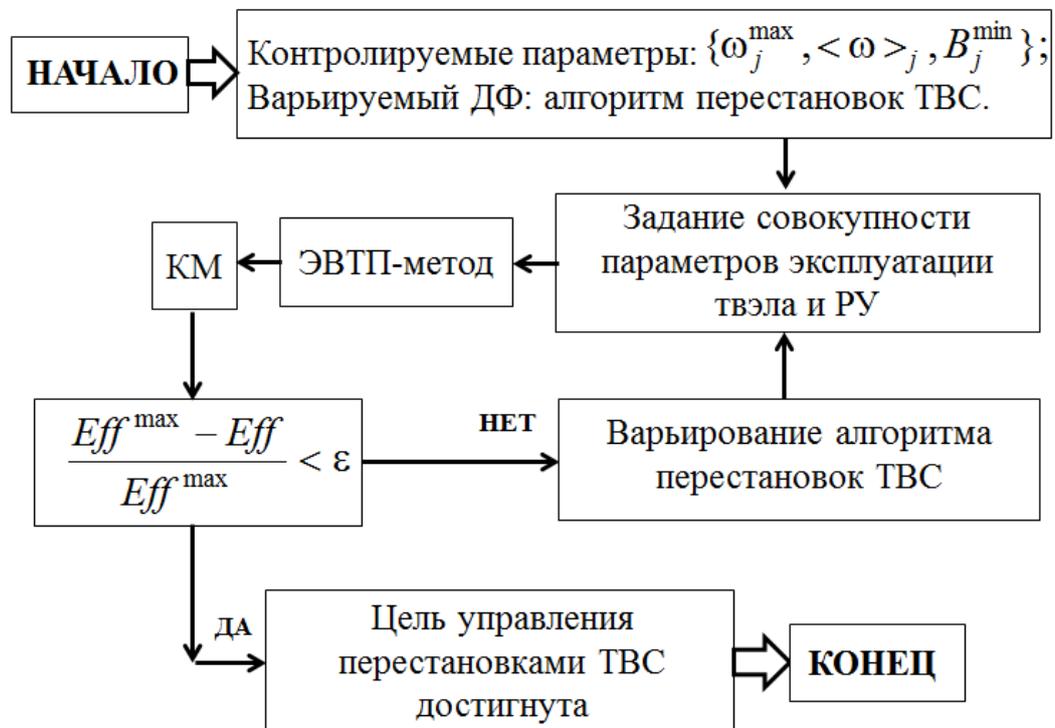


Рис. 5.1. Метод управления перестановками ТВС

5.2. Эффективность управления перестановками ТВС в детерминистском случае

При рассмотрении всех ячеек в выделенном сегменте АКЗ (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” (MATLAB, 2010).

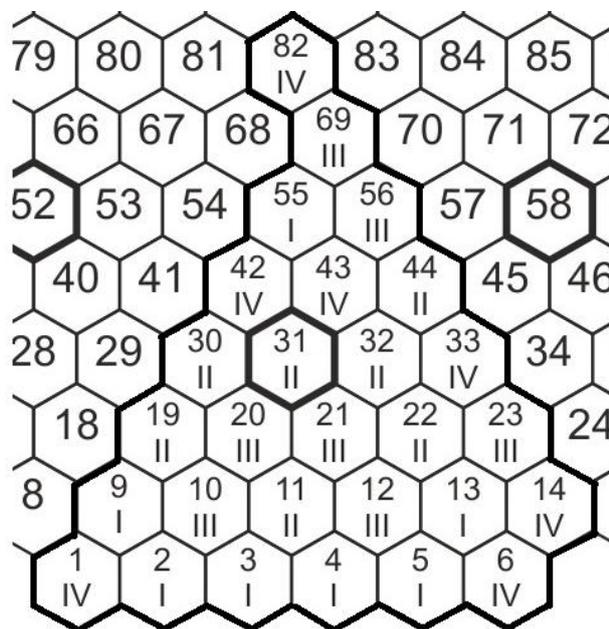


Рис. 5.2. Распределение ТВС в ячейках АКЗ ВВЭР-1000 по годам кампании: (арабская цифра) номер ячейки АКЗ; (римская цифра) ТВС 1, 2, 3 и 4-го года, соответственно

Используя модель перестановок ТВС во время перегрузок топлива (см. рис. 2.11), выполнен расчет $\omega(\tau)$ и выгорания топлива $B(\tau)$ в АС 6, принимая во внимание размещение ОР в АКЗ для У-алгоритма, а также учитывая амплитуду перемещения РО, необходимую для стабилизации АО при программе П1 ($T_{т/н, вх} = \text{const}$), по следующей процедуре:

- 1) Используя ПС ИР, при $N=80$ и 100 % рассчитывались входящие в вы-

ражение (2.3) коэффициенты относительного энерговыделения $k_{v,6,j}$ в АС 6, для ячеек АКЗ, показанных на рис. 2.11 – 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;

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 $A_0 = 30 \text{ МДж/м}^3$, рассчитывались $\omega(1460 \text{ сут})$ и $B(1460 \text{ сут})$ для различных алгоритмов перестановок ТВС.

Таблица 5.2

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

$N, \%$	ТВС	$q_{l,j,\max};$ $\langle q_{l,i,j} \rangle$						
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

Принимая $N_{alg} = 18$, анализировались 18 алгоритмов, содержащих 126 перестановок, в том числе 16 алгоритмов (алгоритмы 1...16), содержащих 112 перестановок, выбирались случайным образом, тогда как два алгоритма (алгоритмы 17 и 18) использованы на 5-м энергоблоке ЗАЭС [38].

Принято, что все алгоритмы удовлетворяют требованиям к максимально допустимой величине коэффициента неравномерности энерговыделения в

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

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:

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

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

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

Отсюда

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

Таблица 5.4

Поврежденность оболочек и выгорание

Алгоритм	Перестановка	A, МДж/м ³	$\omega(\tau) = \frac{A}{A_0}, \%$	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
	4-32-68-8	1,368	4,56	57,02
3	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
	4-32-18-42	1,722	5,74	62,69
	2-31-12-29	1,976	6,587	63,88
6	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
	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
17	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
	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
18	2-22-21-6	1,55	5,167	54,86
	3-41-68	1,18	3,933	48,83
	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

где

$$\omega^{\text{lim},*} = \frac{1 - \omega^{\text{lim}}}{1 - \omega^{\text{opt}}}; \quad \omega_j^{\text{max},*} = \frac{1 - \omega_j^{\text{max}}}{1 - \omega^{\text{opt}}};$$

$$\langle \omega \rangle^{\text{lim},*} = \frac{1 - \langle \omega \rangle^{\text{lim}}}{1 - \langle \omega \rangle^{\text{opt}}}; \quad \langle \omega \rangle_j^* = \frac{1 - \langle \omega \rangle_j}{1 - \langle \omega \rangle^{\text{opt}}}; \quad (5.4)$$

$$B^{\text{lim},*} = \frac{B^{\text{lim}}}{B^{\text{opt}}}; \quad B_j^{\text{min},*} = \frac{B_j^{\text{min}}}{B^{\text{opt}}}.$$

Поскольку $|B^{\text{lim},*}; 1| \gg |\omega^{\text{lim},*}; 1|$, из условия равной приоритетности требований безопасности и экономичности эксплуатации твэлов [40]:

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

Следовательно, имея некоторое значение ω^{lim} , соответствующие значения $\langle \omega \rangle^{\text{lim}}$ 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 [40] использовалось условие (5.5), более универсальной записью критерия эффективности являются 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) [40, 41].

