

Одесский национальный политехнический университет

На правах рукописи

БАСКАКОВ Владимир Евгеньевич



УДК 621.039.56

**КОМПРОМИССНО-КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД
РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ РУ С ВВЭР-1000 (В-320)
В ПЕРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ**

Специальность 05.14.14 — Тепловые и ядерные энергоустановки

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Одесса–2010

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1. Состояние проблемы перевода РУ с ВВЭР-1000 (В-320) в переменный режим эксплуатации.....	14
1.1. Экономическая целесообразность повышения маневренности ОЭС Украины.....	14
1.2. Пути повышения маневренных возможностей ОЭС Украины.....	19
1.2.1. Строительство новых ГЭС и ГАЭС.....	19
1.2.2. Модернизация существующих ТЭС в направлении повышения их маневренности.....	21
1.3. Участие АЭС с ВВЭР-1000 (В-320) в регулировании ОЭС Украины.....	27
1.4. Комплексность задачи перевода энергоблоков с ВВЭР-1000 в маневренный режим.....	35
1.4.1. Макроэкономические задачи.....	35
1.4.2. Задачи управления РУ и энергоблоком в целом в переменном режиме нагружения.....	39
1.4.3. Задачи безопасности, надежности, эффективности эксплуатации оборудования РУ и энергоблока в целом в переменном режиме нагружения.....	42
1.5. Характеристики маневренного режима эксплуатации РУ с легководным реактором типа PWR.....	44
1.6. Постановка задачи исследования по разработке метода регулирования мощности РУ с ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения.....	48
1.7. Выводы по первому разделу.....	51
РАЗДЕЛ 2. Математическая модель изменения свойств оболочки твэла ВВЭР-1000 в различных эксплуатационных режимах.....	53

2.1. Математическая модель термомеханических процессов в твэле в режимах постоянного и переменного нагружения.....	53
2.1.1. Анализ процессов, влияющих на долговечность оболочки твэла в постоянном и переменном режимах нагружения.....	53
2.1.2. Критерии работоспособности твэла.....	59
2.1.3. Модель анализа термомеханических процессов в оболочке твэла....	62
2.2. Расчетная модель изменения свойств твэла при переменных нагружениях.....	68
2.2.1. Исходные и выходные данные для анализа изменения свойств оболочки твэла при переменных нагружениях.....	70
2.2.2. Основные теплогидродинамические соотношения, моделирующие изменение свойств оболочки твэла при переменных нагружениях.....	72
2.2.3. Основные механические соотношения, моделирующие изменение свойств оболочки твэла при переменных нагружениях.....	84
2.2.4. Учет взаимного влияния теплогидродинамических и механических процессов при моделировании изменения свойств оболочки твэла, подверженной переменным нагружениям.....	87
2.3. Выводы по второму разделу.....	93
РАЗДЕЛ 3. Анализ результатов моделирования свойств оболочки твэла РУ ВВЭР-1000/В-320 в переменном режиме.....	94
3.1. Замыкающие соотношения для моделирования изменения свойств топлива РУ ВВЭР-1000 (В-320) в переменном режиме.....	94
3.1.1. Замыкающие соотношения для моделирования свойств материалов топливной таблетки.....	95
3.1.2. Замыкающие соотношения для моделирования свойств материалов оболочки твэла.....	100
3.2. Влияние основных конструкционных характеристик твэла и режимных параметров АКЗ ВВЭР-1000 на долговечность оболочки твэла в переменном режиме нагружения.....	112

3.3. Сравнение долговечности оболочки твэла РУ ВВЭР-1000 в различных режимах нагружения.....	118
3.4. Исследование параметрической чувствительности разработанной математической модели	124
3.5. Сравнение долговечности оболочек твэлов топлива различных производителей для комбинированного режима переменного нагружения РУ ВВЭР-1000.....	131
3.6. Выводы по третьему разделу.....	134
РАЗДЕЛ 4. Результаты модельного эксперимента применения компромиссно-комбинированного метода регулирования мощности РУ ВВЭР-1000 (В-320)	138
4.1. Комплексный показатель эффективности эксплуатации РУ ВВЭР-1000 в переменном режиме.....	138
4.2. Модельный эксперимент по выбору метода регулирования мощности РУ ВВЭР-1000 (В-320).....	146
4.3. Выводы по четвертому разделу.....	168
ВЫВОДЫ.....	171
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ. Документы о внедрении.....	189

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АО – аксиальный офсет;
- АКЗ – активная зона;
- ГАЭС – гидроаккумулирующая электростанция;
- г/о ПД – газообразные продукты деления;
- ГЦН – главный циркуляционный насос;
- ДР – дистанционирующая решетка;
- КГТЭ – комбинированная газотурбинная энергоустановка;
- КГЭС – когенерационная газовая электростанция;
- 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;
- ПГУ – парогазовая установка;
- ПС – программное средство;
- РУ – реакторная установка;
- СБР – система борного регулирования;
- СУЗ – система управления и защиты;
- СЭ – срок эксплуатации;
- ТВС – тепловыделяющая сборка;
- ЦКС – циркулирующий кипящий слой;
- ВWR – кипящий ядерный реактор;
- LOCA – тяжелая авария с потерей теплоносителя;
- LWR – легководный ядерный реактор;
- PWR – реактор с водой под давлением.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Анализ развития мировой энергетики показывает, что в настоящее время атомная энергетика, основой которой являются АЭС с водородными энергетическими реакторами (ВВЭР), занимает прочные позиции. Ренессанс атомной энергетики в мире после аварии на Чернобыльской АЭС объясняется такими глобальными причинами, как ограниченность природных запасов органического топлива, доступных с точки зрения экономической эффективности добычи, и неуклонно возрастающие негативные экологические последствия выбросов продуктов сгорания углеводородного сырья [1].

Национальная программа развития энергетической отрасли Украины определяет увеличения доли выработки электроэнергии на АЭС до 60 % [2]. Кроме того, диктуется необходимость адаптации действующих и планируемых к строительству энергоблоков АЭС к специфическим условиям работы в современных и перспективных энергосистемах. Специфические условия заключаются в том, что если доля выработки электроэнергии в энергосистеме на АЭС находится в пределах (25...50 %) и происходит сокращение доли генерирующих установок, работающих в полупиковом режиме, то возникает несоответствие между выработкой и потреблением электроэнергии в системе. Это условие существенно обостряется, если доля выработки электроэнергии в энергосистеме на АЭС превышает 50 % [3].

С учетом существующих инвестиционных трудностей при сооружении новых пиковых и полупиковых генерирующих установок, весьма важным становится эволюционное развитие действующих атомных энергоблоков в направлении хотя бы минимального участия в регулировании энергосистемы страны.

Следовательно, актуальна задача перевода АЭС с ВВЭР-1000 (В-320) из эксплуатации в базовой части графика электрической нагрузки энергосистемы в полупиковую. Хотя переменный режим эксплуатации РУ с

ВВЭР-1000 до сих пор не применялся и проектом предусматривается эксплуатация ВВЭР-1000 (В-320) в базовом режиме. Однако оборудование первого контура ВВЭР-1000 (В-320) рассчитано на возможность эксплуатации АЭС в режиме регулирования частоты и мощности в энергосистеме, при этом регулировочный диапазон нагрузки находится в пределах 30–100 % от номинальной мощности; за срок службы РУ допускается 10000 циклов набора и снижения нагрузки в пределах регулировочного диапазона [4].

Можно признать приемлемыми и обоснованными только такие пути изменения регламентных условий эксплуатации атомного энергоблока, которые, во-первых, не снижают его надежность и безопасность по всем регламентным показателям, и, во-вторых, сохраняют на требуемом уровне экономическую эффективность эксплуатации. Такой подход к изменению проектных характеристик атомного энергоблока лимитируется регламентными показателями ядерного реактора и, в меньшей мере, – турбоустановки.

Возможность этапной и планомерной эволюции серийной модели энергоблока с ВВЭР-1000 (В-320) в направлении изменения проектных условий эксплуатации, с целью регулирования нагрузки энергосистемы, обеспечивается:

- постоянно уточняющимися нейтронно-физическими данными и расчетными программными кодами, которые позволяют обосновывать принятие нормативных коэффициентов запаса при уменьшенной консервативности;
- совершенствованием аппаратуры контроля нейтронного потока и точностью обработки измерений в реакторе для уменьшения погрешности расчета мощности;
- оптимальными методами управления неравномерностями энерговыделения в осевом и радиальном направлении, (усовершенствованные ТВС с гадолинием, твэлы с уменьшенным объемом

газосборников), контролируемое выравнивание полей энерговыделения в процессе длительного выгорания топлива.

На эволюционном этапе развития блоков ВВЭР-1000 (В-320) для выявления наилучших вариантов их модернизации необходимы интегральные показатели, позволяющие сопоставлять между собой различные варианты изменения проектных характеристик эксплуатации энергоблока.

Таким образом, ренессанс ядерной энергетики на рыночном этапе ее развития неразрывно связан с изменением регламентных характеристик РУ и, как следствие, с разрешением комплекса взаимоисключающих требований между обеспечением экономичности и ядерной безопасности.

Противоречие между экономической целесообразностью и безопасной эксплуатацией РУ с ВВЭР-1000 (В-320) в переменном режиме проявляется из-за отсутствия формализованных зависимостей, характеризующих состояние ядерного топлива, в частности, оболочки твэла, от многократных изменений мощности РУ. Разрешение указанных противоречий является актуальной задачей.

Диссертационная работа направлена на решение научной задачи, состоящей в поиске механизма влияния переменного нагружения РУ с ВВЭР-1000 на изменение состояния оболочки твэла, включая определение ее предельного состояния, с точки зрения ядерной безопасности, для принятия решения о допустимости ее эксплуатации в переменной части графика электрической нагрузки.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Основные научные исследования диссертации выполнены в соответствии с "Энергетической стратегией Украины на период до 2030 г.", утвержденной распоряжением Кабинета Министров от 15.03.2006 г. № 145-р, "Концепцией повышения безопасности действующих энергоблоков АЭС", утвержденной распоряжением Кабинета Министров от 13.12.2005 г. № 515, Законом Украины "О приоритетных направлениях развития науки и техники", в рамках направления "4. Новейшие и ресурсосберегающие технологии в

энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе" и заданием госбюджетной научно-исследовательской работы № 645-47 «Вивчення циклічності навантаження ВВЕР-1000 з метою визначення ефективності керування ресурсом ядерного палива при підтримці балансу потужності в енергосистемі» (№ держ. реєстр. 0109U002620).

Цель и задачи исследования. Целью работы является создание нового метода регулирования мощности активной зоны РУ с ВВЭР-1000 (В-320) в переменной части графика электрической нагрузки и определение условий возникновения предельного состояния оболочки твэла при нормальной эксплуатации РУ в переменном режиме нагружения.

Достижение цели осуществляется решением сформулированной последовательности таких исследовательских задач:

- анализ существующих методов обеспечения соответствия между выработкой и потреблением электроэнергии в энергосистеме Украины;
- разработка математической модели твэла активной зоны (АКЗ) РУ с ВВЭР-1000 для оценки долговечности оболочки твэла в зависимости от режима переменного нагружения;
- определение влияния режимных параметров АКЗ РУ и конструкционных характеристик ТВС на изменение свойств оболочки твэла в переменном режиме нагружения;
- исследование ТВС различных конструкций на предмет разрушения оболочки твэла при переменном нагружении;
- разработка комплексного показателя для сопоставления эффективности различных режимов и определения эффективности эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 (В-320) в переменной части графика электрической нагрузки;
- разработка метода регулирования мощности РУ ВВЭР-1000 (В-320) при переменном режиме нагружения АКЗ.

Объект исследования: активная зона РУ с ВВЭР-1000 (В-320), которая эксплуатируется в переменной части графика электрической нагрузки.

Предмет исследования: модели и методы регулирования мощности

реакторной установки ВВЭР-1000 в режиме переменного нагружения.

Методы исследования: математический анализ, позволил определить свойства анализируемых функций; имитационное моделирование, подтвердило полученные теоретические результаты; моделирование изменения свойств ядерного топлива и оболочки в зависимости от выгорания на основе моделей, позволило обосновать свойства ТВЭЛ; моделирование нестационарных процессов теплогидравлического и механического взаимодействия между топливной таблеткой и оболочкой с помощью метода конечных элементов (МКЭ), позволило учесть влияние переменных режимов на состояние ТВЭЛ; компьютерное моделирование переходных процессов в ЯР, позволило изучить стабильность поля энерговыделения при маневрировании; энергетический вариант теории ползучести, позволил разработать физически обоснованный показатель долговечности оболочки, учитывающий реальную последовательность режимов нагружения, их характеристики и особенности конструкции ТВЭЛ; комплексный анализ сложных технических систем, позволил синтезировать метод регулирования мощности РУ в переменном режиме.

Научная новизна полученных результатов.

1. Усовершенствован метод анализа долговечности оболочки ТВЭЛ, который базируется на энергетическом варианте теории ползучести, что дало возможность учитывать требования всех критериев прочности оболочки ТВЭЛ РУ с ВВЭР-1000 (В-320) в единой расчетной модели.

2. Получила дальнейшее развитие математическая модель изменения свойств оболочки ТВЭЛ РУ на базе совместного решения системы уравнений теплопроводности и механической деформации МКЭ, которая отличается тем, что процессы ползучести и накопления повреждений оболочки определяются взаимосвязанно через работу разрушения, вычисляемую на основе энергетического варианта теории ползучести, что дает возможность определить ее состояние при переменном нагружении РУ.

3. Впервые на основе синтезированной математической модели оболочки

твэла РУ исследована в переменном режиме нагружения параметрическая чувствительность оценки долговечности к режимным характеристикам АКЗ ЯР и конструктивным параметрам твэла ТВС ВВЭР-1000, и показано, что существует три группы характеристик и параметров: практически не влияющих, слабо влияющих, и определяющих условия разрушения.

4. Впервые предложен комплексный показатель оценки эффективности эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 в переменной части графика электрической нагрузки, отличающийся от коэффициента использования установленной мощности, применяемого для уровня технико-экономического анализа, использующий четыре уровня анализа (параметрический, структурный, технико-экономический и вероятностный), что дает возможность сопоставлять между собой различные варианты методов регулирования мощности РУ по интегральному показателю при различных направлениях эволюции проекта.

5. Впервые предложен и обоснован компромиссно-комбинированный метод регулирования мощности РУ с ВВЭР-1000, предусматривающий изменение мощности РУ в интервале от 80 до 100 % при поддержании постоянной температуры теплоносителя на входе в ЯР, что дает возможность использования конкурирующих процессов на этапе отравления-разотравления для стабилизации поля энерговыделения в аксиальном направлении.

Полученные научные результаты подтверждаются использованием современных, хорошо апробированных компьютерных кодов, использованием строгого математического аппарата при проведении аналитических выкладок. Основные результаты подтверждены экспериментально и практикой эксплуатации АЭС с реакторами ВВЭР-1000. Все приведенные в диссертационной работе результаты не противоречат известным физическим законам.

Практическая ценность полученных результатов. Разработанный метод регулирования мощности, являющийся основой алгоритма управления

любым ЯР типа ВВЭР, характеризуется сохранением целостности оболочек твэлов, стабильностью поля энерговыделения, высокими коэффициентом использования установленной мощности и вероятностью безотказной работы системы управления, что даст возможность повысить качество электрической энергии и осуществить экспортные поставки электроэнергии в Европу.

Результаты работы внедрены в учебный процесс ОНПУ в дисциплинах «Надежность и ядерная безопасность АЭС», «Нестационарность процессов и регулирование ЯЭР» и на курсах повышения квалификации и переподготовки оперативного персонала энергоблоков.