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 ω_j^{\max} , $\langle \omega \rangle_j$ и B_j^{\min} ;

– при неравной приоритетности требований безопасности и экономичности возможно введение весовых 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 РУ критерий эффективности управления можно записать аналогично выражению (5.7), поскольку оно позволяет достигать одновременно минимума поврежденности оболочек и максимума глубины выгорания топлива [41].

Принимая $\omega^{\lim} = 13\%$, 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.

Таблица 5.5

Эффективность алгоритмов перестановок ТВС

j	$\omega_j^{\max}, \%$	$\langle \omega \rangle_j, \%$	$B_j^{\min}, \text{МВт}\cdot\text{сут}/\text{кг}$	$\omega_j^{\max,*}$	$\langle \omega \rangle_j^*$	$\bar{\omega}_j^*$	$B_j^{\min,*}$	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.

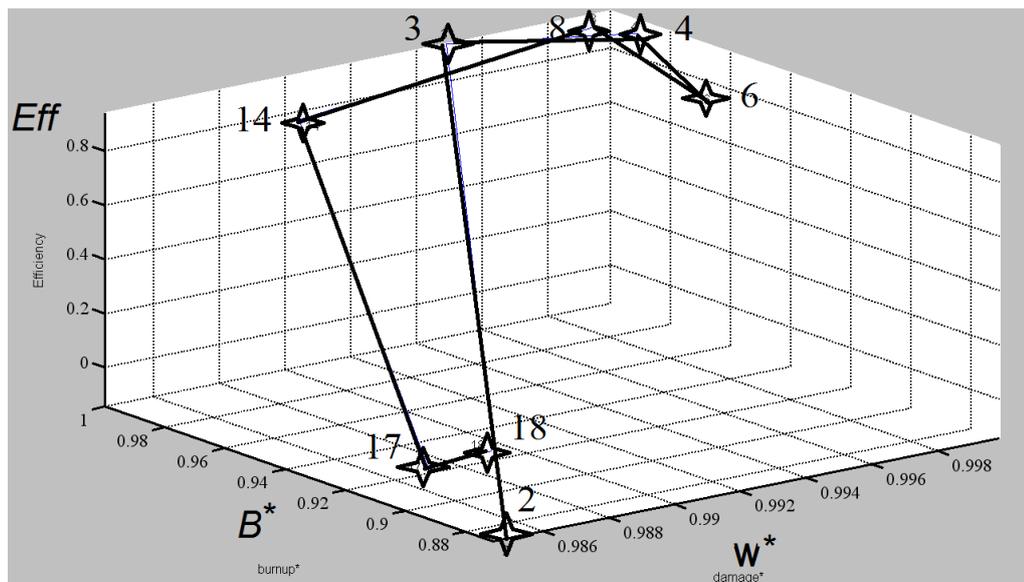


Рис. 5.3. Схема поверхности эффективности перестановок ТВС

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 $\Delta\omega(1460 \text{ сут})$ и $\Delta B(1460 \text{ сут})$ в алгоритме (табл. 5.6).

Таблица 5.6

Средние значения и интервалы изменения ω и B

j	Eff_j	$\langle \omega(\tau) \rangle, \%$	$\Delta\omega, \%$	$\langle B \rangle, \text{МВт}\cdot\text{сут}/\text{кг}$	$\Delta B, \text{МВт}\cdot\text{сут}/\text{кг}$
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 легководного реактора 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 [40, 107].

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. Обоснование снижения количества учитываемых детерминирующих факторов

Оценка интервалов неопределенности Δd выполнялась для наиболее значимых ДФ $q_{l,\max}$ и $T_{\text{вх}}$. Точность расчета $q_{l,\max}$ по ПС ИР составляет 5 % [42, 101]. С учетом точности измерения и регулирования возможное отклонение от номинального значения для N и $T_{\text{вх}}$ составляет 4 и $< 1\%$, соответственно [108].

Поскольку неопределенность в знании $q_{l,\max}$ в 5 раз превышает соответствующую величину для $T_{\text{вх}}$, параметр $\delta A_{i,\pm}$ для $q_{l,\max}$ более чем в 3 раза превышает соответствующую величину для $T_{\text{вх}}$, в вероятностной модели учитывалась неопределенность в знании только $q_{l,\max}$, а неучет $T_{\text{вх}}$ компенсировался консервативностью задания интервала неопределенности $q_{l,\max}$.

5.5. Робастная критериальная модель эффективности 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 $\langle q_{l,\text{cn},\max}^{\text{rand}} \rangle - 10\%$ и $\langle q_{l,\text{cn},\max}^{\text{rand}} \rangle + 10\%$ рассчитаны $\omega(\tau)$ и B для перестановок алгоритмов 3, 4, 6, 8 и 14, имеющих наибольшие значения Eff , где cn — 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 $j = 1, \dots, N_{\text{alg}}$; $k = 1, \dots, 7$.

При $N_{\text{alg}} = 5$ 35 перестановок ТВС описываются $2 \cdot N_{\text{alg}} \cdot 7 = 70$ 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. Эффективность управления перестановками ТВС в простейшем случае робастного управления

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

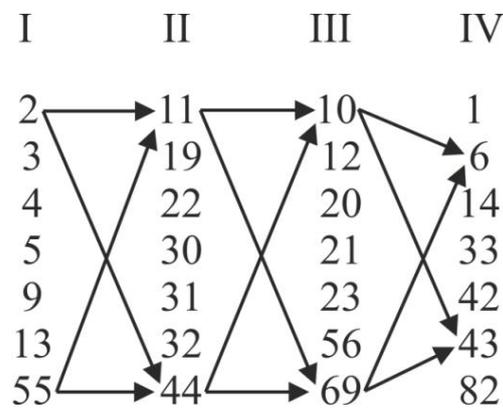


Рис. 5.4. Перемещения ТВС при перестановках: (число) ячейка АКЗ; (I, II, III и IV) 1, 2, 3 и 4-й год кампании, соответственно

Пусть

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

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

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

Таблица 5.7

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

№	I	II	III	IV	$A_4,$ МДж/м ³	$\omega(\tau) = \frac{A_4}{A_0}, \%$	$B_U,$ 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).

Найдены

$$\omega^{\text{opt}} = 3,714 \%; \quad \langle \omega \rangle^{\text{opt}} = 3,608 \%; \quad B^{\text{opt}} = 61,15 \text{ МВт} \cdot \text{сут/кг}. \quad (5.16)$$

$L^{\text{lim}} = 0,1019$, допустимые значения компонентов критерия

$\{\omega_j^{\text{max,*}}, \langle \omega \rangle_j^*, B_j^{\text{min,*}}\}$ лежат в диапазонах:

$$0,987 \leq \omega_j^{\text{max,*}} \leq 1; \quad 0,996 \leq \langle \omega \rangle_j^* \leq 1; \quad 0,899 \leq B_j^{\text{min,*}} \leq 1. \quad (5.17)$$

Используя выражение (5.7), на основе данных табл. 5.8 рассчитана эффективность j -го алгоритма перестановок ТВС (табл. 5.9).

Следовательно, эффективность различных алгоритмов перестановок ТВС может быть оценена численно, анализируя топливо на двух уровнях: безопас-

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						

Таблица 5.9

Эффективность алгоритма перестановок ТВС

j	Алгоритм	$\omega_j^{\max,*}$	$\langle \omega \rangle_j^*$	$B_j^{\min,*}$	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						

ность (поврежденность оболочек твэлов) и экономичность эксплуатации твэлов (глубина выгорания топлива).

Для детерминистического 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 алгоритмов перестановок ТВС при $\Delta q_{l,j,\max} = 10\%$ – табл. 5.10 и 5.11 (размерность величин опущена).

Для j -алгоритма перестановок ТВС находились средняя поврежденность оболочек твэлов $\langle \omega_j \rangle$, погрешность расчета $\Delta \omega_j$, 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 $x_1 \equiv \omega_j^{\text{rand}}$; $x_2 \equiv B_j^{\text{rand}}$.

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.

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

Плотность вероятности ω_j^{rand} перестановок 2-11-10-6; 55-44-69-43;
55-11-10-6; 2-44-69-43; 2-11-69-6; 55-44-10-43; 55-11-69-6; 2-44-10-43;

2-11-10-43 и 2-44-10-43 имеет вид, показанный на рис. 5.5.

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

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 [40].

Эффективность j -го алгоритма перестановок рассчитывалась по критерию (5.7), где

$$\omega_j^{\text{max}} = \max \{ \omega_j^{\text{rand}} \}, \langle \omega \rangle_j = \langle \{ \omega_j^{\text{rand}} \} \rangle, B_j^{\text{min}} = \min \{ B_j^{\text{rand}} \}.$$

Таблица 5.12

 $k_{1,j}-k_{3,j}$

№	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

Например, алгоритм 1 (2-11-10-6 + 55-44-69-43):

$$\tau_{1,1,1} \equiv \omega_{2-11-10-6}^{\text{rand}}; \quad \tau_{1,1,2} \equiv \omega_{55-44-69-43}^{\text{rand}}; \quad \tau_{1,2,1} \equiv B_{2-11-10-6}^{\text{rand}}; \quad \tau_{1,2,2} \equiv B_{55-44-69-43}^{\text{rand}};$$

$$\theta_{1,1,1} = \max\{\tau_{1,1,1}, \tau_{1,1,2}\}; \quad \theta_{1,1,2} = \text{mean}\{\tau_{1,1,1}, \tau_{1,1,2}\}; \quad \theta_{1,2,1} = \min\{\tau_{1,2,1}, \tau_{1,2,2}\};$$

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” (MATLAB) на основе средних M_τ и стандартных отклонений σ_τ случайных величин $\{\omega_j^{\text{rand}}\}$ и $\{B_j^{\text{rand}}\}$ – табл. 5.13.

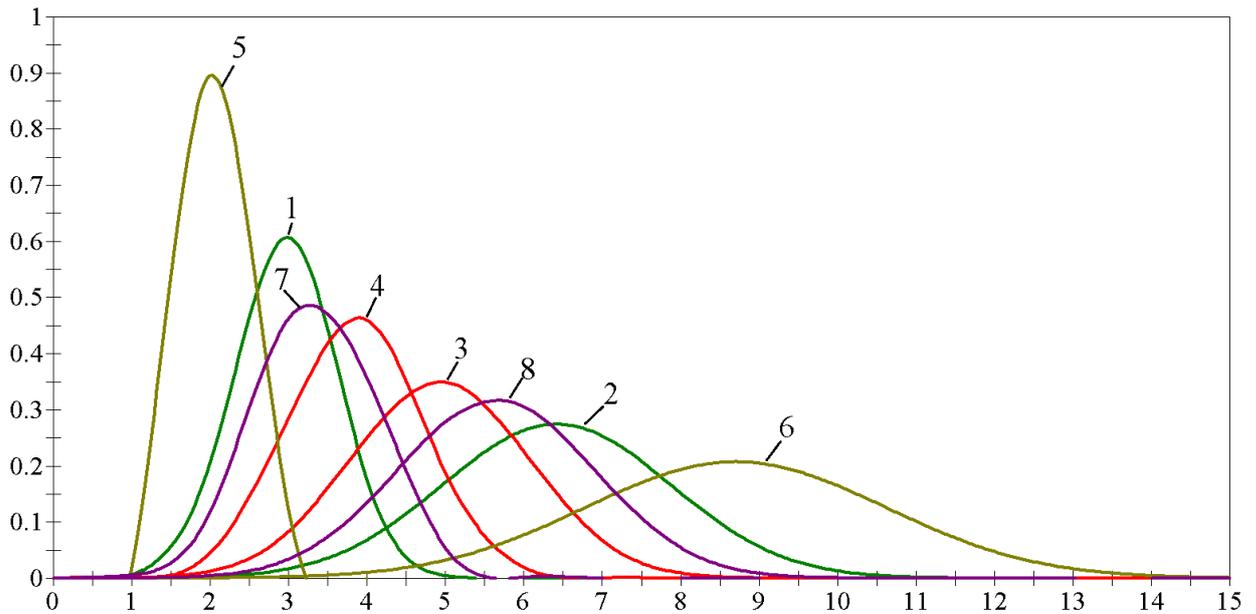


Рис. 5.5. Плотность вероятности ω_j^{rand} перестановок:

- (1) 2-11-10-6; (2) 55-44-69-43; (3) 55-11-10-6; (4) 2-44-69-43;
 (5) 2-11-69-6; (6) 55-44-10-43; (7) 55-11-69-6; (8) 2-44-10-43

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 для робастного случая (рис. 5.6) в целом соответствуют результатам детерминистского анализа (табл. 5.9).