Личный вклад соискателя. Все научные результаты, изложенные в диссертации, получены автором самостоятельно. Автору принадлежат основные идеи, направленные на создание метода оценки долговечности оболочки твэла и метода оценки эффективности эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит: в [5, 6] — разработка модели оболочки твэла; в [7, 8] — предложен МКЭ при совместном решении уравнений теплопроводности и механической деформации; в [9, 10] — предложена классификация режимных характеристик и конструкционных параметров, влияющих на долговечность оболочки в переменном режиме нагружения; в [11, 12] — разработан показатель эффективности эксплуатации РУ в переменном режиме в виде вектора многомерного пространства параметров; в [13, 14] — предложен и обоснован компромиссно-комбинированный метод регулирования мощности РУ.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационного исследования докладывались, обсуждались и получили одобрение на международных научно-практических конференциях и семинарах: щорічні конференції ІЯД НАН України – м. Київ, січень, 2008, 2009 р.; 5-й международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», г. Подольск, 29.05.–1.06.2007 г.; Международной научно-практической конференции «Безопасность,

надежность и управление ресурсом энергоблоков АЭС Украины; Семинаре «Первоочередные задачи реализации энергетической стратегии Украины в области ядерной энергетики» – г. Одесса, 4–7.06.2007 г.; 17th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, 24–29.09.2007 г., Yalta, Crimea, Ukraine; 5-й международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2008) – г. Москва, 21–23.05.2008 г.; 2nd International Conference on Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-Kyiv), 9–15.06.2008 г., Kyiv, Ukraine; 2008 IEEE Nuclear Science Symposium, 6-й международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» – г. Подольск, 26–29.05.2009 г.

Публикации По материалам диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, из них 7 — в специализированных научных изданиях, рекомендованных ВАК Украины.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов, приложения и списка использованных источников из 135 наименований. Общий объем диссертации составляет 189 страниц (из них 173 – основного текста), 41 рисунок, 45 таблиц.

РАЗДЕЛ 1.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕВОДА РУ С ВВЭР-1000 (В-320) В ПЕРЕМЕННЫЙ РЕЖИМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

1.1. Экономическая целесообразность повышения маневренности ОЭС Украины

Одновременное генерирование и потребление электроэнергии в объединенной энергетической системе (ОЭС) Украины требует соответствия рабочей мощности всех источников энергии и мощности нагрузки в каждый момент времени. Обеспечение такого соответствия не вызывает затруднений при плотных графиках нагрузки системы, т.е. когда достаточно большую часть вырабатываемой электроэнергии потребляют предприятия и службы с непрерывным режимом работы, а также при наличии необходимого числа маневренного оборудования.

В результате значительного роста энергопотребления жилищно-коммунальным хозяйством (ЖКХ) и транспортом, с 1960–х годов началось разуплотнение графиков нагрузки ОЭС Украины и возникло противоречие (дисбаланс) между источниками и потребителями электроэнергии [16]. Для обеспечения соответствия между производством и потреблением электроэнергии в ОЭС производство электроэнергии в современных условиях существенно меняется во времени. В суточном графике электрических нагрузок в ОЭС выделяют базовую, полупиковую и пиковую области. Базовая область ограничена сверху ординатой, соответствующей минимальной суточной (ночной) нагрузке. Пиковая область, соответствующая утреннему и вечернему пикам нагрузки длительностью по 3...4 ч, ограничена снизу ординатой, соответствующей минимальной дневной нагрузке. Между базовой и пиковой областями находится полупиковая область протяженностью 16–18 ч [17].

Переменная часть графика электрических нагрузок представлена пиковой и

полупиковой областями. При эксплуатации энергоустановки в базовой части графика электрических нагрузок мощность энергоустановки не меняется в течение суток. В качестве показателя, характеризующего график электрической нагрузки, используется коэффициент неравномерности $\alpha_{сут}$, определяемый следующим образом [17]:

$$\alpha_{\text{н\oд}} = P_{\text{min}} / P_{\text{max}} , \quad (1.1)$$

где P_{min} – минимальная суточная нагрузка системы, МВт;

P_{max} – максимальная суточная нагрузка системы, МВт;

Для типичного графика нагрузки энергосистемы коэффициент неравномерности потребления электроэнергии в течение суток $\alpha_{сут}$ имеет величину несколько более 50 %.

В настоящее время наибольшим сектором потребления энергоресурсов в экономике Украины является потребление в ЖКХ, включая сферу коммерческих и государственных услуг (жилые дома, школы, больницы, торговые центры и т.п.). В непродуцированной сфере Украины потребляется сегодня 42 % первичных энергоресурсов, что больше объема потребляемой энергии как в секторе промышленного производства, так и в сфере транспорта (табл. 1.1) [18].

Таблица 1.1

Структура общего конечного потребления энергоресурсов по секторам экономики Украины

Сектор экономики Украины	Доля в потреблении энергоресурсов, %
Жилищно-коммунальное хозяйство и сектор услуг	42
Промышленность	40
Транспорт	10
Сельское хозяйство	8

Электрическая нагрузка в непродуцированных зданиях характеризуется широким диапазоном, что приводит к большой неравномерности энергопотребления [19] (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Типичные диапазоны электрической нагрузки в непроизводственных зданиях (данные Европы и США)

Тип здания	Диапазон электрической нагрузки, кВт	Коэффициент неравномерности
Рестораны	50–80	0,63
Многоэтажные дома	50–100	0,50
Крупные магазины	90–120	0,75
Гостиницы	100–2000	0,05
Больницы	300–1000	0,30
Торговые центры	500–1500	0,33
Учебные заведения	500–1500	0,33
Офисные здания	500–2000	0,25

По причине останова большого количества предприятий в выходные дни потребление электроэнергии в системе кроме суточной неравномерности характеризуется также существенной недельной неравномерностью. Отношение средних нагрузок субботнего и воскресного дней к соответствующим нагрузкам других дней недели составляет 72–80 %. Нагрузка энергосистемы подвержена также значительным сезонным изменениям из-за меняющихся в течение года длительности светового дня и коммунально-бытовой нагрузки (рис. 1.1) [20].

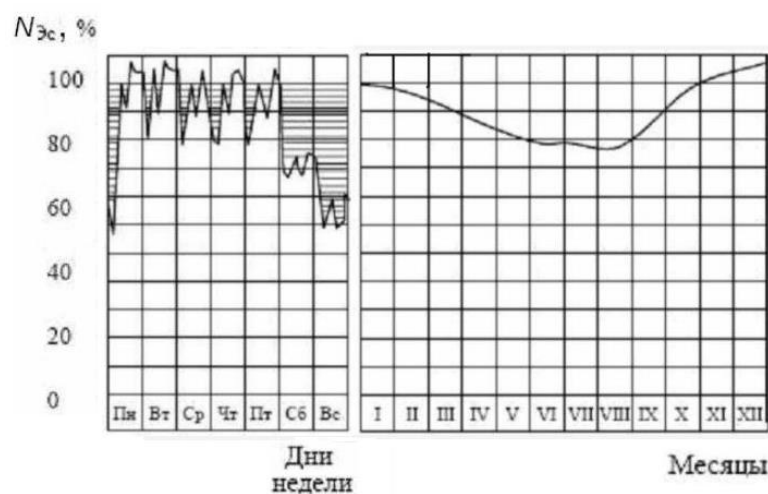


Рис. 1.1. Недельный и годовой графики нагрузки энергосистемы: $N_{эс}$ – максимальная электрическая мощность энергосистемы, %

Энергопотребление по годам также характеризуется значительной неравномерностью: ”Потребление электроэнергии в Украине за 8 месяцев 2009 г. (брутто) составило 108 млрд. 689,7 млн. кВт·ч, что на 16 млрд. 865,7 млн. кВт·ч (или 13,4 %) меньше, чем за аналогичный период 2008 г. ” [21].

Поскольку коммунально-бытовые, транспортные и сельскохозяйственные нагрузки характеризуются опережающим ростом по сравнению с промышленным электроснабжением на производствах с непрерывным технологическим процессом, характерной чертой современного этапа развития энергетики является увеличение существующей неравномерности (разуплотнение) суточного и недельного графиков энергопотребления, что приводит к появлению ситуаций, когда отсутствует спрос на электроэнергию, производимую энергоблоком (табл. 1.3) [22].

Таблица 1.3

Недовыработка электроэнергии энергоблоками Запорожской АЭС из-за диспетчерских ограничений за период с 2001 г по июль 2006 г

Год	2001	2002	2003	2004	2005	январь–июль 2006
Общая недовыработка из-за отсутствия спроса на электроэнергию, млн. кВт·ч	183,8	828,6	0,0	1265,7	3155,6	1099,7
В том числе из-за разгрузки энергоблоков, млн. кВт·ч	183,0	527,0	0,0	642,7	1824,1	234,6
В том числе из-за останова энергоблоков, млн. кВт·ч	0	301,6	0,0	623,0	1331,5	865,1

Из данных таблицы 1.3 следует, что недовыработка электроэнергии энергоблоками ЗАЭС из-за диспетчерских ограничений на протяжении 2001–2006 гг увеличилась более чем в 10 раз.

В большинстве стран Западной Европы изменение нагрузки в течение часа достигает 30 % от максимальной величины [20], а для энергосистемы Беларуси

минимальная нагрузка в суточном графике составляет примерно 65 % от максимальной [23].

Маневренными мощностями, вступающими в работу в часы пиковых нагрузок (утреннее и вечернее время) являются гидроэлектростанции (ГЭС) и гидроаккумулирующие станции (ГАЭС).

В настоящее время гидроэнергетические мощности составляют около 8 % совокупной мощности ОЭС Украины, тогда как по данным мировой практики, для стабильной работы системы регулирующие мощности должны составлять не менее 15 % [24]. В результате этого, в несвойственном для себя маневренном режиме сегодня вынужденно работают энергоблоки тепловых электростанций (ТЭС), что ухудшает их техническое состояние.

Стратегической целью внешней политики Украины является членство в Европейском Союзе (ЕС) [25]. Согласно Энергетической стратегии на период до 2030 г, к 2010 г предусматривается рост экспорта украинской электроэнергии с 8 млрд. кВт/ч (2005 г) до 11,4 млрд. кВт/ч в год [24]. Однако, согласно сообщению Министерства топлива и энергетики, Украина в 2008 г сократила экспорт электроэнергии по сравнению с аналогичным периодом 2007 г на 14,5 % – до 7,87 млрд. кВт/ч [26]. Экспортные возможности ухудшались из-за физического старения электростанций и высоковольтных сетей, отсутствия качественного топлива на ТЭС.

Одним из необходимых условий этого является подготовка ОЭС Украины к параллельной работе с европейской энергетической системой UCРTE/CENTREL [27]. В связи с этим необходимо отметить, что принятый в странах Европы международный стандарт качества напряжения EN 50160-94 ограничивает нормально допустимое отклонение частоты тока значениями $\pm 0,1$ % ($\pm 0,05$ Гц) [28]. Хотя подключение ОЭС Украины в 2001 г к ЕЭС России позволило стабилизировать частоту на уровне $50 \pm 0,1$ Гц, что отвечает государственному стандарту ДСТУ-ГОСТ 13109-97, устанавливающему нормально допустимое отклонение частоты $\pm 0,4$ % ($\pm 0,2$ Гц), достигнутая на

сегодняшний день стабилизация частоты с отклонениями $\pm 0,2\%$ ($\pm 0,1$ Гц) не позволяет ОЭС страны подключиться для параллельной работы с ОЭС Европы [29–31]. Таким образом, для повышения качества электроэнергии в ОЭС Украины до европейского уровня маневренные возможности энергосистемы должны быть улучшены.

1.2. Пути повышения маневренных возможностей ОЭС Украины

Существующая в течение суток неравномерность потребления электроэнергии в национальной ОЭС компенсируется в настоящее время за счёт эксплуатации в маневренном режиме ГЭС и ТЭС. Для повышения маневренных возможностей ОЭС Украины рассмотрим использование следующих альтернативных возможностей.

1.2.1. Строительство новых ГЭС и ГАЭС

Главную роль в покрытии пиковой части графика электрической нагрузки и поддержании необходимой частоты тока выполняют ГЭС и ГАЭС за счёт высокой маневренности гидротурбин. Существующих гидроэнергетических мощностей страны недостаточно для обеспечения мобильного резерва ОЭС. В настоящий момент освоено около 50 % всех потенциально доступных гидроэнергоресурсов Украины. В равнинных условиях Украины возможности строительства больших ГЭС исчерпаны [24], днепровский каскад ГЭС использует гидроэнергетический потенциал Днепра на 90%..

Перспективным для Украины является развитие гидроаккумулирования, т.к. ГАЭС характеризуются повышенной скоростью и маневренностью по сравнению с любыми другими генерирующими установками (от неподвижного состояния к турбинному режиму – 120–180 с, от турбинного к насосному – 70–80 с, от насосного режима к турбинному – 60–70 с). В системах с

преобладанием ТЭС ГАЭС обычно используются в суточном режиме регулирования. Поскольку КПД цикла насосного аккумулирования равен 68–75 %, ГАЭС может эффективно служить быстродействующим кратковременным резервом [32]. Согласно исследованиям оптимальной структуры маневренных мощностей, экономичным является покрытие пиковыми ГАЭС около 60 % общей потребности в маневренной мощности и полупиковыми ТЭС – около 40 % [33].

Рекомендуется совместное строительство АЭС и ГАЭС с соотношением мощностей в пределах от 3:1 до 2:1 [32, 33]. Технологическое объединение АЭС и ГАЭС на одной площадке обеспечивает значительное ресурсосбережение как в период строительства, так и при эксплуатации за счет совместного многоцелевого и многократного использования сооружений и ресурсов, комплексного проведения природоохранных мероприятий, совместного использования инфраструктуры, сокращения общей продолжительности строительства и трудозатрат [34].

Необходимо заметить, что введение в эксплуатацию Ташлыцкой ГАЭС, расположенной рядом с ЮУАЭС и проектировавшейся в рамках единого с АЭС энергокомплекса АЭС–ГАЭС, на которой выполнено 90 % пусковых работ, отложено из-за нерешенных экологических вопросов [24].

Правительственная программа реконструкции и строительства ГЭС до 2005 г предусматривала повышение энергетического потенциала гидроэнергетики на 1245 МВт, а доли мощностей ГЭС и ГАЭС в ОЭС – до 11 %. Однако, согласно данным Министерства топлива и энергетики Украины о производстве электроэнергии в ОЭС страны в первой половине 2009 г., данная программа не выполнена (табл. 1.4) [33].

Можно сделать вывод, что возможности создания новых мощных ГЭС и ГАЭС в условиях Украины практически исчерпаны, что делает невозможным расширение применения ГЭС (ГАЭС) для регулирования частоты и нагрузки в ОЭС, кроме их использования для покрытия пиковых нагрузок [19].

Таблица 1.4

Выработка электроэнергии в ОЭС Украины за первое полугодие 2009 г

Общая выработка, млрд. кВт-ч	АЭС, млрд. кВт-ч (доля в %)	ТЭС и ТЭЦ, млрд. кВт-ч (доля в %)	ГЭС и ГАЭС, млрд. кВт-ч (доля в %)	Нетрадиционные источники электроэнергии, млрд. кВт-ч (доля в %)
83,977	40,963 (48,8)	36,465 (43,4)	6,549 (7,8)	$2 \cdot 10^{-4}$ ($2 \cdot 10^{-4}$)

1.2.2. Модернизация существующих ТЭС в направлении повышения их маневренности

В 2003 г. ТЭС выработали около 47 % всей электроэнергии, произведенной в Украине. Проектом Стратегии развития энергетики до 2030 г. предусматривается увеличение доли выработки на ТЭС (табл. 1.5) [35].