Эффективность перестановок ТВС для робастных условий значительно уменьшилась по сравнению с детерминистским случаем (табл. 5.14).

Таблица 5.13

Средние M_τ и стандартные отклонения σ_τ $\{\omega_j^{\text{rand}}\}$ и $\{B_j^{\text{rand}}\}$

№	Алгоритм	τ	M_τ , %	σ_τ , %	τ	M_τ , МВт·сут/кг	σ_τ , МВт·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

5.7. Эффективность управления перестановками ТВС в робастном случае при учете всех ячеек сектора симметрии АКЗ

При большом количестве случайных переменных наиболее привлекательным по эффективности расчетов является метод выборок МК [40]. 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” (MATLAB, 2010).

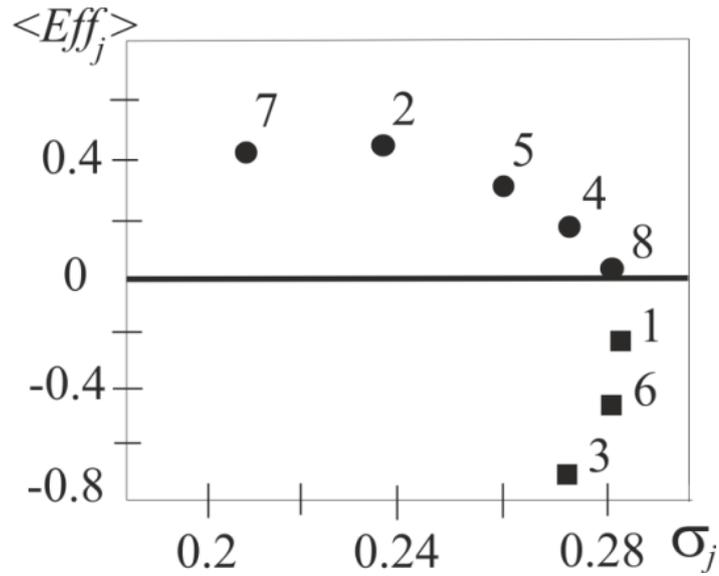


Рис. 5.6. Среднее и стандартное отклонение эффективности перестановок ТВС в простейшем случае робастного управления: (1) алгоритм 2-11-10-6 + 55-44-69-43; (2) 2-44-69-43 + 55-11-10-6; (3) 2-11-69-6 + 55-44-10-43; (4) 2-44-10-43 + 55-11-69-6; (5) 2-11-10-43 + 55-44-69-6; (6) 2-44-69-6 + 55-11-10-43; (7) 2-11-69-43 + 55-44-10-6; (8) 2-44-10-6 + 55-11-69-43.

Таблица 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

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 $\omega^{\text{opt}}, \langle \omega \rangle^{\text{opt}}, B^{\text{opt}}$ и L^{lim} робастной КМ не равны соответствующим константам детерминистской КМ [41, 90, 92–93] – табл. 5.15.

Таблица 5.15

Отличие робастной критериальной модели от детерминистской

Детерминистская КМ	Робастная КМ																
$\omega^{\text{opt}}, \langle \omega \rangle^{\text{opt}}, B^{\text{opt}}$ – константы: $\omega^{\text{opt}} = 6,85 \%$; $\langle \omega \rangle^{\text{opt}} = 5,77 \%$; $B^{\text{opt}} = 54,7 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг}$	$\omega^{\text{opt}}, \langle \omega \rangle^{\text{opt}}, B^{\text{opt}}$ – не константы, зависят от выборки МК: <table> <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														
$\langle \omega \rangle^{\text{lim}}, B^{\text{lim}}, L^{\text{lim}}, \omega^{\text{lim},*}$ – константы	$\langle \omega \rangle^{\text{lim}}, B^{\text{lim}}, L^{\text{lim}}, \omega^{\text{lim},*}$ – не константы, зависят от выборки МК																

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 $\omega^{\text{lim}} = 13 \%$, соотношение между $\langle \text{Eff}_j \rangle$ и $\sigma(\text{Eff}_j)$ для 5 самых эффективных алгоритмов перестановок ТВС ($A_0 = 30 \text{ МДж/м}^3$), а также для 8 случайно выбранных алгоритмов в простейшем случае робастного управления, когда для ТВС каждого года учитываются только 2 ячейки АКЗ ($A_0 = 40 \text{ МДж/м}^3$, учитывались параметры $\omega^{\text{opt}}, \langle \omega \rangle^{\text{opt}}, B^{\text{opt}}$ и L^{lim} для робастного случая), показано на рис. 5.7.

Результаты робастного анализа Eff в целом соответствуют результатам детерминистского анализа (табл. 5.5 и рис. 5.7).

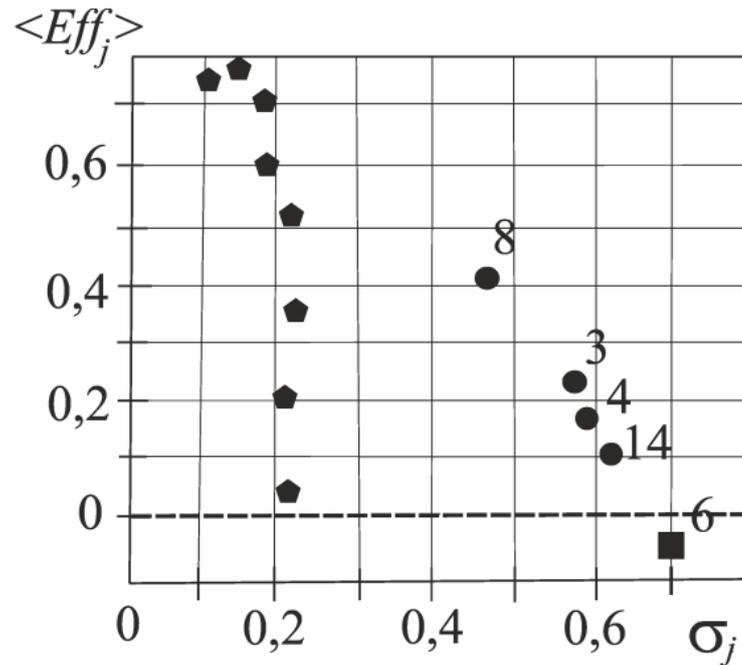


Рис. 5.7. Связь между $\langle Eff_j \rangle$ и $\sigma(Eff_j)$: (число) алгоритм перестановок; (пятиугольник) случайный алгоритм простейшего управления

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 одновременно более высокое значение $\langle Eff_j \rangle$ и более низкое $\sigma(Eff_j)$, цель управления перестановками ТВС в робастном случае достигнута при алгоритме 8 [41, 90, 92–93].

5.8. Метод управления свойствами твэлов

На основе методов управления конструкционными параметрами твэла М(1), расположением регулирующей группы в АКЗ М(2), балансом стацио-

нарного и переменного нагружения РУ М(3), температурным режимом теплоносителя М(4) и перестановками ТВС в АКЗ М(5) синтезирован метод управления свойствами твэлов, отличающийся учетом поврежденности оболочек в нормальных условиях их эксплуатации, балансом безопасности и экономичности эксплуатации твэлов, итерационным заданием главных ДФ на стадиях проектирования и эксплуатации РУ (рис. 5.8) [41, 90, 92–93].

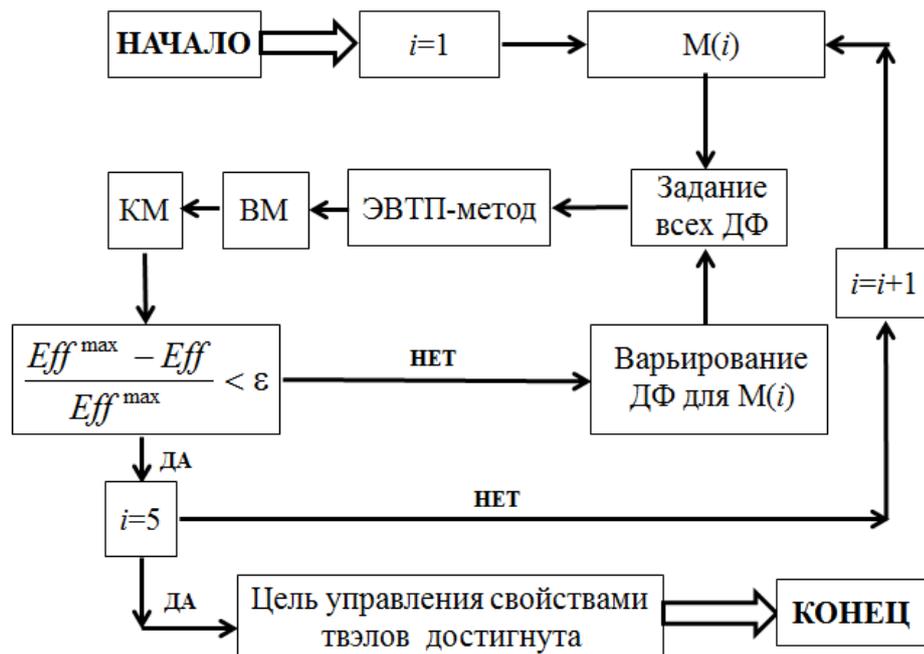


Рис. 5.8. Метод управления свойствами твэлов

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 ($q_{l,\max}$, $T_{\text{вх}}$, конструкционные параметры) на контролируемые параметры, описывающие безопасность (ω) и экономичность (B) эксплуатации твэлов, максимально снизить размерность пространства случайных величин, описывающих свойства твэлов.

5.9. Выводы по пятому разделу

1. Предложен метод управления перестановками ТВС в АКЗ легководного реактора при нормальных условиях эксплуатации на основе учета лимитирующих требований одновременно к долговечности оболочек твэлов и к глубине выгорания топлива, путем использования критерия эффективности перестановок ТВС в АКЗ.

2. Предложен робастный метод управления свойствами твэлов реактора путем выбора оптимального алгоритма перестановок ТВС в АКЗ, на основе метода Монте-Карло и использования вероятностной модели учета недостоверности знания параметров эксплуатации реактора.

3. Предложен метод управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации РУ на основе совместного использования методов управления конструкционными параметрами твэла, температурным режимом теплоносителя, а также робастного метода управления перестановками ТВС.

4. Поскольку результаты робастного анализа эффективности перестановок ТВС в основном соответствуют детерминистским результатам и являются более консервативными, процедуру поиска наиболее эффективного алгоритма перестановок ТВС в детерминистской постановке целесообразно применять перед робастным анализом в целях сокращения числа анализируемых алгоритмов.

5. ЭВТП-метод позволяет усовершенствовать оборудование для контроля состояния АКЗ легководного реактора путем создания автоматизированного программно-технического комплекса, осуществляющего контроль поврежденности оболочек твэлов и оптимизацию перестановок ТВС в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора.

ВЫВОДЫ

Диссертация содержит новые результаты в области обоснования безопасной эксплуатации твэлов легководного реактора, которые решили проблему теоретических и технологических основ эксплуатации твэлов легководного реактора с учетом накопленной в нормальных условиях поврежденности их оболочек.

В результате решения задач диссертации устранено научно-техническое противоречие. Это позволит снизить консерватизм оценки условий разрушения оболочки твэла; 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 твэлов, баланса безопасности и экономичности эксплуатации твэлов.

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 конструктивных параметров твэла, мощности РУ, температурного режима теплоносителя, размещения и вертикального перемещения ОР СУЗ, перестано-

вок ТВС на поврежденность оболочки твэла позволило разработать метод расчета поврежденности оболочки, учитывающий ползучесть как основной процесс накопления поврежденности при нормальных условиях эксплуатации РУ, факторы, определяющие поврежденность оболочки, а также ограничения по остальным критериям приемки твэла (на примере критериев прочностной группы).

2. Определена количественная мера значимости факторов, детерминирующих поврежденность оболочки твэла РУ с 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 РУ, наружный диаметр оболочки твэла, диаметр топливной таблетки, толщина оболочки, шаг решетки твэлов, скорость теплоносителя на входе РУ, диаметр центрального отверстия таблетки, коэффициент теоретической плотности ядерного топлива, начальное давление гелия под оболочкой, давление теплоносителя на входе РУ.

3. 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, учитывая размещение ОР в АКЗ ВВЭР-1000 и перестановки ТВС в АКЗ в ходе четырехлетней кампании. 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 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.

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 загрузке 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 температурой 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, с постоянной средней температурой теплоносителя и с увеличением входной температуры теплоносителя на 1°C , максимум критерия эффективности Eff 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 РУ, 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 РУ, 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 реактора, 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, средней поврежденности оболочек при максимуме равномерности выгорания ядерного топлива среди ТВС алгоритма перестановок, снизить величину интервалов разброса значений поврежденности 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 случайного алгоритма перестановок ТВС, для которого максимальное значение поврежденности оболочек в 1,2 раз меньше соответствующей величины, усредненной по двум практическим алгоритмам. По сравнению с практическими 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 поврежденно-

сти 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 РУ на основе итерационного задания детерминирующих факторов, что позволило обеспечить минимум максимальной и средней поврежденности оболочек, максимум загрузки ядерного топлива и глубины его выгорания в ТВС, обеспечить максимум стабильности аксиального офсета, снизить примерно в 2 раза величину 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.