Таблица 1.5

Изменение доли выработки электроэнергии на ТЭС Украины в 2010 – 2030 гг.

Сценарий	Доля выработки электроэнергии на ТЭС Украины по годам, %				
	2010	2015	2020	2025	2030
Базовый	45	48	52	58	68
Оптимальный	48	50	57	63	65
Пессимистичный	42	43	54	52	65

Современная ситуация в тепловой энергетике страны такова, что более 95 % энергоблоков отработали расчетный ресурс (220 тыс. ч), 64 % блоков ТЭС превысили признанный в мировой практике предел физического износа (290 тыс. ч), 85 % основного оборудования ТЭС эксплуатируется более 30 лет, усредненный остаточный ресурс работы тепловой энергетики Украины

составляет около 5 лет. По состоянию на 01.11.2003 г. наработка энергоблоков ТЭС Украины составляла: на Приднепровской, Старобешской, Луганской, Славянской ТЭС – 207–280 тыс. ч; на Трипольской, Бурштынской, Криворожской, Ладыжинской, Кураховской, Добротворской ТЭС – 170–275 тыс. ч; на Угледорской, Запорожской ТЭС – 125–215 тыс. ч; на Зуевской ТЭС – 90–130 тыс. ч [18, 36].

Поскольку в структуре производства электроэнергии страны около 50 % занимают АЭС, работающие в базовом режиме, а располагаемые гидроресурсы Украины относительно небольшие (8 %), то поддержка пиковых и полупиковых электрических нагрузок в ОЭС выполняется физически изношенными базовыми энергоблоками ТЭС, что приводит к следующим негативным последствиям: ухудшается экономичность и экологичность энергоблоков ТЭС; ускоряется физический износ оборудования ТЭС; снижается надежность электрообеспечения; создается угроза целостности ОЭС Украины [37].

В Украине 90 % энергоблоков, работающих на угольном топливе, были введены в эксплуатацию в 1960–1975 гг. и конструктивно рассчитывались на высококалорийные угли энергетических марок (теплота сгорания 23,4–27,2 МДж/кг). На протяжении 1980–2000 гг. прослеживалась тенденция к ухудшению качества углей для ТЭС: на ТЭС поставлялись угли низкого качества (16,3–19,3 МДж/кг), причем на каждую ТЭС, как правило, с 15–20 шахт. Ухудшение качества угля привело к увеличению расхода электроэнергии на собственные нужды на 1,0–3,5 %, использованию газомазутного топлива для подсветки до 30–35 % по теплу, ускорению износа оборудования.

Наряду с ухудшением качества топлива и старением оборудования при дефиците средств для его восстановления, все большее использование мощностей ТЭС в переменной части графика покрытия нагрузок ведет к увеличению количества остановов и пусков блоков, что приводит к ухудшению технико-экономических показателей: КПД блоков ТЭС мощностью 200 и 300 МВт находится на уровне 20–30 % при расчетном 36 % [38]. Продолжает

увеличиваться количество отказов оборудования. Так, количество отказов 1-й и 2-й категорий в 2003 г. возросло до 452 против 384 в 2002 г, т.е. почти на 18 %. Из-за отказов оборудования ТЭС ежегодно теряют примерно 0,5 млрд. \$ [39].

Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии на ТЭС составил в 2003 г. 0,374 кг у.т./(кВт·ч), что больше показателя 1991 г. на 17 % [38]. Уже в 2002 г. затраты на продление ресурса оборудования ТЭС составили 12 % от себестоимости производимой на ТЭС электроэнергии. Расчеты показали, что в результате накопления устаревшего оборудования и роста затрат на ремонт, затраты на продление ресурса ТЭС увеличились с 348 млн. грн в 2002 г. до 835 млн. грн в 2010 г. и становятся сопоставимыми со стоимостью нового оборудования [40].

Ежегодные суммарные издержки от использования устаревшего и изношенного оборудования ТЭС составляют 465 млн. дол. США, что сопоставимо с ежегодными инвестициями в техническое перевооружение тепловой энергетики [40].

В настоящее время из 36 млн. кВт установленной мощности ТЭС участвует в генерации около 19 млн. кВт, т.е. около 53 %. Неиспользуемая половина мощностей ТЭС исчерпала ресурс. К 2010 г. будут выведены из эксплуатации энергоблоки ТЭС суммарной мощностью 18,4 млн. кВт, имеющих предельную наработку, что приведет к снижению резерва мощности [38].

В случае невозможности регулирования нагрузки ОЭС, к 2030 г. рабочую мощность ТЭС необходимо будет увеличить в 2,5 раза (табл. 1.6) [35].

Таблица 1.6

Необходимая рабочая мощность ТЭС на период 2010 – 2030 гг.

Сценарий	Необходимая рабочая мощность ТЭС, млн кВт				
	2010	2015	2020	2025	2030
Базовый	24	28	37	41	50
Оптимальный	25	30	40	47	55
Пессимистичный	20	22	29	31	38

Из таблицы 1.6 видно, что необходимо 20 лет для ввода в эксплуатацию новых энергоблоков ТЭС и доведения оборудования существующих ТЭС до современного уровня. Хотя затраты на продление ресурса на 20 лет действующих ТЭС вдвое ниже, чем на строительство новых станций, без внедрения новых технологий кардинально повысить энергоэффективность экономики страны не представляется возможным. Энергоемкость отечественного ВВП в 3,3 раза выше, чем в ЕС, на 53 % выше, чем в Казахстане, на 8 % выше, чем в России [25, 37].

Для снижения уровня энергозатратности украинского ВВП целесообразно применение комбинированных ГТУ-ТЭЦ, в которых используются парогазовые установки совместно с водяными котлами для получения пара высокого давления (с температурой 150–170 °С), низкого давления, горячей и теплой воды, что позволяет использовать до 93 % тепла, содержащегося в топливе. При внедрении современных парогазовых технологий с расходом топлива 0,240 кг у.т./(кВт·ч) на блоках ТЭС Украины, работающих на газе, годовая экономия газа составит 1,8 млрд. м³, а стоимость сэкономленного газа – 144 млн. дол. в год [32, 40].

Высокая тепловая эффективность ПГУ и ГТУ делает наиболее желательным базисный режим их использования, благодаря своим высоким маневренным свойствам они оптимально подходят для покрытия полупиковой части графиков нагрузки. Во всех промышленно развитых странах в настоящее время ГТУ находят широкое применение для регулирования нагрузки. Например, в системах ФРГ и Австралии ГТУ снимают сезонные (зимние) пики нагрузок. В Канаде, Италии и Швейцарии ГТУ используются в суточном цикле регулирования [32]. Использование ГТУ позволяет свести до минимума экологический ущерб (за счет того, что в газе меньше углерода и больше водорода, чем в нефти и угле) при максимально высоком КПД термодинамического цикла, достигающем для перспективных газовых турбин 70 % (США) по сравнению с 40 % – для современных паровых турбин [41].

В программах Министерства энергетики США на начало XXI века ставится задача увеличения электрического КПД парогазового цикла до 65 %, а при добавлении на входе в газовую турбину высокотемпературных топливных элементов до 70 % [41].

Несмотря на отмеченные преимущества широкого внедрения ГТУ для модернизации ТЭС, поскольку в структуре доступных запасов органического топлива Украины уголь занимает 95 %, а нефть и газ – 5 %, проектом Стратегии развития энергетики до 2030 г. предусматривается максимальное использование угля [41]. Однако, суммарная добыча угля в стране упала с 81,7 млн. т в 1999 г. до 77,9 млн. т – в 2005 г.

Прогнозируемое "Энергетической стратегией Украины" увеличение до 2030 г. годового потребления энергетического угля ТЭС с 25 млн. т (2005 г.) до 63 млн. приведет к значительному увеличению выброса CO₂ в окружающую среду.

Для замены угольных котлов, установленных на ТЭС Украины, в период до 2030 г. потребуется более 60 современных котлов производительностью до 1000 т пара/ч [39, 40, 42], имеющих газоочистное оборудование. Поскольку такие котлы в Украине и РФ пока не производятся, а котлы фирм стран ЕС, Японии, США сравнительно дорогие, то в течение ближайших 20 лет в стране необходимо развить собственное котлостроение. Кроме того, себестоимость добычи энергетического угля в Украине повысилась с 572 грн/т в 2008 г. до 705 грн/т – в 2009 г. [43].

Поскольку в стране не хватает энергетического угля, Украина импортирует его в значительных количествах (92 % импорта – из РФ). Есть основания полагать, что угледобыча в Украине не имеет конкурентных преимуществ: средняя себестоимость добычи украинского угля в 2004 г. составляла 34 \$ за тонну, что в 3–9 раз превышало этот показатель для различных рудников РФ.

К 2030 г. планируется увеличить долю угля в балансе тепловой энергетики почти в 1,5 раза (до 70-75%), сократив потребление газа в два раза. Необходимость такого замещения обуславливается ростом цен на мировых

рынках газа и тем, что расход газа на единицу ВВП Украины в три-четыре раза превышает аналогичный показатель западных государств. Однако, при анализе ценовых показателей угля и природного газа неверно сопоставлять мировую цену на природный газ (около 230 \$/1000 м³) и дотируемую украинским правительством внутреннюю цену на уголь (около 40 \$/т), т.к. мировая цена на уголь уже превысила 130 \$/т. Следует учитывать, что стоимость газа и угля на мировом рынке в тепловом эквиваленте сопоставима, причем мировая цена на уголь в тепловом эквиваленте имеет тенденцию к росту по сравнению с другими видами топлив, поскольку добыча угля является более сложной технологией по сравнению с добычей нефти и газа (табл. 1.7) [44].

Таблица 1.7

Стоимость газа и угля на мировом рынке

Тип топлива	Газ	Уголь
Стоимость на мировом рынке	0,23 \$/ м ³	0,13 \$/кг
Теплотворная способность	33,5–34,3 кДж/м ³	13,4–15,9 кДж/кг
Стоимость в тепловом эквиваленте, цент/кДж,	0,669–0,688	0,817–0,970

Есть основания полагать, что общие эксплуатационные затраты на угольной ТЭС, использующей котлы с ЦКС, будут значительно больше, чем на аналогичной газотурбинной электростанции [17, 45, 46]. При использовании современных технологий (котлов и систем очисток от золы и шлака) удельная стоимость угольной ТЭС составляет 1400–1700 \$/кВт (без учета затрат, связанных с собственными водозаборами ТЭС, очистными сооружениями, отводом значительных территорий, оплатой за выбросы и сбросы значительного количества вредных веществ в воздух и воду).

Когенерационные ГТУ позволяют повысить эффективность использования топлива до 85–90 % и снизить выбросы окислов азота и углерода в атмосферу. Согласно ТЭО на когенерационные газотурбинные электростанции, экономическая выгода когенерации сохраняется даже если темпы роста

тарифов на природный газ опережают темпы роста тарифов на электроэнергию в два раза [44]. В Украине есть дополнительные источники газа - шахтный метан, запасы которого в Донбассе оцениваются в 13 трлн. м³ (по запасам шахтного метана Украина находится на 8-м месте в мире).

Ежегодная потребность в капиталовложениях на угольных ТЭС для замены устаревшего оборудования оценивается в 5-6 млрд. долларов, тогда как до 2030 г. на поддержание и модернизацию угольных ТЭС планируется инвестировать 20,2 млрд. долл., причем в ближайшие пять лет – 2,8 млрд. долл [41, 47–49].

Можно сделать вывод, что, ввиду наличия указанных системных трудностей в энергетике Украины, дальнейшее обеспечение полупикового регулирования в ОЭС за счет ТЭС невозможно, что ставит вопрос о переводе действующих энергоблоков АЭС в маневренный режим .

1.3. Участие АЭС с ВВЭР-1000 (В-320) в регулировании ОЭС Украины

Ситуация в атомной энергетике Украины в настоящее время характеризуется следующими особенностями: вводимые новые мощности на АЭС хотя и экономичны, но маломаневренны; базовый режим работы энергоблока АЭС является самым безопасным, экономичным и устойчивым, частые пуски и остановки основного и вспомогательного оборудования АЭС будут приводить к ускорению технического износа оборудования [17, 50–52]; в случае работы АЭС в переменном режиме нагружения уменьшается число часов использования установленной мощности (КИУМ) и увеличивается время их работы в менее эффективных режимах, но повышается качество электроэнергии в ОЭС и стабильность ОЭС.

В [29] отмечается, что, поскольку проектные маневренные характеристики ВВЭР-1000 в зоне уровней мощности 40 % $N_{ном}$ и выше характеризуются скоростью изменения электрической мощности 10 МВт/мин, то, исходя из сопоставления регламентных скоростей изменения мощности ВВЭР-1000 (В-

320) с условиями изменения электрических нагрузок в энергосистеме, можно сделать вывод, что энергоблоки невозможно использовать в регулируемой пиковой части как недельных, так и суточных графиков электрических нагрузок. Далее в [29] делается вывод: “Энергоблоки с ВВЭР-1000/В-320 не располагают техническими возможностями для участия в недельных графиках электрических нагрузок” (?).

Напротив, в [53] отмечается: “Для топлива ВВЭР-1000 расчетно-экспериментальные исследования показали принципиальную возможность эксплуатации при маневрировании мощности в условиях применения оптимальных алгоритмов управления активной зоны” (!). В [54] также высказывается однозначное мнение в пользу возможности работы энергоблоков с ВВЭР-1000 в маневренном режиме (!).

Из сопоставления столь противоречивых суждений, имеющих в специальной литературе, следует вывод, что, принимая во внимание существование проектного технического требования по ограничению допустимого числа циклов нагружения ВВЭР-1000, в рамках комплекса мер по обоснованию целесообразности и возможности перевода энергоблоков с ВВЭР-1000 в маневренный режим эксплуатации необходимо обосновать долговечность ключевых элементов оборудования РУ и энергоблока в целом в переменном режиме нагружения.

Маневренный режим энергоблока характеризуется следующими параметрами: регулировочный диапазон (разность максимальной и минимальной мощностей); скорость изменения нагрузки; время работы на минимальной мощности.

Регламент эксплуатации реактора ВВЭР-1000 задает режимы снижения и подъема мощности по условиям их проведения следующим образом [29]:

Снижение мощности со $100 \% N_{\text{ном}}$ до минимального контролируемого уровня (МКУ) допускается со скоростью не более $3 \% N_{\text{ном}}$ в минуту.

Подъем мощности выполняется при соблюдении следующих условий:

- от МКУ до 40 % $N_{\text{НОМ}}$ – со скоростью не более 3 % $N_{\text{НОМ}}$ в минуту;
- с 40 % $N_{\text{НОМ}}$ до 80 % $N_{\text{НОМ}}$ – со скоростью не более 1% $N_{\text{НОМ}}$ в минуту с трехчасовой выдержкой по завершении подъема мощности;
- с 80 % $N_{\text{НОМ}}$ до 100 % $N_{\text{НОМ}}$ – со скоростью не более 1 % $N_{\text{НОМ}}$ в минуту.

Проектное количество циклов нагружения для ВВЭР-1000 за полный (четырёхлетний) топливный период использования тепловыделяющих сборок (ТВС), составляет, в зависимости от конструкции ТВС [29]: для ТВС-М – до 70 циклов; для ТВС-А – до 94 циклов.

В Украине действуют четыре АЭС, на которых работают 13 энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000. Проектный срок эксплуатации всех действующих энергоблоков АЭС истекает в период до 2030 г (табл. 1.8) [55, 56].