В приложении приведены документы о внедрении результатов диссертационной работы в ГП НАЭК “Энергоатом”, в учебном процессе и научно-исследовательских работах ОНПУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Оценка развития атомной энергетики Украины на долгосрочную перспективу / [Власенко Н.И., Кухарчук Н.П., Годун О.В. и др.] // Тр. XX межд. конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. – Алушта: ННЦ “Харьковский физико-технический институт”, 10-15 сент. 2012.– С. 7–8.

2. 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.

3. 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.

4. Нормативные требования к прочности и надежности элементов РУ ВВЭР и вопросы безопасности / В.П. Семишкин, С.Б.Рыжов, В.А. Мохов, В.А. Пиминов // Сб. тезисов 6-й межд. научно-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. – Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2009. – С. 119.

5. 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.

6. 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.

7. Семишкин, В.П. Расчетно-экспериментальные методы обоснования поведения твэлов и ТВС ВВЭР в аварийных режимах с большой течью из

первого контура 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.

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

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Овчинников, Ф.Я. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов / Ф.Я. Овчинников, В.В. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 359 с.

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

16. Влияние неопределенности исходных данных на оценку долговечности оболочки твэла при переменном режиме эксплуатации / М.В. Максимов, С.Н. Пелых, О.В. Маслов, В.Е. Баскаков // Ядерная и радиационная безопасность. – 2009. – Вып. 2. – С. 13–18.

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

18. Метод оценки разрушения оболочки ядерного реактора, работающего в переменной части графика нагрузки / М.В. Максимов, С.Н. Пелых, О.В. Маслов, В.Е. Баскаков // Сб. тезисов 6-й межд. науч.-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. – Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2009. – С. 133.

19. 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.: РИЦ “Курчатовский ин-т”, 2001. – С. 271–276.

20. Dittus, F.W. Equation for in-tube forced convection heat transfer coefficient calculation / F.W. Dittus , L.M. Boelter // University of California engineering publications. – 1930. – № 2. – P. 443–447.

21. Chen, J.A. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow // Process design developments. – 1966. – № 5.– P. 126–133.

22. Ross, A.M. Heat transfer coefficient between UO₂ and zircaloy-2. CRFD-1075 / A.M. Ross, R.L. Stoute.– Chalk River: Atomic energy of Canada Ltd., 1962. – 72 p.

23. 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.

24. 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.

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

26. 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.

27. 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.

28. Пелих, С.М. Математична модель зміни властивостей оболонки твела ВВЕР–1000 в змінному режимі навантаження // Ядерна фізика та енергетика. – 2010. – Т. 11, № 3 – С. 275–279.

29. 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.

30. Turnbull, J.A. The diffusion coefficients of gaseous and volatile species during the irradiation of uranium dioxide / J.A. Turnbull, C.A. Friskney // Journal of nuclear materials. – 1982. – № 107. – P. 168–184.

31. Ishimoto, S. Conductivity of nuclear fuels in high burnup regions/ S. Ishimoto, M. Hirai, K. Ito, Y. Korey // Journal of nuclear science and technology. – 1994. – № 31.– P. 796–802.

32. Itoh, K. Finite element model for analysis of fission gas release from UO_2 fuel / K. Itoh, R. Iwasaki, Y. Iwano // Journal of nuclear science and technology. – 1985. – № 22.– P. 129–138.

33. Lyons, M.F. Model of UO_2 fuel grain growth / M.F. Lyons , R.F. Boyle , J.H. Davis , V.E. Hazel // Nuclear engineering and design. – 1972. – № 21.– P. 167–169.

34. Hirai, M. Grain size effects on fission gas release and bubble swelling at high burnup / M. Hirai, T. Hosokawa, K. Une, K. Yanai // Proc. int. topical meeting on light water fuel performance.– Park City, 2000.– 437 p.

35. Battel. High burnup effects information committee report on the Task 3 of Battelle high burnup effects program, T90802: The Central Research Institute of Electric Power Industry, 1990.

36. Cunningham, M.E., Freshley, M.D. and Lanning, D.D. Development and characteristics of the rim region in high burnup UO_2 fuel pellets // Journal of Nuclear Materials. – 1992. – No. 188. – P. 19–27.

37. Present, R.D. Kinetic Theory of Gases. – N.Y.: McGraw–Hill, 1958, 55 p.

38. 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.

39. 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.

40. 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.

41. Пелых, С. Н. Метод управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора / С. Н. Пелых, М. В. Макси-

мов, А. А. Назаренко // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2012. – Вып. 2 (39). – С. 113–123.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. Максимов, М. В. Метод анализа времени эксплуатации оболочки твэла при работе ядерного реактора в режиме переменных нагрузок / М. В. Максимов, С. Н. Пелых, В. Е. Баскаков // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2008. – Вып. 1 (29). – С. 94–98.

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

47. Максимов, М. В. Метод оценки времени эксплуатации оболочки твэла в режиме переменных нагрузок / М.В. Максимов, С.Н. Пелых // Ядерная и радиационная безопасность. – 2008. – Вып. 3. – С. 3–6.

48. 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.

49. Пелих, С. М. Порівняння ефективності алгоритмів маневру потужністю ВВЕР-1000 // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2010. – № 5 (73). – С. 10–15.

50. 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.

51. Метод оценки эксплуатационного ресурса оболочки твэла ВВЭР-1000 в различных режимах нагружения / М. В. Максимов, С. Н. Пельх, О. В. Маслов, В. Е. Баскаков // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108, Вып. 5. – С. 294–299.

52. Максимов, М.В. Сравнение долговечности оболочек твэлов реактора ВВЭР-1000, работающего в переменном режиме / М.В. Максимов, С.Н. Пельх, В.Е. Баскаков // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2009. – Вып. 1 (31). – С. 49–53.

53. Методика сравнения долговечности оболочек твэлов, работающих в переменном режиме / М.В. Максимов, С.Н. Пельх, О.В. Маслов, В.Е. Баскаков // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2009. – Вып. 4/2. – С. 192–197.

54. Пелих, С.М. Метод оцінки міцності оболонки твела ВВЕР-1000 на основі енергетичного варіанту теорії повзучості // Зб. наук. праць Севастопольського нац. ун-ту ядерної енергії та промисловості. – 2010. – Вип. 3 (35). – С. 40–46.

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

56. Иванов, В. А. Эксплуатация АЭС. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 384 с.

57. АЭС с ВВЭР: режимы, характеристики, эффективность / [Аминов Р. З., Хрусталева В.А., Духовенский А.С., Осадчий А.И.] – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 365 с.

58. 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)).

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

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

61. 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.

62. 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.

63. 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., Пелых 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.

64. Pelykh, S.N. Estimation of local linear heat rate jump values in the variable loading mode / S. N. Pelykh, R. L. Gontar, T.V. Tsiselskaya // Nuclear Physics and Atomic Energy. – 2011. – Vol. 12, № 3. – P. 242–245.

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

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

67. Максимов, М.В. Основы управления ресурсом оболочки твэла в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000 / М.В. Максимов, С.Н. Пелых, Р.Л. Гонтарь // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112, Вып. 4. – С. 199–206.

68. Кобылянский, Г.П. Радиационная стойкость циркония и сплавов на его основе. Справочные материалы по реакторному материаловедению / Г.П. Кобылянский, А.Е. Новоселов. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1996. – 176 с.

69. Маркелов, В.А. Оптимизация сплава Э110 для оболочек твэлов ВВЭР–1000 / В.А. Маркелов, В.В. Новиков, М.М. Перегуд // Сб. тезисов 5-й межд. научно-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. – Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2007. – С. 72.

70. Займовский, А.С. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике / А.С. Займовский, А.В. Никулина, Н.Г. Решетников. – М.: Энергоиздат, 1994. – 232 с.

71. Lassmann, K. TRANSURANUS: A fuel rod analysis code ready for use in simulators and plant analyzers / K. Lassmann, J. Miettinen, H. Holmstroem // Proc. specialist meeting on simulators and plant analyzers. – Lappeenranta (Finland): CSNI, 1992. – p.185–204.

72. 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.

73. Nuclear power for the 21-st century: international ministerial conference, (Paris, 21–22 march 2005 y.). – Vienna: IAEA, 2005. – 298 p.

74. Бронніков, В. Перспективи розвитку ядерної електрогенерації в контексті завдань Енергетичної стратегії України / В. Бронніков, Л. Литвинський // Національна безпека і оборона. – 2008. – № 3. – С. 42 – 45.

75. Неклюдов, И.М. Состояние и проблемы атомной энергетики в Украине // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2007. – № 2. – С. 3–9.

76. Вишневский, И.Н. О стратегии развития ядерной энергетики в Украине на период до 2030 года и последующая перспектива. Материалы информ. центра ОП ЗАЭС / И.Н. Вишневский, Л.Л. Литвинский.– К.: Ин-т ядерных исследований НАНУ, 2007. – 14 с.

77. Толстоногов, В.К. О состоянии работ по управлению ресурсом энергоблоков АЭС Украины. – Чернобыль: ОЯРБ МНТЦ "Укрытие", ПО ЧАЭС, 2007. – 19 с.

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

79. Троянов, В. М. Ядерное топливо для реакторов ВВЭР. Современное состояние и перспективы // Сб. тезисов 6-й межд. научно-техн. конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". – Подольск: ОКБ "Гидропресс", 2009. – С. 22.

80. Сб. трудов 2-й межд. научно-техн. конф. "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики". Часть 1. – М.: ВНИИАЭС, 2001. – 342 с.

81. Nagrman, D.L. MATPRO-11, a handbook of materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel rod behavior. NUREG/CR-0497, TREE-1280, Rev.3 / D.L. Nagrman, G.A. Reyman.– Idaho Falls: Idaho National

Engineering Lab., 1979.– 482 p.

82. White, R.J. A new fission gas release model / R.J. White, M.O. Tucker // Journal of nuclear materials. – 1983. – № 118. – P. 1–38.

83. Christensen, J.A. Melting point of irradiated uranium dioxide / J. A. Christensen, R. J. Allio, A. Biancheria // Trans. American Nuclear Society. – 1964. – № 7.– P. 390–399.

84. Ashby, M.F. Engineering materials 1. An introduction to properties, applications and design / M.F. Ashby, D.R. Jones. – Burlington: Elsevier Butterworth–Heinemann, 2005. – 409 p.

85. База данных по ЯППУ для анализа проектных аварий ЮУ АЭС, энергоблок № 1. – Южноукраинск: ЮУ АЭС, 1999. – 643 с.

86. Design of the core for nuclear power plants: safety guide № NS-G-1.12.– Vienna: IAEA, 2004.– 247 p.

87. Способы управления ресурсом оболочек твэлов / М.В. Максимов, С.Н. Пелых, А.А. Назаренко, Т.А. Цисельская // Сб. науч. тр. Севастопольского нац. ун-та ядерной энергии и промышленности. – 2011. – Вып. 2 (38). – С. 52–62.

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

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

90. Pelykh, S.N. Theory of VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup / S. N. Pelykh, M.V.

Maksimov // Proc. of the XX-th Int. Conf. on Physics of Radiation Phenomena and Radiation Material Science. – Alushta: Kharkov Institute of Physics and Technology, 10–15 September 2012. – P. 189–190.

91. Pelykh, S.N. A model of fuel rearrangement optimization for a VVER-1000 cycling unit considering reactor power growth up to 110 % / S. N. Pelykh // Odes'kyi Natsional'nyi Politechnichniy Universytet. Pratsi. – 2012. – Вып. 1(38). – С. 112–117.

92. Pelykh, S.N. VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup / S. N. Pelykh, M.V. Maksimov // Proc. of the 4-th int. conf. “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy”. Book of Abstracts. – K.: Institute for Nuclear Research, 3–7 September 2012. – P. 122–123.

93. Пелых, С. Н. Теоретические и технологические основы безопасной эксплуатации твэлов легководного реактора / С. Н. Пелых, М. В. Максимов // Тезисы докладов XX ежегодной науч. конф. Ин-та ядерных исследований НАН Украины 28 января–01 февраля 2013 г. – К.: Ин-т ядерных исследований НАН Украины, 2013. – С. 94–95.

94. Способ стабилизации аксиального распределения нейтронного поля при маневрировании мощностью ВВЭР-1000 / М.В. Максимов, С.Н. Пелых, Т.А. Цисельская, В.Е. Баскаков // Ядерная и радиационная безопасность. – 2011. – № 1 (49). – С. 27–32.

95. 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.

96. Филимонов, П.Е. Управление энергораспределением ВВЭР с помощью офсет–офсетной диаграммы // Атомная энергия. – 1992. – Т. 73, № 3. – С. 175–179.

97. Коренной, А.А. Устойчивость поля нейтронов при переходных процессах в активной зоне реактора ВВЭР–1000: дис. ... кандидата техн. наук: 05.14.14 / Коренной Андрей Алексеевич. – К., 2003. – 144 с.