Предусматривается продление проектного срока эксплуатации (30 лет) действующих ядерных энергоблоков на 15 лет (как минимум), поскольку действуют следующие объективные факторы [56–60]:

1. Состояние экономики Украины сегодня не позволяет обеспечить строительство новых ядерных энергоблоков в необходимые сроки для замены ныне действующих;
2. Продление срока эксплуатации энергоблока с ВВЭР-1000 стоит приблизительно \$ 120 млн., а стоимость нового реактора типа ВВЭР-1000 – \$ 1,5–2 млрд.; кроме того для демонтажа одного блока необходимо \$ 4 млрд;
3. Необходимо обеспечить время для накопления финансовых средств, требующихся для создания новых энергетических мощностей.

В энергетической стратегии Украины до 2030 г. атомная энергетика играет важную роль (табл. 1.9) [61].

Программой НАЭК "Энергоатом" планируется построить 11 новых ядерных энергоблоков. Стоимость нового энергоблока с реактором типа ВВЭР-1000 составляет 1500–2000 \$/кВт, что сопоставимо со стоимостью энергоблока ТЭС с котлами ЦКС, оцениваемой на уровне 1680–2040 \$/кВт [59].

Таблица 1.8

Сроки снятия с эксплуатации действующих и строящихся АЭС Украины

АЭС	Ввод	Ресурс	Сценарий								
			оптимистичный			реалистичный			консервативный		
			ввод	продл	СЭ	ввод	продл	СЭ	ввод	продл	СЭ
РАЭС-1	1981	2011		+15	2026		+10	2021		0	2011
(РАЭС-1*)			2026			2023					
РАЭС-2	1982	2012		+15	2027		+10	2022		0	2012
(РАЭС-2*)			2027			2024					
РАЭС-3	1986	2016		+15	2031		+10	2026		0	2016
(РАЭС-3*)			2031			2028					
(РАЭС-4)			2005	-15	2050	2005	-10	2045	2010	-10	2050
ЮУАЭС-1	1982	2012		+15	2027		+10	2012		0	2012
(ЮУАЭС-1*)			2027			2014					
ЮУАЭС-2	1985	2015		+15	2030		+10	2015		0	2015
(ЮУАЭС-2*)			2030			2017					
ЮУАЭС-3	1989	2019		+15	2034		+10	2029		0	2019
(ЮУАЭС-3*)			2034			2031					
ЗАЭС-1	1984	2014		+15	2029		+10	2014		0	2014
(ЗАЭС-1*)			2029			2016					
ЗАЭС-2	1985	2015		+15	2030		+10	2025		0	2015
(ЗАЭС-2*)			2030			2027					
ЗАЭС-3	1986	2016		+15	2031		+10	2026		0	2016
(ЗАЭС-3*)			2031			2028					
ЗАЭС-4	1987	2017		+15	2032		+10	2027		0	2017
(ЗАЭС-4*)			2032			2029					
ЗАЭС-5	1989	2019		+15	2034		+10	2029		0	2019
(ЗАЭС-5*)			2034			2031					
ЗАЭС-6	1995	2025		+15	2040		+10	2035		+10	2035
(ЗАЭС-6*)			2040			2037					
ХАЭС-1	1987	2017		+15	2032		+10	2027		0	2017
(ХАЭС-1*)			2032			2029					
(ХАЭС-2)			2003	-15	2048	2003	-10	2048	2005	-10	2045
(ХАЭС-3)			2007			2009					
(ХАЭС-4)			2009			2011					

Таблица 1.9

**Годовая выработка электроэнергии (общая и на АЭС) в Украине
в период 2005–2030 гг.**

Год	Выработка электроэнергии, млрд. кВт·ч				
	2005	2010	2015	2020	2030
Всего	185,2	210,2	251,0	307,0	420,1
На АЭС	88,76	101,2	110,5	158,9	219,0

Можно сделать вывод, что производство электроэнергии на ТЭС в Украине в ближайшем будущем будет иметь наибольшую себестоимость и угольные ТЭС будут оставаться наименее конкурентоспособными даже в случае внедрения новых технологий по сжиганию угля.

Если исходить из необходимости развивать ускоренными темпами более конкурентоспособную ядерную энергетику, то вклад мощностей АЭС в энергетику страны увеличится еще более, что неизбежно поставит вопрос о переводе уже действующих ядерных энергоблоков, как минимум, в режим недельного регулирования нагрузки, и проектировании новых энергоблоков АЭС для работы в суточном регулировании нагрузки.

Перевод энергоблоков НАЭК “Энергоатом” с ВВЭР-1000 в переменный режим эксплуатации необходим ввиду комплекса объективных экономических факторов (см. п. 1.1 и 1.2): доля мощностей ядерных энергоблоков в энергетике Украины за последние 15 лет увеличилась до 50 %; доля мощностей ГЭС и ГАЭС составляет 8 % при минимально необходимых 15 % и не может быть существенно увеличена; расчетный ресурс ТЭС через несколько лет будет полностью исчерпан; ежегодные капиталовложения для замены устаревшего оборудования на ТЭС составляют 0,56 млрд. долл., что меньше необходимых 5-6 млрд. долл. в 10 раз; для интеграции страны в ЕС необходимо повысить маневренность ОЭС Украины; кардинальное снижение энергозатратности ВВП страны возможно путем широкого внедрения КГЭС, что потребует перевода АЭС с меньшим КПД-нетто в маневренный режим.

Представляет интерес рассмотреть вопрос о целесообразности проектирования новых маневренных энергоблоков для ядерной энергетики Украины. Как известно, корпорация “Атомстройэкспорт” (РФ) победила в тендере на строительство болгарской АЭС “Белене” (2006 г.). Для АЭС “Белене” предназначается проект В-466Б с РУ ВВЭР-1000. Все характеристики проекта АЭС “Белене” соответствуют нормам МАГАТЭ и EUR (нормы для АЭС на территории Европы), на станции будет применяться маневренное

топливо, обеспечивающее возможность маневрирования в режиме диспетчерского регулирования до 75–80 % мощности и максимальную глубину выгорания.

Хотя 1 кВт·ч, произведенный на энергоблоке 1000 МВт, на 20 % дешевле, чем на энергоблоке 500 МВт, при выборе энергоблока необходимо учитывать не только стоимость кВт·ч, но и общий уровень потребления энергии, мощность присутствующих в конкретной местности единичных потребителей и неравномерность нагрузки. Чем выше уровень потребления энергии в системе, тем более мощными могут быть единичные генерирующие мощности. Например, ядерная энергетика Великобритании почти целиком построена на блоках средней мощности: только на одном из 29 английских энергоблоков смонтирован реактор мощностью 1200 МВт, а стандартным уровнем единичной мощности там стал уровень 660 МВт. Во Франции сейчас наиболее распространены два уровня единичной мощности энергоблока АЭС (900 и 1300 МВт), отличающиеся друг от друга на 30–40 % (табл. 1.10) [62].

Таблица 1.10

Структура парка французских ядерных реакторов

Мощность, МВт	Количество реакторов	Общая мощность, МВт	Доля в ядерной энергетике, %
900	34	30770	49
1300	20	26476	42
1450	4	5990	9

С точки зрения устойчивости энергосистемы, мощность энергоблока должна составлять несколько процентов от полной мощности системы [63]. Для отслеживания диспетчерского графика в энергосистеме путем регулирования мощности больше подходят блоки средней мощности, так как у них лучшие маневренные характеристики. При прочих равных условиях, энергоблоки большей мощности несут базовую часть нагрузки, а энергоблоки меньшей мощности – переменную. Однако, ввиду высокой степени зависимости от ядерной энергии, все реакторы во Франции используются в режиме следования

за нагрузкой [62]. Французские АЭС с реакторами PWR участвуют в регулировании мощности в зависимости от стадии топливного цикла: когда топливо свежее, реактор участвует во всех видах регулирования. Когда пройдено около 65 % топливного цикла, реакторы менее маневренны, и их участие в третичном регулировании мощности (следовании за нагрузкой) быстро уменьшается. Когда пройдено 90 % топливного цикла, реакторы принимают участие только в первичном регулировании. Следует отметить, что корпорация EDF планирует заменить все 58 существующих реакторов PWR на реакторы третьего поколения EPR. В настоящее время строится первый реактор EPR (табл. 1.11) [62].

Таблица 1.11

Строящиеся и запланированные новые французские реакторы серии EPR

Реактор	Тип	Мощность нетто, МВт	Начало строительства	Подключение к сети	Коммерческая эксплуатация
Flamanville 3	EPR	1620	2007	2012	2013
Penly 3	EPR	1620	2012	2017	2018

Стоимость строительства реакторов серии EPR делает их конкурентоспособными по сравнению с угольными ТЭС (при минимальных допущениях по стоимости штрафов за выброс CO₂) и КГТЭ (табл. 1.12).

Таблица 1.12

Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии на июль 2009 г. для реакторов серии “Areva NP EPR” 1650 МВт, КГТЭ и угольной ТЭС (без учета стоимости услуг финансирования)

Тип установки	“Areva NP EPR” 1650 МВт, блок № 1	“Areva NP EPR” 1650 МВт, блок № 2	КГТЭ	Угольная ТЭС
Стоимость электроэнергии, евроцент/ кВт·ч	5,4	5,5–6,0	6,8	7,0

Кроме того, при серийном производстве стоимость реактора EPR ожидается

на 20 % меньше.

Поскольку в соответствии с Европейскими Требованиями по Услугам (EUR) для строящихся АЭС предусматривается обязательная способность следовать за нагрузкой [62], можно сделать вывод, что ядерный блок с реактором PWR мощностью 1650 МВт способен выполнять функцию регулирования мощности в системе.

С учетом того, что мощность ядерной энергетики Украины (13,8 ГВт) меньше французской (63,2 ГВт) в 4,6 раза, не исключено, что наилучший маневренный блок для ОЭС Украины – это блок средней мощности (600–700 МВт). Энергоблок ВВЭР-640 (проект В-407) спроектирован на маневрирование мощностью в диапазоне от 30 до 100 % номинала и предназначался для небольших и слабосвязанных энергосистем. Однако, этот проект не был реализован в связи с ориентацией промышленности РФ на сооружение АЭС большой мощности. Вместе с тем, на основе ВВЭР-640 предлагается проект РУ В-478 с ВВЭР 300 МВт электрической мощности [64].

Следует подчеркнуть, что в России перевод энергоблоков с реакторами типа ВВЭР в маневренный режим не рассматривается ввиду того, что доля АЭС в общей выработке электроэнергии в РФ составляет 16–17 % (2006–2007 гг.),

В отличие от РФ, в Украине имеется ряд объективных экономических факторов, делающих необходимым перевод энергоблоков НАЭК “Энергоатом” с ВВЭР-1000 в переменный режим эксплуатации. Поэтому представляется целесообразным новые энергоблоки для ядерной энергетики Украины проектировать для работы в маневренном режиме, аналогично РУ ВВЭР-1000 проекта В-466Б (АЭС "Белене"), ВВЭР-640 проекта В-407 и ВВЭР-300 проекта В-478 .

Корпорация ”ТВЭЛ” (РФ), поставляющая ядерное топливо для АЭС Украины, уделяет большое внимание обоснованию работоспособности топлива в маневренных режимах [65]. Однако, украинские потребители электроэнергии

пока не готовы оплачивать электростанциям услугу по выполнению маневренных функций (на октябрь 2009 г. задолженность облэнерго перед ГП "Энергорынок" за электроэнергию составлял 6,6 млрд. грн [66]).

1.4. Комплексность задачи перевода энергоблоков с ВВЭР-1000 в маневренный режим

Поскольку дальнейшее развитие ядерной энергетики страны прямо зависит от безопасности и эффективности эксплуатации АЭС во всех режимах работы, а перевод ядерных энергоблоков в маневренный режим эксплуатации целесообразен по ряду экономических причин (см. п. 1.1–1.3), то техническую возможность перевода работающих в базовом режиме энергоблоков НАЭК "Энергоатом" с ВВЭР-1000 в маневренный режим необходимо подтвердить путём научно-технического обоснования возможности такого шага, включающего решение комплекса задач.

В рамках комплексного научно-технического обоснования перевода энергоблоков Украины с ВВЭР-1000 в маневренный режим эксплуатации можно выделить следующие основные группы задач.

1.4.1. Макроэкономические задачи

Для выполнения государственных заданий по снижению энергоёмкости ВВП и повышению энергобезопасности страны, в случае перевода энергоблоков с ВВЭР-1000 в маневренный режим необходимо на государственном уровне разработать Проект покрытия переменной части графика нагрузки ОЭС Украины, используя принцип согласованного планирования и управления производством и потреблением энергоресурсов, включая электрическую и тепловую энергию (рис. 1.2) [63].

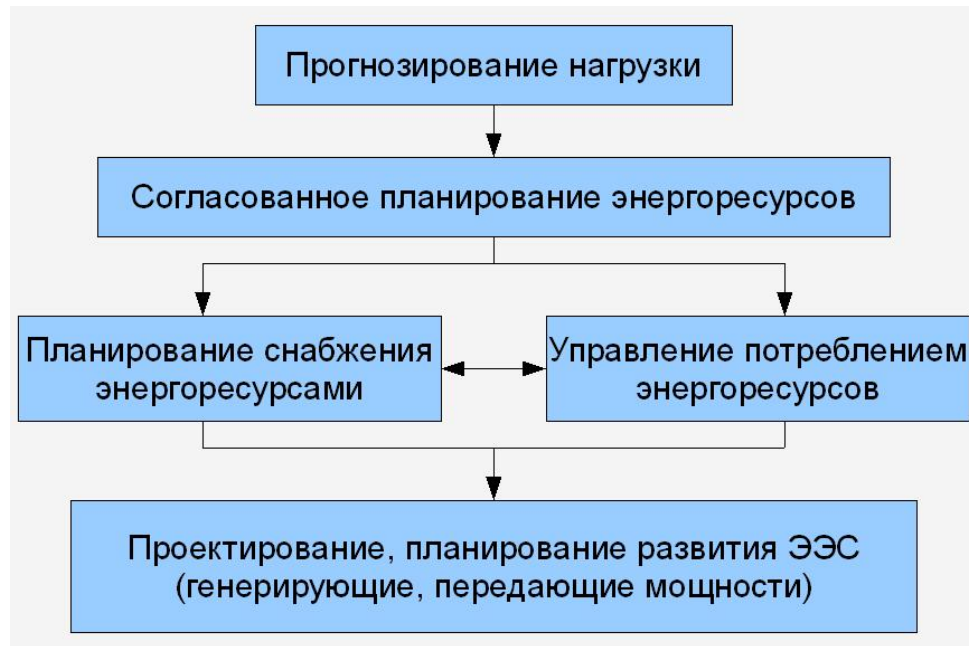


Рис. 1.2. Схема применения принципа согласованного планирования энергоресурсов при проектировании и планировании развития электроэнергетической системы (ЭЭС)

Пример результативности такого подхода – общенациональная французская программа DSM (1980–1990 гг.), в результате выполнения которой Франция является наибольшим мировым экспортером электричества (ежегодно на сумму свыше 3 млрд. евро). В составе проекта должны решаться следующие задачи:

1. Распределение функций ТЭС, ГЭС и АЭС в покрытии графика электрической нагрузки ОЭС (базовые, полупиковые, пиковые электростанции), а также обоснование рациональных способов покрытия переменной части графиков.

2. Разработка системы мероприятий по выравниванию национального графика нагрузки, в том числе межотраслевой программы управления энергопотреблением.

3. Определение направления и пропускной способности линий электропередачи (ЛЭП), обеспечивающих выдачу мощности от вводимых электростанций и необходимые перетоки для покрытия графиков нагрузки системы.

Решение вопроса об оптимальном покрытии переменной части графика нагрузки ОЭС требует рассмотрения взаимосвязанных задач [63]:

- определение возможностей различных типов электростанций для покрытия переменной части графика на основе выявления их технико-экономических показателей, степени изношенности основного оборудования и эксплуатационных свойств;
- технико-экономическое сопоставление различных типов электростанций с учетом их влияния на показатели энергосистемы.
- анализ графиков нагрузки, структуры ОЭС и направлений ее развития и выбор электростанций для работы в переменной зоне графика нагрузки;
- по каждому варианту для периода 10–20 лет разрабатываются данные о типах электростанций и агрегатов, о последовательности их ввода и динамике капиталовложений;
- составление суточных, сезонных, годовых балансов установленной мощности по ОЭС по данным суточных графиков нагрузки и характеристикам электростанций для каждого варианта;
- распределение графиков нагрузки энергосистемы между электростанциями, составление балансов энергии и определение режимов работы станций в суточных графиках;
- определение суточных расходов топлива в энергосистеме и других экономических показателей вариантов.

По экономическим показателям выявляется лучший вариант электростанций для работы в переменной части графика электрической нагрузки системы. Опыт работы электростанций стран СНГ и зарубежных энергосистем говорит о наилучших технических возможностях эксплуатации с ежесуточными остановками блоков мощностью 100–320 МВт [23, 63]. Поэтому, даже без учета особенностей ядерной технологии производства энергии на АЭС, для перевода АЭС НАЭК “Энергоатом” с мощными блоками 1000 МВт в переменный режим, кроме технической, необходима и экономическая оценка

использования крупных блоков в переменных режимах (технико-экономическое обоснование) [67].

В группу макроэкономических задач входит задача определения экономически обоснованной цены системной услуги по работе с регулируемой нагрузкой и поддержанию качества напряжения в энергосистеме, являющаяся частью более общей задачи введения рыночного тарифа на производимую на АЭС электроэнергию [30].

Институт по проблемам энергохозяйства при Университете в Кельне (ФРГ) подготовил по поручению Объединения немецких электростанций исследование об уровне и структуре цен на электроэнергию, производимую на АЭС во Франции и Германии, в пересчете на базовые цены 1994 г. (табл. 1.13) [45].

Таблица 1.13

Уровень и структура цен на электроэнергию, производимую на АЭС во Франции и Германии в 1995 г.

Параметр	Страна	Франция	ФРГ, запад. земли
Средняя выручка от поставки электроэнергии, пфеннигов на 1 кВт·ч, пфенниг/кВт·ч		13,4	18,1
Капитальные затраты на строительство АЭС, пфенниг/кВт·ч		1,93	2,59
Амортизационные отчисления по действующим ядерным реакторам, пфенниг/кВт·ч		0,42	0,57
Расходы на техническое обслуживание и эксплуатацию производящих электроэнергию установок, пфенниг/кВт·ч		0,83 – 1,07	3,14
Расходы на топливо, пфенниг/кВт·ч		1,36	1,00
Расходы на захоронение радиоактивных отходов, пфенниг/кВт·ч		0,40	0,83
Себестоимость электроэнергии АЭС, пфенниг/кВт·ч		4,94 – 5,18	8,13 – 10,67
Расходы на содержание персонала, пфенниг/кВт·ч		3,3	4,3
Численность необходимого персонала для обеспечения поставок электроэнергии, чел/1 ТВт·ч		335	404

Из данных, приведенных в таблице 1.13, можно сделать вывод, что при учёте влияния только одного такого фактора, как расходы на захоронение радиоактивных отходов, увеличение расчетной себестоимости производимой на АЭС Украины электроэнергии окажется существенным и составит около 8–10 %.

Однако, в существующем тарифе на электроэнергию АЭС значительные затраты на утилизацию ядерного топлива, демонтаж ЯР после истечения срока их эксплуатации (или модернизацию для продления эксплуатации) не заложены [68].

1.4.2. Задачи управления РУ и энергоблоком в целом в переменном режиме нагружения

Указанная комплексная задача подразумевает, прежде всего, выработку критериев оптимальности управления РУ ВВЭР-1000 (В-320) и одной из частных задач в рамках этой комплексной задачи является разработка оптимального алгоритма маневрирования мощностью действующих РУ с ВВЭР-1000.

Накопленный опыт по эксплуатации ЯР позволяет сделать вывод, что при оценке способности реактора ВВЭР-1000 к работе в переменном режиме нагружения прежде всего необходимо учитывать изменение при маневрировании нейтронно-физических характеристик АКЗ. Поскольку при маневрировании существенно меняются нейтронно-физические характеристики АКЗ, на которые влияют величина коэффициента реактивности по температуре воды и топлива, изменение распределения энерговыделения по объему АКЗ, нестационарное отравление АКЗ ксеноном-135 (Xe-135), то работа реактора в режиме переменного нагружения допустима только при условии сохранения стабильности нейтронного поля, которая напрямую зависит от эффективности

использования органов регулирования (ОР) системы управления и защиты (СУЗ) и системы борного регулирования (СБР) [69].

Уже предложенные решения по усовершенствованному алгоритму управления мощностью и распределением энерговыделения ВВЭР-1000 направлены на обеспечение его универсальности в базовом и маневренном режимах работы. Показано, что при эксплуатации ВВЭР-1000 в режиме циклических маневров мощностью целесообразно использовать три управляющие группы ОР, вводимых в АКЗ с укороченной дистанцией – 60 % вместо 80 % (% от высоты АКЗ), что дает возможность разгружать реактор до любого уровня мощности без изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе и при минимальной деформации пространственного распределения энерговыделения [53].

Следует добавить, что в перспективном реакторе ВВЭР-1300 проекта РУ В-488 (серия АЭС-2006) также предусматривается осуществление маневренных режимов без изменения концентрации бора [64].

При использовании обычных управляющих стержней изменение мощности РУ производится за счет внесения отрицательной реактивности в верхнюю часть АКЗ. Добавление бора в воду уменьшает реактивность равномерно, но вода в дальнейшем требует медленной и дорогостоящей очистки, создающей радиоактивные отходы. Для уменьшения этих воздействий на французских ЯР в течение последних 25 лет используются так называемые "серые" управляющие стержни, имеющие меньший вес с нейтронной точки зрения (менее поглощающие нейтроны) по сравнению с обычными и позволяющие устойчиво изменять выработку электроэнергии [62].

Как отмечено в [65], "...опыт эксплуатации АЭС НАЭК "Энергоатом" позволяет сделать вывод, что действующие энергоблоки могут работать в режиме недельного регулирования нагрузки". Однако, там же подчеркнуто, что "...действующие АЭС с РУ ВВЭР-1000 проекта В-320 пока не приспособлены к работе в режиме суточного регулирования нагрузки, так

как при этом возникает много сложных задач, связанных со всем комплексом технологического оборудования АЭС”.

Имеющиеся в настоящее время алгоритмы маневрирования для реакторов типа ВВЭР нуждаются в дальнейшем развитии и усовершенствовании в направлении более полного учета всего многообразия технологических и экономических факторов, влияющих на оптимальный выбор того или иного алгоритма маневрирования [53], а также путем учета влияния конструкционных характеристик ТВС, теплофизических свойств материалов топлива и оболочки РУ ВВЭР-1000/В-320, теплогидравлических характеристик АКЗ на долговечность оболочек твэлов в переменном режиме нагружения.

Для реакторов ВВЭР-440 сформулированы технические требования в случае их участия в слежении за нагрузкой в единой энергосети Европы. В частности, определены три уровня регулирования, отличающиеся физическими аспектами регулирования, влияющими на термомеханическое состояние твэлов [53]: первичное регулирование – вариации мощности РУ (в диапазоне 97,5–100 % от $N_{\text{ном}}$) осуществляются без привлечения систем управления АКЗ, только за счет свойства саморегулирования реактора при изменении частоты сети; вторичное регулирование – вариации мощности РУ (в диапазоне 80–100 % от $N_{\text{ном}}$) осуществляются с использованием только механических ОР, без использования борной системы; третичное регулирование – вариации мощности РУ (в диапазоне 50–100 % от $N_{\text{ном}}$) осуществляются с использованием всех систем регулирования АКЗ.

Таким образом, выполняя консервативную оценку, при выборе оптимального алгоритма маневрирования мощностью РУ ВВЭР-1000 необходимо учитывать возможность изменения мощности РУ в ходе маневра в диапазоне от 100 % до 50 % от $N_{\text{ном}}$, при этом могут использоваться как механические ОР, так и борная система регулирования.

Поскольку долговечность оболочек твэлов существенно зависит от режима переменного нагружения, задающего параметры АКЗ, задачу выбора

оптимального алгоритма маневрирования мощностью РУ в переменном режиме нагружения невозможно решить в отрыве от задачи определения долговечности оболочек твэлов [70, 71].

1.4.3. Задачи безопасности, надежности, эффективности эксплуатации оборудования РУ и энергоблока в целом в переменном режиме нагружения

Рассматривая задачи третьей группы, следует отметить, что при переводе блока в маневренный режим изменяются условия работы всех агрегатов. В частности, при разгрузке (и последующем нагружении) энергоблока изменяется температурное состояние элементов оборудования. Возникающие при этом термоциклические напряжения могут нарушать надежность и безопасность АЭС, что требует обоснования допустимости разгрузки агрегатов АЭС.

В критически важную группу устройств и агрегатов ядерного блока при переводе в маневренный режим следует отнести: оболочки топливных элементов (твэлов); корпус реактора; ГЦН; ОР СУЗ; турбогенераторы.

Ограничиваясь рассмотрением РУ, следует отметить, что тремя наиболее важными барьерами безопасности для реакторов типа ВВЭР (PWR) являются корпус РУ и оболочка твэла и топливная матрица при этом важнейшим барьером безопасности является оболочка твэла [70].

В работе [72] отмечено, что “В программе работ, проводимых в России по совершенствованию ядерного топлива для реакторов ВВЭР-1000 нового поколения и направленных на дальнейшее повышение эксплуатационной надежности твэлов с выгоранием топлива до 70–75 МВт·сут/кг и длительностью кампании до 6–7 лет, большое внимание уделено увеличению ресурсных характеристик циркониевых оболочек твэлов...”.

В [72, 73] подчеркивается, что деформационные изменения размеров оболочек твэлов относятся к числу основных характеристик циркониевых материалов, которые могут ограничить ресурс работы оболочек при

планируемых нагрузках в реакторах ВВЭР-1000 нового поколения. Поэтому для реактора ВВЭР-1000, в случае его эксплуатации в переменном режиме, необходимо либо иметь специально спроектированные для такого режима ТВЭЛы, выдерживающие достаточное количество циклов нагружения, соответствующее принятому алгоритму маневрирования, либо доказать с помощью того или иного метода, что оболочки ТВЭЛов действующих реакторов способны выдерживать многократное циклическое нагружение во всём диапазоне режимных параметров, в продолжение всего времени пребывания топлива в АКЗ.

В числе экономических требований, предъявляемых к алгоритму маневрирования мощностью РУ, следует отнести обеспечение максимально возможной глубины выгорания топлива. Кроме того, поскольку перевод энергоблока в маневренный режим приводит к существенному уменьшению коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) реактора, при эксплуатации РУ в переменном режиме необходимо обеспечить максимально возможный КИУМ. Важность этого иллюстрируется тем, что стоимость электроэнергии АЭС при работе в течение 7000 ч/год возрастает по сравнению с базовой (8760/год) в 1,19 раз, при работе 6000 ч/год – в 1,33 раз, при работе 5000 ч/год – в 1,55 раз [74].

Поскольку такой интегральный критерий, как КИУМ реактора, не описывает изменение физических свойств АКЗ при маневрировании, для анализа сравнительной эффективности того или иного маневренного режима необходимо ввести дополнительные критерии.

Следующая задача обусловлена тем, что Украина импортирует около 60 % энергоносителей из одной страны – России (или непосредственно, или через ее территорию). В настоящее время из природного газа вырабатывается 32 % электроэнергии и 57 % тепловой энергии, при этом собственная добыча покрывает лишь 20 % потребности в газе [18]. Поставка ядерного топлива на украинские АЭС, а также сохранение и переработка отработанного топлива на

100 % осуществляются также Россией. Исчерпание поставок ядерного топлива из РФ в обмен на вывезенное из Украины ядерное оружие и почти полное использование нормативных неснижаемых запасов топлива создают угрозу энергетической безопасности Украины, т.к. поставки энергоносителей по импорту считаются надежными, если они осуществляются по крайней мере из трех источников [25].

С учетом принятой Национальной энергетической программы, предусматривающей диверсификацию поставок топлива на АЭС Украины, одна из важных задач в рамках третьей группы задач – сравнительный анализ долговечности в маневренном режиме ВВЭР-1000 оболочек ТВЭЛов топлива различных производителей (после реализации совместного с компанией “Westinghouse” проекта по поставкам в 2011–2015 гг. ядерного топлива, Украина сможет использовать ядерное топливо производства США на нескольких блоках).

Опыт использования атомной энергии в мире показывает, что существует возможность эксплуатации энергоблоков при повышенном (по сравнению с проектным значением) уровне мощности РУ. Например, в 2007 г. французская компания EDF объявила, что с 2015 г. мощность 20 реакторов мощностью 1300 МВт будет повышена примерно на 7 %, что увеличит производство примерно на 15 ТВт·ч/год [62]. Следовательно, в рамках указанной третьей группы задач должна решаться также задача оценки долговечности оболочек ТВЭЛов в маневренном режиме ВВЭР-1000 при повышенном уровне мощности.

1.5. Характеристики маневренного режима эксплуатации РУ с легководным реактором типа PWR

В настоящее время как украинская, так и российская энергосистемы еще не выработали стандартных требований диспетчерской системы к алгоритму маневрирования мощностью РУ на АЭС. Типичным примером участия ядерных

энергоблоков США в регулировании нагрузки энергосистемы являются режимы изменения мощности реакторов энергоблоков АЭС "Point Beach", имеющих единичную электрическую мощность 1000 МВт [53].

Требованиями энергосистемы определяются следующие параметры режима изменения мощности реактора энергоблока: время (скорость) снижения мощности РУ с номинального значения до заданного уровня пониженной мощности; величина пониженной мощности РУ и время работы на ней; время (скорость) восстановления мощности реактора до номинального значения (табл. 1.14).

Таблица 1.14

**Типичные суточные режимы переменного нагружения
РУ АЭС "Point Beach" (США)**

Суточный режим	Время работы РУ на номинальной мощности, ч	Время перехода РУ на пониженный уровень мощности, ч	Время работы РУ на пониженном уровне мощности, ч	Время возврата РУ на номинальный уровень мощности, ч
13-4-3-4	13	4	3	4
15-4-1-4	15	4	1	4
16-3-2-3	16	3	2	3
17-2-3-2	17	2	3	2
17-3-2-2	17	3	2	2
18-2-2-2	18	2	2	2

В дальнейшем в обозначении суточного режима переменного нагружения первой, второй, третьей и четвертой цифрам будет соответствовать время (в часах, если это не оговорено особо), в течение которого РУ: работает на номинальном уровне мощности (100 %); переводится на пониженный уровень мощности; работает на пониженном уровне мощности; возвращается на номинальный уровень мощности.

Разная комбинация указанных параметров с работой на номинальном уровне мощности РУ формирует режимы суточного, недельного

маневрирования, комбинированные режимы (суточное маневрирование в сочетании с недельным), а также позволяет участвовать в регулировании частоты сети.

Число маневров по суточному режиму переменного нагружения в течение одного топливного цикла и минимальный уровень пониженной мощности, достигаемый в ходе маневра, для различных энергоблоков АЭС США существенно разнятся (табл. 1.15) [53].