98. Филимонов, П.Е. Поддержание равновесного офсета – эффективный способ подавления ксеноновых колебаний в ВВЭР-1000 / П.Е. Филимонов, С.П. Аверьянова // Атомная энергия. – 2001. – Т. 90, № 3. – С. 184–186.

99. Аверьянова, С.П. Внедрение усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением активной зоны ВВЭР–1000 на ХАЭС / С.П. Аверьянова, Ю.М. Семченков, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. – 2005. – Т. 98, № 6. – С. 414–421.

100. 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.

101. Аверьянова, С.П. Развитие, внедрение и современное состояние расчетной программы "Имитатор реактора" / С.П. Аверьянова, А.И. Ковель, В.В. Мамичев, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. – 2008. – Т. 105, № 4. – С. 237–240.

102. Филимонов, П.Е. Настройка расчетной модели на текущее состояние реактора / П.Е. Филимонов, С.П. Аверьянова // Атомная энергия. – 1996. – Т. 80, № 6. – С. 482–485.

103. Аверьянова, С.П. Контроль локальной линейной мощности твэлов в активной зоне ВВЭР-1000 с помощью офсет–мощностной диаграммы / С.П. Аверьянова, Г.Л. Лунин, В.Н. Проселков // Атомная энергия. – 2002. – Т. 93, № 1. – С. 13–18.

104. Горохов, А.К. Ограничение аксиального офсета в реакторах ВВЭР-1000 при выполнении маневров мощности // Вопросы атомной науки и техники. Сер. "Обеспечение безопасности АЭС". – 2007. – № 16. – С. 31–44.

105. Бурукин, А.В. Испытания в реакторе "Мир" твэлов ВВЭР в режимах с циклическим изменением мощности / А.В. Бурукин, А.Ф. Грачев, В.В. Ка-

лыгин // Атомная энергия. – 2008. – Т. 104, № 2. – С. 80–84.

106. Алексеев, А.В. Формирование нейтронно-физических условий для проведения в реакторе "Мир" испытаний твэлов ВВЭР в нестационарных режимах с увеличением мощности / А.В. Алексеев, В.В. Калыгин, А.П. Малков // Атомная энергия. – 2008. – Т. 104, № 5. – С. 279–284.

107. Parks, G.T. An intelligent stochastic optimization routine for nuclear fuel cycle design / G.T. Parks // Nuclear Technology. – 1990. – Issue 2. – P. 233–246.

108. 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.



МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

ЕНЕРГО АТОМ
ENERGOATOM

**НАЦІОНАЛЬНА
АТОМНА
ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧА
КОМПАНІЯ**

№ 1283/26 від 29.01.2013 р.

На № _____ від _____ 201__ р.

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

Розрахунковий рахунок 36002100010275
у ПАТ «УкресівБанк» м. Київ,
МФО 322313, код ЗКПО 24584661

**Ректору ОННУ
проф. Оборському Г.О.**

ДОВІДКА

про впровадження в тематиці ДП НАЕК «Енергоатом»
результатів дисертаційної роботи Пелиха Сергія Миколайовича
**“Теоретичні та технологічні основи
безпечної експлуатації твєлів легководного реактора”**
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.14.14 – Теплої та ядерної енергоустановки

003649

Державне підприємство Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом», використовує наступні результати дисертаційної роботи Пелиха Сергія Миколайовича:

— метод розрахунку пошкодження оболонки твєла, що дозволяє врахувати пошкодження оболонок твєлів при нормальних умовах експлуатації РУ з реактором ВВЕР-1000 (В-320), зменшити у п'ять разів консерватизм оцінки умов руйнування оболонки за мінімальними критеріями, розширити межі безпечної експлуатації РУ і підвищити її техніко-економічні показники;

— метод керування властивостями твєлів, який дозволяє розробити автоматизований програмно-технічний комплекс керування властивостями твєлів враховуючи пошкодження оболонок, глибину вигорання, в основу якого покладено баланс безпеки та економічності експлуатації енергоблоку з реактором ВВЕР-1000;

— компромісно-комбіновану програму регулювання, яка передбачає стабілізацію аксіального офсету в АКЗ реактора ВВЕР-1000 шляхом переміщення ОР СУЗ та стабілізацію температури теплоносія на вході у реактор.

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



Д.В. Білей



ДОВІДКА

Надана Пелиху Сергію Миколайовичу в тому, що матеріали дисертаційного дослідження «Теоретичні та технологічні основи безпечної експлуатації твєлів легководного реактора» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки використовуються при підготовці магістрів та бакалаврів з напрямів «Атомна енергетика», «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» в інституті енергетики та комп'ютерно-інтегрованих систем керування в наступних курсах:

- «Фізика ядерно-фізичних процесів»;
- «Надійність та ядерна безпека АЕС»;
- «Нестационарність процесів і регулювання ЯЕР».

Довідка надана для подання до спеціалізованої вченої ради Д 41.052.04

Проректор



С.А. Нестеренко

Вих. Максимов М.В.
тел. +38 048 705-85-31



ДОВІДКА

про використання матеріалів дисертаційної роботи Пелиха Сергія Миколайовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки «Теоретичні та технологічні основи безпечної експлуатації твєлів легководного реактора» у рамках держбюджетних НДР

Надана довідка затверджує, що матеріали дисертаційної роботи Пелиха С. М. «Теоретичні та технологічні основи безпечної експлуатації твєлів легководного реактора», а саме: метод розрахунку пошкодженості оболонки, який враховує повзучість як основний процес її руйнування; модель ефективності управління властивостями твєлів; методи управління конструкційними параметрами твєла та температурним режимом теплоносія, аксіального профілювання діаметра центрального отвору таблетки, програма зміни потужності ВВЕР-1000 з постійною вхідною температурою теплоносія; ймовірнісна модель параметрів експлуатації твєла; метод управління перестановками ТВЗ; метод керування властивостями твєлів пройшли випробування та увійшли у звіти по держбюджетним НДР № 645-47 «Вивчення циклічності навантаження ВВЕР-1000 з метою визначення ефективності управління ресурсом ядерного палива при підтримці балансу потужності в енергосистемі» (№ ДР 0109U002620), № 649-135 «Вивчення можливості навантаження енергоблока АЕС з ВВЕР-1000 до 110 % від номіналу з метою визначення моменту граничного стану захисних бар'єрів безпеки» (№ ДР 0109U008453), № 680-47 «Фізико-технічні методи керування властивостями ТВЗ для забезпечення балансу безпеки та ефективності» (№ ДР 0111U010454), що були виконані у Одеському національному політехнічному університеті.

Довідка надана для подання до спеціалізованої вченої ради Д 41.052.04.

В.О. проректора



Вул. Максимовська, 1
тел. +38 048 705 8544

Д.В. Дмитришин