Таблица 1.15

**Характеристики типичных режимов переменного нагружения
РУ АЭС США**

Показатель	АЭС США	“Point Beach”	“Rancho Seco”
Номинальная электрическая мощность энергоблока, МВт	1000	1000	900
Число маневров по суточному режиму переменного нагружения в течение одного топливного цикла	190–200	190–200	15
Минимальный уровень пониженной мощности, достигаемый в ходе маневра, % $N_{\text{НОМ}}$	40–70	40–70	30–50

Если скорость изменения нагрузки реактора в ходе маневрирования жестко задается регламентными требованиями, то уровень пониженной мощности хоть и задается в общем случае требованием диспетчерской системы, однако может задаваться в широком диапазоне, что ставит задачу оптимального выбора глубины разгрузки энергоблока. Одному и тому же режиму суточного маневрирования могут соответствовать различные уровни пониженной мощности, как это показано для режима нагружения 12–3–6–3 (рис. 1.3).

Пример типичных изменений мощности ядерных энергоблоков Франции при следовании диспетчерскому графику показан на рис. 1.4.

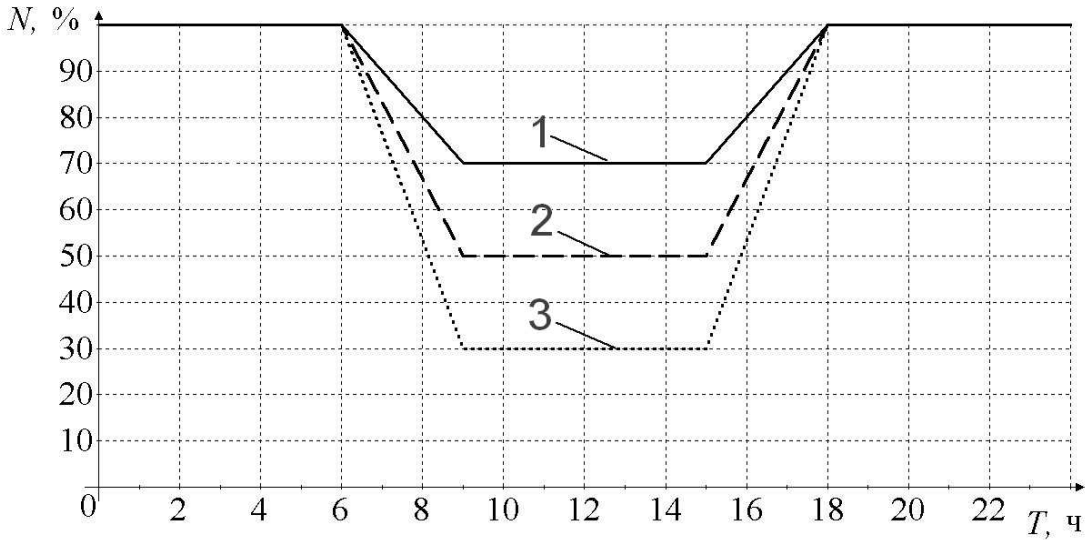


Рис. 1.3. Возможные переходные процессы изменения мощности реактора при работе энергоблока в режиме суточного следования за нагрузкой: 1, 2, 3 – снижение мощности в течение 3 ч соответственно до 70 %, 50 % и 30 %

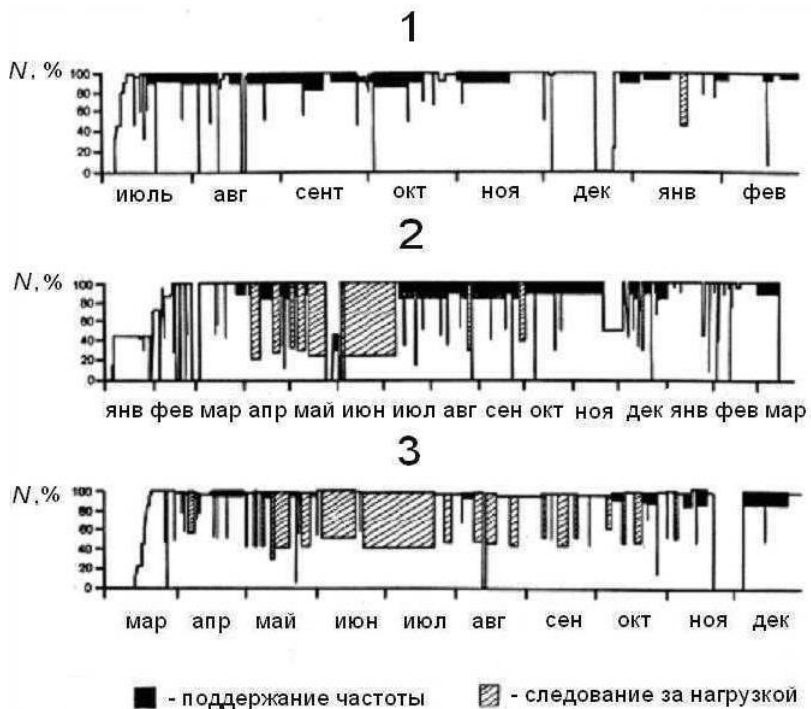


Рис. 1.4. Типичные диаграммы нагружения энергоблоков Франции : N – электрическая мощность: 1 – АЭС "Gravelines", энергоблок № 4, 4-й топливный цикл; 2 – АЭС "Cruas", энергоблок № 2, 1-й топливный цикл; 3 – Ядерный энергетический центр "Tricastin", энергоблок № 4, 4-й топливный ЦИКЛ

1.6. Постановка задачи исследования по разработке метода регулирования мощности РУ с ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения

Анализ состояния вопроса о возможности использования АЭС с ВВЭР-1000 для регулирования мощности энергосистемы показал, что существующие энергоблоки принципиально можно применять для решения такой задачи и для единой энергосистемы Украины другой альтернативы нет.

Следует отметить, что существующий на АЭС с ВВЭР-1000 подход к регулированию энерговыделения в переходных процессах не обеспечивает надежного соблюдения ограничений на его распределение в активной зоне реактора. Кроме того, с термомеханической точки зрения неизвестно, как поведет себя ядерное топливо при регулярных суточных колебаниях мощности. Также необходимо учесть изменение параметров всей тепловой схемы энергоустановки и возможное уменьшение ее тепловой эффективности при маневрировании.

Как известно, проблема устойчивости нейтронного поля может быть решена путем использования автоматических регуляторов, но для этого в управляемой зоне необходимо разместить достаточно большое число органов регулирования [75]. При проектировании реакторов PWR, эксплуатируемых в маневренном режиме, решались задачи оптимизации переходных процессов. Было установлено, что лучшим средством обеспечения устойчивости поля энерговыделения является размещение достаточно большого количества различных по поглощающей способности механических органов регулирования, неограниченных по положению в активной зоне. Такой подход в эксплуатирующихся ВВЭР-1000 (проекта В-320) неприемлем и не может быть доведен до технического решения. Поэтому в настоящее время необходимо разрабатывать специальные алгоритмы, которые не противоречат действующим регламенту эксплуатации и проекту РУ. Только такие алгоритмы

и реализованные на их основе программы регулирования позволят успешно управлять энергоблоком при переходе с одного уровня стационарной мощности на другой.

Поскольку ВВЭР-1000 проектировался для работы в стационарном режиме, для управления переходными процессами в проекте предусматривались минимальные средства: 10 ОР СУЗ и простейшие алгоритмы управления, характеризующиеся высокой надежностью, но сравнительно низкой эффективностью. Поэтому для существенного повышения эффективности управления в разрабатываемых алгоритмах целесообразно использовать присущие энергоблоку отрицательные обратные связи, влияющие на реактивность при изменении уровня мощности.

Следует отметить, что в конце прошлого века были начаты работы по модернизации алгоритмов регулирования ВВЭР-1000 в предположении поддержания аксиального офсета не более 2 % по абсолютному значению [76]. Однако, выполненные после 1990 г. работы оставили целый ряд неразрешенных вопросов. Кроме того, попытки перенести методы управления нейтронным полем PWR на ВВЭР-1000 оказались безуспешными. Как отмечено в [77], F-диаграммы оказались чрезмерно сложны в использовании, поскольку они предусматривают необходимость выбора оператором РУ средств и глубины воздействия. Метод пространственной локализации не укладывается в требования проекта РУ с ВВЭР-1000.

В работах [77–79], направленных на обеспечение поддержания аксиального офсета в реакторах ВВЭР-1000 компании НАЭК “Энергоатом” в заданном диапазоне, не изучается поведение ядерного топлива при регулярных переменных нагрузках, а также существенное влияние на безопасность РУ человеческого фактора при монотонных и многочисленных переключениях технологического оборудования .

Используя накопленные практические знания о поведении энергоблока при переводе РУ ВВЭР-1000 с одного уровня мощности на другой, проведя

углубленный анализ эффективности различных средств управления реактивностью (гомогенные и гетерогенные поглотители), а также свойств технологического парогенерирующего оборудования и методов его регулирования при изменениях уровня мощности, необходимо разработать модель и метод регулирования, которые можно реализовать технически без существенной реконструкции действующего оборудования энергоблока и изменения регламента эксплуатации.

Поскольку в настоящее время остается актуальной задача безопасного регулирования аксиального распределения энерговыделения при переходе с одного уровня мощности на другой, для решения этой задачи представляется целесообразным выполнить следующие исследования.

Необходимо разработать математическую модель поведения оболочки твэла, пригодную для оценки долговечности оболочки твэла в переменном режиме нагружения в условиях нормальной эксплуатации.

Необходимо провести исследование эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 (В-320) в режиме многократных изменений мощности, которое установит количественную связь накопленной в результате переменных нагружений ядерного топлива энергии необратимых деформаций ползучести материала оболочки твэла с режимом ее эксплуатации. Расчетно-экспериментальное исследование должно быть проведено в широком диапазоне режимных характеристик РУ и для различных типов маневров.

Необходимо рассмотреть модели и методы управления энерговыделением в активной зоне реактора при изменении мощности, которые, с одной стороны, базируются на выполнении условия сохранения аксиального офсета энерговыделения вблизи его значения, заданного до начала маневра, а, с другой стороны, – находятся в границах модельного расчета максимально допустимого количества маневров нагружение/разгружение РУ. Такой гибридный подход является наиболее эффективным способом регулирования мощности ядерного реактора и может быть положен в основу метода регулирования.

Для сопоставления различных альтернативных методов регулирования мощности РУ необходимо разработать модель, определяющую эффективность управления переходным процессом в переменном режиме нагружения РУ, а также учитывающую влияние переменного режима на экономическую эффективность эксплуатации энергоблока.

Таким образом, с учетом имеющихся средств, способов регулирования и принципов, заложенных в проект РУ с ВВЭР-1000, целесообразно разработать метод регулирования мощности, который обеспечивал бы возможность эффективно регулировать энерговыделение при переходе с одного уровня стационарной мощности на другой, что подразумевает сохранение целостности оболочек ТВЭЛов, высоких экономических показателей эксплуатации энергоблока, стабильности распределения энерговыделения в АКЗ и надежности управления РУ при маневрировании.

Кроме того, на имитационной модели необходимо провести эксперимент, подтверждающий работоспособность разработанного метода регулирования.

1.7. Выводы по первому разделу

1. Обеспечение графика электрической нагрузки и требуемого качества электроэнергии в ОЭС Украины, за счет эксплуатации в маневренном режиме одних только ТЭС и ГЭС, невозможно и экономически нецелесообразно. Без перевода энергоблоков АЭС Украины в маневренный режим невозможно повысить качество электроэнергии в ОЭС до европейских стандартов и увеличить экспорт электроэнергии в страны ЕС.

2. Действующие АЭС НАЭК “Энергоатом” с РУ ВВЭР-1000/В-320 пока не готовы к работе в переменном режиме, так как для этого необходимо выполнить всестороннее научно-техническое обоснование перевода энергоблоков Украины с ВВЭР-1000 в маневренный режим, требующее решения макроэкономических вопросов, технологических задач, связанных со

всем комплексом оборудования АЭС, и задач в области обеспечения безопасности эксплуатации АЭС.

3. Одной из важнейших задач в рамках научно-технического обоснования перевода энергоблоков Украины с ВВЭР-1000 в маневренный режим является разработка метода регулирования мощности, применение которого должно гарантировать сохранение целостности оболочек ТВЭлов, не ухудшить экономические показатели эксплуатации энергоблока, стабильность распределения энерговыделения в АКЗ и надежность управления РУ при маневрировании.

4. Для решения задачи о поведении оболочки ТВЭла в переменном режиме нагружения необходимо разработать метод анализа долговечности оболочки и математическую модель, дающую возможность определять состояние оболочки в любом переменном режиме нормальной эксплуатации РУ.

5. Для сопоставления эффективности различных вариантов изменения проектных характеристик эксплуатации ВВЭР-1000 необходимо разработать показатель, учитывающий системные свойства РУ.

РАЗДЕЛ 2.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА ВВЭР-1000 В РАЗЛИЧНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ

2.1. Математическая модель термомеханических процессов в твэле в режимах постоянного и переменного нагружения

Твэл энергетического реактора ВВЭР-1000 состоит из таблеток, спеченных из обогащенного диоксида урана, которые заключены в оболочку из циркониевого сплава Э-110. В последнее время также используются таблетки топлива, кроме урана содержащие гадолиний (твэги). Кроме состава топлива, твэги конструктивно не отличаются от твэлов и далее при анализе и моделировании рассматриваться не будут.

2.1.1. Анализ процессов, влияющих на долговечность оболочки твэла в постоянном и переменном режимах нагружения

Между топливными таблетками и оболочкой имеется зазор, заполненный инертным газом. С торцов твэл герметизируется с помощью заглушек, привариваемых к оболочке. В верхней части твэла имеется незаполненное топливом пространство – компенсационный объем (КО), в котором располагается фиксирующий элемент. Твэлы закрепляются в верхней и нижней решетках каркаса тепловыделяющих сборок (ТВС) и поддерживаются в ряде сечений по высоте дистанционирующими решетками (ДР), закрепленными на направляющих каналах (УТВС) или каркасных уголках (ТВС-А) [80].

При эксплуатации твэла реактора ВВЭР в стационарных, квазистационарных и переменных режимах можно выделить следующие механические и теплофизические процессы, влияющие на долговечность оболочки [81]: термоупругое расширение топлива и оболочки; ползучесть

топлива и оболочки; пластическое деформирование оболочки при выходе твэла на номинальную мощность, а также при изменении уровня мощности; распухание топлива; радиационное доспекание топливных таблеток; радиационный рост оболочки; выделение газообразных продуктов деления под оболочку твэла; растрескивание и фрагментация топливных таблеток; перестройка микроструктуры топлива; РИМ-эффект (образование периферийной структуры в таблетке) [82, 83]; молекулярная, контактная, излучательная проводимость газового зазора; механическое взаимодействие топливного столба с оболочкой; коррозия под напряжением; фреттинг-повреждения, т.е. повреждения оболочек (как и ДР) в местах контакта оболочек твэлов с ДР из-за постоянных колебаний твэлов, вызванных турбулентным движением теплоносителя, пульсациями давления теплоносителя и вибрацией внутрикорпусных устройств.

Расчетные оценки, выполненные с помощью программного средства (ПС) FEMAXI-V, показали, что при достижении глубины выгорания 20 МВт·сут/кг, при подъеме в течение 1 ч мощности реактора ВВЭР-1000 с уровня 50 % до уровня 100 % (линейная тепловая нагрузка в твэле при этом меняется от 124 Вт/см до 248 Вт/см), температура максимально нагретой части оболочки твэла возрастает от 374,6 °С до 455,7 °С.

Такой размах колебаний температуры максимально нагретой части оболочки твэла (≈ 81 °С) при подъеме в течение 1 ч мощности с 50 % до 100 % сохраняется до глубины выгорания более 100 МВт·сут/кг.

Температура в центре топливной таблетки, для центральной части твэла, при подъеме мощности ВВЭР-1000 с 50 % до 100 % в течение 1 ч меняется с 623 °С до 988 °С, т.е. на 365 °С. Необходимо учесть, что коэффициент температурного расширения двуокиси урана $\alpha_{Т,Т} \approx 10,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (при температуре 800 °С), тогда как для оболочки, изготовленной из сплава Э-110, коэффициент температурного расширения $\alpha_{Т,об} \approx 6,37 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (при температуре 415 °С) [71].

В результате значительной разницы между величинами скачка температуры топливной таблетки и оболочки при указанном подъеме мощности, а также того, что $\alpha_{т,т}$ примерно на 60 % превышает $\alpha_{т,об}$ оболочки, в оболочках ТВЭЛОВ возникают значительные термические напряжения, которые могут вызвать их пластическую деформацию и разгерметизацию.

В работе [71] отмечается, что разрушение оболочки в переходных процессах (как нормальных, так и аварийных) в основном происходит по механизму растрескивания, если не принимать во внимание истирание инородными веществами (фреттинг-повреждения) и пористость, возникающую, главным образом, из-за брака при производстве ТВЭЛОВ.

Растрескивание оболочки, например, водородистое растрескивание (водород, поглощенный оболочкой, снижает ее пластичность), часто вызывается сочетанием растягивающего напряжения и охрупчивания оболочки. Другими словами, при исследовании безопасности топлива реакторов типа ВВЭР полное разрушение оболочки в неаварийных условиях изучено путем рассмотрения роста трещин под действием местного, кратковременного напряжения в оболочке, имеющего величину свыше установленного предела. В связи с этим, можно выделить три направления анализа долговечности оболочки реактора типа ВВЭР, связанные со следующими видами разрушения оболочки:

- 1) Разрушение из-за механического взаимодействия между топливом и оболочкой (МВТО) на ранней стадии облучения топлива.

Для топлива с низким выгоранием МВТО происходит, если скорость подъема мощности при пуске реактора превышает некоторый определенный уровень. Типичным результатом МВТО для топлива с низким выгоранием в прошлом было йодное коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) оболочки, однако, этот тип разрушения оболочки к настоящему времени удалось полностью ликвидировать с помощью следующих мер [71]: принятие ограничений по скорости подъема мощности на ранних стадиях облучения

топлива (см. п. 1.3); выстилание внутренней поверхности оболочки прокладкой из чистого циркония толщиной около 0,1 мм (в реакторах типа PWR); изменение формы таблетки (отношение высоты к диаметру, впадины и фаски); увеличение количества ТВЭЛов в ТВС и уменьшение диаметра ТВЭЛА; внедрение более пластичных топливных таблеток за счет добавки хрома (в реакторах типа PWR).

2) Разрушение из-за эффектов в области глубоких выгораний.

В области глубоких выгораний (свыше 50 МВт·сут/кг) пластичность оболочки значительно уменьшается из-за комплексного влияния окисления со стороны воды, поглощения водорода, радиационного разрушения и т.д. [84]. Также часто образуется связывающий слой между внешней поверхностью таблетки и внутренней поверхностью оболочки, в результате чего даже малое увеличение мощности может вызывать прямое растягивающее силовое воздействие таблетки на оболочку и, в результате, оболочка подвергается как тангенциальному, так и аксиальному растягивающим напряжениям, т.е. находится в двусосном напряженном состоянии. Это – более жесткое механическое нагружение оболочки, чем при одноосном напряженном состоянии. Замечено, что объемное расширение таблетки (распухание, свеллинг) из-за роста пузырей газообразных продуктов деления (г/о ПД) на границе зерен особенно чувствительно к увеличению температуры в области глубоких выгораний. В [85] показано, что распухание, вызванное ростом газовых пузырей, происходит со скоростью около $1\%/(10 \text{ МВт} \cdot \text{сут/кг})$.

3) Усталостное разрушение.

Циклическое изменение мощности неизбежно накладывает циклическое механическое нагружение на оболочку. Циклическую (усталостную) долговечность оболочки возможно оценивать путем ввода модели циклического изменения мощности, рассчитывая амплитуду напряжения в оболочке и сравнивая расчетные результаты с кривой циклической долговечности для оболочки.

При таком анализе обычно используется консервативный подход и количество циклов задается больше реального значения. Например, консервативно принимается, что при 5 циклах облучения одного твэла коммерческого LWR в течение каждого года имеется 3 пуска и останова (0 % холодное состояние → полная мощность → 0 % горячая готовность), несколько десятков раз реактор быстро останавливается из-за выполнения ожидаемых переходных режимов (землетрясение), и 390 циклов/г – дополнительно при работе в режиме следования за дневной нагрузкой, где мощность изменяется циклически между 0 % и 100 %.

В таком гипотетическом случае, в течение всего срока эксплуатации топлива до окончательной выгрузки ТВС, общее число циклов изменения напряжения в оболочке равно примерно 2000 и расчетные результаты показали, что параметр накопленного усталостного повреждения лежит в 20 % диапазоне по сравнению с кривой усталости Циркалоя, что означает, что усталость оболочки полностью находится в безопасной области. Кроме того, напряжение в циркалоевой оболочке при числе циклов нагружения около 2000 остаётся в упругой области, что позволило сделать вывод о том, что малоцикловая усталость материала оболочки не органичивает долговечность циркалоевой оболочки твэла реактора типа LWR (в качестве материала оболочки рассматривался циркониевый сплав циркалой-4) [71].

В качестве другого доказательства того, что можно не рассматривать малоцикловое усталостное разрушение оболочки, указывается тот факт, что во многих Хальденских экспериментах твэлы испытывали несколько сотен остановов и пусков в течение всего испытательного периода, что неизбежно случается при перегруппировке твэлов и работе с измерительными приборами в активной зоне (АКЗ). И, тем не менее, при частых линейных изменениях мощности усталостного разрушения оболочек не наблюдалось [71].

Для оценки долговечности оболочки необходимо иметь достоверные данные по пределу текучести материала оболочки твэла и напряжению разрыва

топливной таблетки в области глубоких выгораний, задаваемые как свойства конструктивных материалов. Для полноты анализа разрушения оболочки твэла необходимо учесть следующие два момента [71].

Во-первых, скорость окисления оболочки со стороны теплоносителя способна напрямую определять долговечность оболочки. Следствием этого окисления могут быть бугорковая коррозия, характерная для оболочек ВВР, и усиленная равномерная (сплошная) коррозия в оболочках ВВЭР. Однако, эти проблемы, связанные с коррозией, уже в значительной степени решены путем изменения состава сплавов и процесса термической обработки, и сейчас устойчивость к коррозии значительно повышена.

Во-вторых, деформация ползучести оболочки имеет некоторый верхний безопасный предел. Обычно в энергетических реакторах оболочка необлученного твэла испытывает направленную вниз деформацию ползучести под действием давления теплоносителя до тех пор, пока открыт зазор между таблеткой и оболочкой.

С увеличением облучения (выгорания) таблетка распухает из-за накапливания продуктов деления и роста газовых пузырей, и, согласно расчетным оценкам, выполненным с помощью программы FEMAXI, зазор в твэле ВВЭР-1000 с максимальной линейной мощностью 248 Вт/см закрывается при глубине выгорания около 20 МВт·сут/кг.

После закрытия зазора, из-за продолжающегося распухания таблетки, оболочка подвергается направленной наружу деформации ползучести. Эта ползучесть из-за распухания таблетки существует вплоть до конца облучения, и окончательная деформация ползучести оболочки (тангенциальная) может грубо оцениваться на уровне $> 2 \%$, предполагая, что скорость объемного расширения таблетки равна 1% на 10 МВт·сут/кг [71].

Вплоть до настоящего времени не было наблюдений, констатирующих, что разрушение оболочки твэла происходит при деформации ползучести около 2% . В [71] делается вывод, что в настоящее время неизвестно, существует или нет

верхний безопасный предел для деформации ползучести при значительно более глубоких выгораниях (при деформации ползучести

значительно больше 2 %). Там же указывается, что при моделировании долговечности оболочки в твэлах с глубоким выгоранием топлива основной задачей является анализ МВТО при изменениях уровня мощности, в ходе которого двумя ключевыми факторами, влияющими на долговечность оболочки, являются распухание таблетки, вызванное ростом пузырей г/о ПД, и уменьшение пластичности оболочки (уменьшение деформации разрушения).

Хотя усталость оболочки, вызванная циклическим нагружением в течение всего времени эксплуатации (например, пяти циклов облучения), не является важным фактором, по крайней мере, при оценивании усталости через амплитуду напряжения [71], однако, из выполненного анализа можно сделать вывод, что результатом анализа МВТО является величина деформации ползучести материала оболочки, служащая ключевым фактором при оценке долговечности оболочки в переменном режиме нагружения.

2.1.2. Критерии работоспособности твэла

Для обоснования надежности твэлов конструкции корпорации ТВЭЛ используются четыре группы критериев оценки работоспособности твэла в стационарных, переходных и маневренных режимах работы РУ: теплофизические, коррозионные, деформационные и прочностные критерии [81, 86]. Рассмотрим подробно каждую группу критериев.

В группе теплофизических критериев задаются ограничения по температуре топлива, давлению газов под оболочкой твэла, линейной мощности твэла (табл. 2.1).

В группе коррозионных критериев задаются ограничения по толщине окисной пленки оболочки и содержанию водорода в оболочке (табл. 2.2).

Таблица 2.1

Группа теплофизических критериев

Критерий	Значение	Физический смысл
ТС1	$T_{max} \leq T_{\text{твэла}}$, где $T_{\text{твэла}}(Bu) = 3110 - 3,577 \cdot Bu$ – температура плавления топлива, К; Bu – выгорание, МВт·сут/кг-У; T_{max} – предельная температура топлива.	ограничение по температуре топлива
ТС2	$p_{\Gamma,max} \leq p_{\text{твэла}}$, где $p_{\Gamma,max}$ – предельное значение давления газов под оболочкой твэла; $p_{\text{твэла}}$ – давление теплоносителя.	ограничение по давлению газов под оболочкой твэла
ТС3	$q_l \leq q_{l,\text{твэла}}$, где q_l – линейная мощность твэла; $q_{l,\text{твэла}}$ – допустимый предел, зависящий от выгорания	ограничение по линейной мощности твэла

Таблица 2.2

Группа коррозионных критериев

Критерий	Значение	Физический смысл
КС1	$h \leq h_{max}$, где h – толщина окисной пленки оболочки; $h_{max}=60$ мкм.	ограничение по толщине окисной пленки оболочки
КС2	$H \leq H_{max}$, где H – содержание водорода в оболочке; $H_{max}=0,04$ %.	ограничение по содержанию водорода в оболочке

В группе деформационных критериев задаются ограничения по изменению диаметра оболочки и удлинению твэла (табл. 2.3).

В группе прочностных критериев задаются ограничения по тангенциальному и эквивалентному напряжениям, избыточному наружному давлению теплоносителя, комбинированному повреждению вследствие длительных статических нагрузок и циклической усталости материала

оболочки, пластической деформации оболочки в кратковременных режимах термомеханического нагружения (табл. 2.4).

Таблица 2.3

Группа деформационных критериев

Критерий	Значение	Физический смысл
DC1	$\Delta D \leq \Delta D_{\max}$, где ΔD – изменение диаметра оболочки; $\Delta D_{\max} = 0,03$ мм – для ТВС-2; $\Delta D_{\max} = 0,05$ мм – для ТВС-А;	ограничение по изменению диаметра оболочки
DC2	$\Delta L \leq \Delta L_{\max}$, где ΔL – удлинение твэла; ΔL_{\max} – зазор между верхними заглушками твэлов и верхней головкой ТВС, $\Delta L_{\max} = 46$ мм – для ТВС-2; $\Delta L_{\max} = 61$ мм – для ТВС-А.	ограничение по удлинению твэла

Таблица 2.4

Группа прочностных критериев

Критерий	Значение	Физический смысл
SC1	$\tau \leq \sigma_{SC1}$, где τ – тангенциальное напряжение; $\sigma_{SC1} = 250$ МПа.	ограничение по тангенциальному напряжению в оболочке
SC2	$\sigma_{e,\max} \leq \sigma_{02}$, где $\sigma_{e,\max}$ – максимальное эквивалентное напряжение в оболочке σ_{02} – предел текучести.	ограничение по эквивалентному напряжению в оболочке
SC3	$P \leq P_{\max}$, где P – избыточное наружное давление теплоносителя; P_{\max} – предельное значение избыточного наружного давления теплоносителя.	ограничение по избыточному наружному давлению теплоносителя
SC4	$\omega \leq \omega_{\max}$, где ω – комбинированное повреждение оболочки вследствие длительных статических нагрузок и циклической усталости материала; $\omega_{\max} = 1$.	ограничение по комбинированному повреждению оболочки

SC5	$\varepsilon_{\theta} \leq \varepsilon_{\theta, \max}$, где ε_{θ} – пластическая деформация оболочки в кратковременных режимах термомеханического нагружения; $\varepsilon_{\theta, \max} = 0,5$ % .	ограничение по пластической деформации оболочки
-----	--	---

Общепринятым при проведении детерминистических расчетов по обоснованию работоспособности твэлов является применение следующих консервативных предположений: низкие свойства теплопереноса в твэле (коэффициент теплопередачи в зазоре, теплопроводность топлива); выбор наихудших параметров твэла для теплофизических оценок максимальных температур (максимальный зазор между топливом и оболочкой в пределах допусков, минимальная плотность топлива, максимальное доспекание топлива, минимальный размер зерна в топливе в пределах допусков); выбор наихудших параметров твэла, обеспечивающий жесткое механическое взаимодействие топлива с оболочкой (минимальный зазор между топливом и оболочкой, максимальная плотность топлива, минимальное доспекание топлива, максимальный размер зерна в топливе в пределах допусков).

Для оценки эксплуатационного ресурса оболочки твэла реактора ВВЭР-1000 предложен метод расчета параметра суммарной поврежденности материала оболочки на основе энергетического варианта теории ползучести, позволяющий выполнять сравнительную оценку эксплуатационного ресурса оболочек в режимах постоянного и переменного нагружения, для разных наборов режимных и конструктивных параметров активной зоны [73].

Несмотря на наличие указанных прочностных критериев оценки долговечности твэла, в нормативной литературе недостаточно четко изложены требования к термомеханическим расчетам с точки зрения обеспечения безопасности РУ ВВЭР-1000, наиболее распространенных на АЭС Украины и России [87].

2.1.3. Модель анализа термомеханических процессов в оболочке твэла

На основе выполненного анализа возможных процессов повреждения материала оболочки твэла можно сделать вывод, что при увеличении количества циклов нагружения, прочность оболочки определяется, в основном, двумя возможными процессами повреждений [5–15]:

- КРН в атмосфере агрессивных продуктов деления.
- Повреждения оболочки, обусловленные многократными переменными и длительными статическими нагрузками.

Ввиду необходимости ограничить предмет исследования, далее полагается, что механическое повреждение оболочки под воздействием КРН исключено путем ограничения допустимых значений линейных нагрузок и скачков мощности реактора.

Метод оценки эксплуатационного ресурса оболочки твэла легководного реактора в различных режимах нагружения на основе энергетического варианта теории ползучести [73] является дальнейшим развитием метода оценки момента разрушения оболочки твэла при развитии тяжелой аварии типа LOCA [88] в реакторе ВВЭР-1000.

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

Согласно методу [88], при рассмотрении задачи о ползучести твэльной оболочки принимается во внимание тот факт, что процессы ползучести и накопления повреждений в металле протекают совместно и влияют друг на друга, т.е. являются связанными. В качестве структурного параметра поврежденности используется функция ω (см. критерий SC4 в таблице 2.4).

Данный подход успешно применялся также при анализе высокотемпературной ползучести и разрушения корпуса реактора в тяжелой ядерной аварии [88].

Работа ядерных энергоблоков ВВЭР-1000 НАЭК “Энергоатом” в переменной части графика электрической нагрузки энергосистемы предполагает многократные изменения мощности РУ. Метод использования энергетического варианта теории ползучести для оценки долговечности материала оболочки, предложенный в [73], отличается от метода, развитого в [88], следующими положениями. В работе [88] уравнения механического состояния (ползучести и накопления повреждений) циркониевых сплавов для оболочек твэлов записаны в виде

$$\dot{\rho}_e = f(k_i, T, \sigma_e, \omega(\tau)), \quad (2.1)$$

$$\dot{\omega}(\tau) = \frac{\sigma_e \cdot \dot{\rho}_e}{A_0}, \quad (2.2)$$

где A_0 – удельная энергия рассеяния, характерная для начала разрушения материала оболочки и известная для данного материала либо из эксперимента, либо из расчета, Дж/м³ [89]; $\dot{\rho}_e$ – скорость эквивалентной деформации ползучести, с⁻¹; σ_e – эквивалентное напряжение, Па; $\omega(\tau)$ – безразмерный параметр поврежденности материала оболочки; k_i – параметры материала, определяемые опытным путем на основе испытаний микрообразцов, вырезаемых из оболочек вдоль направлений ортотропии; T – абсолютная температура, К.

Для тяжелых аварий типа LOCA, используя условие разрушения оболочки твэла $\omega = 1$, из системы (2.1)–(2.2) находится удельная энергия рассеяния A_0 , накопленная к моменту разрушения материала оболочки и зависящая только от температуры [88]. При этом принимается как экспериментально доказанный факт, что величина A_0 при анализе высокотемпературной ползучести и разрушения оболочки твэла в тяжелой аварии типа LOCA может считаться не зависящей от предыстории нагружения.

Необходимо отметить, что физическая реализация эксперимента по изучению ползучести материала оболочки на модели твэла в условиях, соответствующих эксплуатационным режимам переменных нагрузок ВВЭР-1000, практически невозможна в условиях исследовательских реакторов [90–92], поскольку продолжительность таких испытаний может составлять

несколько лет. В опытах на теплофизических стендах возможно смоделировать только теплофизические условия работы твэла, не учитывая при этом нейтронно-физические и радиационные аспекты эксплуатации топлива в реакторных условиях.

Кроме того, невозможно при оценке времени эксплуатации оболочки твэла в режиме переменных нагрузок переносить экспериментальные данные по ползучести материала оболочки в условиях стационарных и аварийных режимов [88] на оболочку твэла, работающего в переменном режиме, поскольку в последнем случае необходимо учитывать всю историю нагружения материала оболочки [73].

Исключая из анализа аварийные режимы, приводящие к пластической деформации оболочки твэла, можно не рассматривать пластическое течение, возникающее за счет снижения предела текучести при аварийном повышении температуры оболочки.

Таким образом, для оценки времени эксплуатации оболочки твэла при многократных изменениях мощности РУ достаточно ограничиться вычислением работы $A(\tau)$, накопленной в процессе ползучести к моменту разрушения и затраченной на разрушение материала оболочки [93, 94]. Работа, затраченная на разрушение материала оболочки твэла, в энергетическом варианте теории ползучести [89] называется удельной энергией рассеяния $A(\tau)$.

В отличие от экспериментального метода определения удельной энергии рассеяния A_0 , накопленной к моменту разрушения материала оболочки, развитого в [88], в методе [73] для определения A_0 предлагается расчетный

подход на основании критерия разрушения оболочки твэла, записываемого следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \omega(\tau) &= \frac{A(\tau)}{A_0} = 1; \\ A_0 &\text{ определяется по условию : } \sigma_e^{\max}(\tau_0) = \sigma_0^{\max}(\tau_0); \\ A(\tau) &= \int_0^{\tau} \sigma_e \cdot \dot{p}_e \cdot d\tau, \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где величина A_0 определяется как удельная энергия рассеяния $A(\tau)$ в момент потери устойчивости τ_0 материала оболочки, при достижении равенства между величинами эквивалентного напряжения $\sigma_e^{\max}(\tau)$ и предела текучести $\sigma_0^{\max}(\tau)$ для точки, расположенной на внутренней поверхности центрального аксиального сегмента и имеющей максимальную температуру (консервативный подход).

Предлагаемый метод анализа времени эксплуатации оболочки твэла при работе ЯР в режиме переменных нагрузок основан на некоторых допущениях энергетического варианта теории ползучести: процессы ползучести и разрушения протекают совместно и влияют друг на друга, интенсивность процесса ползучести в любой момент времени τ оценивается удельной мощностью рассеяния $W(\tau)$, а интенсивность повреждения – накопленной за время τ удельной энергией рассеяния $A(\tau)$

$$A(\tau) = \int_0^{\tau} W(\tau) \cdot d\tau. \quad (2.4)$$

Вводимый в рамках указанного метода параметр поврежденности материала оболочки $\omega(\tau)$ определяется как

$$\omega(\tau) = \frac{A(\tau)}{A_0}, \quad (2.5)$$

где A_0 — удельная энергия рассеяния, характерная для начала разрушения материала оболочки и известная для данного материала либо из эксперимента, либо из расчета, Дж/м³; $\omega = 0$ — для неповрежденного материала, $\omega = 1$ — для поврежденного материала.

Входящая в (2.4) удельная мощность рассеяния $W(\tau)$ определяется следующим образом [88]

$$W(\tau) = \sigma_e \cdot \dot{\rho}_e, \quad (2.6)$$

где σ_e — эквивалентное напряжение, Па; $\dot{\rho}_e$ — скорость эквивалентной деформации ползучести, с⁻¹.

Из (2.4)—(2.6) следует условие разрушения оболочки твэла

$$\omega(\tau) = \int_0^\tau \frac{\sigma_e \cdot \dot{\rho}_e}{A_0} dt = 1. \quad (2.7)$$

Важно отметить, что эквивалентное напряжение σ_e и скорость эквивалентной деформации ползучести $\dot{\rho}_e$ должны рассчитываться с учетом изменений в термическом, механическом и химическом состоянии компонентов отдельного твэла, а также характеристик взаимодействия компонентов твэла для заданной истории уровней мощности и параметров теплоносителя РУ ВВЭР-1000.

Эквивалентное напряжение σ_e при допущении изотропности материала оболочки для простейшей одномерной модели определяется как [95]

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\theta)^2]}, \quad (2.8)$$

где σ_θ , σ_r , σ_z — напряжение в направлениях θ , r и z соответственно.

Скорость эквивалентной деформации ползучести $\dot{\rho}_e$ материала оболочки твэла может быть представлена в виде функции от следующих параметров [95]:

$$\dot{p}_e = f(\sigma_e, \bar{\varepsilon}^H, T, \Phi, \dot{F}), \quad (2.9)$$

где $\bar{\varepsilon}^H$ — безразмерный параметр упрочнения; T — температура, К; Φ — плотность потока быстрых (> 1 МэВ) нейтронов, $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; \dot{F} — скорость делений, $1/\text{м}^3 \cdot \text{с}$.

2.2. Расчетная модель изменения свойств твэла при переменных нагрузениях

С учетом общемировой тенденции по увеличению глубины выгорания топлива в течение кампании, изменение свойств топлива в области глубоких выгораний (свыше 50 МВт·сут/кг) является ключевым вопросом при анализе надежности топливных элементов в переменном режиме нагружения. Поэтому для адекватного анализа изменения свойств твэла в области глубоких выгораний необходимо иметь соответствующий расчетный инструмент (программное средство - ПС).

Моделирование изменения свойств топлива, применяемое в таком ПС, должно отличаться от обычных моделей изменения свойств топлива, т.к. свойства топлива в области глубоких и низких выгораний существенно различны. Эта разница обусловлена [71]: ухудшением теплопроводности топлива с ростом выгорания; образованием ободочной (РИМ) структуры в области сильно облученной периферии топлива и увеличением испускания г/о ПД, связанным с изменением структуры топлива; развитием коррозии оболочки со стороны воды; изменением распределения энерговыделения в таблетке.

С учетом этих факторов, было использовано ПС FEMAXI-V [95], специально разработанное для анализа изменения свойств топлива в области как низких, так и глубоких выгораний, не только в условиях стационарной эксплуатации, но и переходных процессов, таких как следование за нагрузкой и

быстрый подъем мощности. В условиях облучения, характерных для легководных ЯР, термическое, механическое и химическое состояние топливной таблетки и оболочки, их взаимодействие сильно зависят от текущего уровня мощности, истории уровней мощности и выгорания. Данное ПС позволяет анализировать изменения в состоянии компонентов одиночного ТВЭЛ, а также взаимодействие компонентов для заданных истории уровней мощности, параметров теплоносителя и конструктивных характеристик ТВЭЛ [5–15].

Поскольку диффузия атомов г/о ПД, накапливание их в пузыри, выделение пузырей и рост внутреннего давления в ТВЭЛ могут рассчитываться на основе ряда альтернативных зависимостей, представленных в моделях WHITE-TUCKER [96], KITAJIMA-KINOSHITA [97], TURNBULL [98], выделение г/о ПД и рост внутреннего давления в ТВЭЛ ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения определялись на основе модели [96]. При анализе изменения свойств ТВЭЛ в переменном режиме длина ТВЭЛ делилась на 10 аксиальных сегментов, для центральной точки каждого из которых задавалась своя величина линейного удельного теплового потока, пропорциональная текущему уровню мощности РУ. Тепловой поток в других точках аксиальных сегментов находился путем экстраполяции значений, заданных для центральных точек.

Сборка топливных таблеток и оболочка дискретизировалась в цилиндрической геометрии с помощью кольцевых элементов (рис. 2.1).

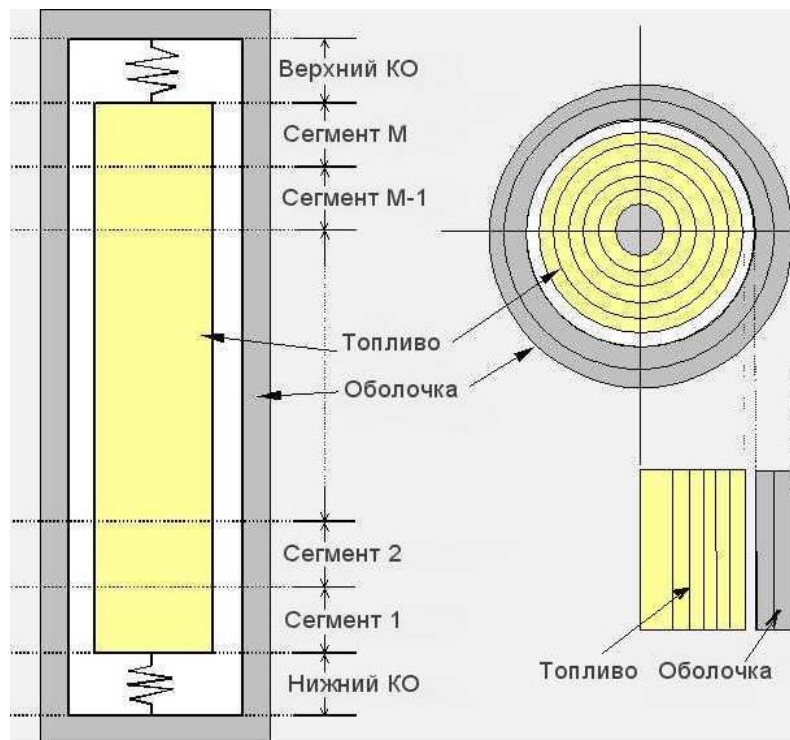


Рис. 2.1. Схема дискретизации сборки топливных таблеток и оболочки с помощью кольцевых элементов

2.2.1. Исходные и выходные данные для анализа изменения свойств оболочки твэла при переменных нагрузениях

В качестве исходных данных при расчетном анализе изменения свойств оболочки в переменном режиме служат конструкционные параметры твэла и режимные характеристики РУ ВВЭР-1000 В-320 [10, 80]. Поскольку в реакторе ВВЭР-1000 В-320 применяются различные тепловыделяющие сборки, при анализе изменения свойств оболочки задавались конструктивные характеристики твэлов УТВС, ТВС-А и ТВС-В (табл. 2.5 – 2.6).

Таблица 2.5

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

Параметр	ТВС		
	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, 10^{-3} см	7,5	7,5	8,0
Наличие впадины у таблетки	Нет	Нет	Впадина на каждой стороне таблетки
Диаметр впадины, см	—	—	0,62
Глубина впадины, см	—	—	0,02
Диаметр эквивалентного проточного канала, см	1,06	1,06	1,05
Общий вес столба топлива в твэле, кг	1,385	1,487	1,554

Таблица 2.6

**Одинаковые конструктивные характеристики твэлов
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, мкм	0,1
Максимальное расстояние между двумя краями смежных таблеток, мкм	20
Разница между температурами газа верхнего КО и теплоносителя, °С	25
Начальное давление гелия под оболочкой, МПа	2,0
Материал топливной таблетки	UO ₂
Плотность UO ₂ , г/см ³	10,4
Количество аксиальных сегментов	10
Длина каждого аксиального сегмента сборки таблеток, см	35,4
Начальный размер зерна таблетки, мкм	10

Обогащение по U-235 (без учета бланкетов с пониженным обогащением в ТВС-W)	0,044
Величина верхнего КО, см ³	0,21
Величина нижнего КО, см ³	0

Режимные параметры РУ ВВЭР-1000 В-320, использованные в качестве исходных данных при расчетном анализе изменения свойств оболочки твэла в переменном режиме нагружения, приведены в табл. 2.7.

При анализе изменения свойств твэла реактора ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения основными выходными данными являлись следующие величины: распределение температуры в твэле; выделение г/о ПД; величины деформаций и напряжений упругости, пластичности, ползучести.

При этом в модели долговечности оболочки в переменном режиме основными выходными данными являлись распределение температуры в оболочке, эквивалентное напряжение и эквивалентная деформация ползучести материала оболочки.

Таблица 2.7

Режимные характеристики РУ ВВЭР-1000

Характеристика	Значение
Закон распределения нейтронного потока по длине твэла	$\Phi(z) = \cos\left[\frac{\pi}{H_{\dot{\gamma}}}\left(z - \frac{H}{2}\right)\right]$, где $0 \leq z \leq H$; $H_{\dot{\gamma}} = H + 2 \cdot \delta_{эф}$; $\delta_{эф}$ – величина эффективной добавки (10 см); H – длина твэла
Закон распределения линейного энерговыделения по длине твэла, Вт/см	$q_l(z) = q_{lmax} \cdot \Phi(z)$, $q_{lmax} = 248$ Вт/см
Коэффициенты относительной мощности для десяти аксиальных элементов	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
---	------

2.2.2. Основные теплогидродинамические соотношения, моделирующие изменение свойств оболочки ТВЭЛ при переменных нагрузениях

При расчете распределения температуры в ТВЭЛ с ГУ, определяемыми температурой и давлением теплоносителя, принимаются следующие основные допущения [71]:

1. Высота ТВЭЛ условно делится на 10 аксиальных сегментов. Для каждого аксиального сегмента состояние теплоносителя на текущем временном шаге, определяемое температурой, давлением и скоростью потока на входе и тепловым потоком на поверхности для каждого сегмента, зависит от распределения энтальпии теплоносителя на предыдущем временном шаге. Ширина шага по времени автоматически контролируется при расчете и задается исходя из условия выполнения следующих требований, необходимых для стабилизации решения и избежания расходимости при расчете ползучести для всех аксиальных элементов [71]: изменение линейного тепловыделения в течение одного временного шага должно находиться в пределах 10 Вт/см; изменение выгорания в течение одного временного шага должно находиться в пределах 0,5 МВт·сут/кг; ширина временного шага не должно превышать 1,5-кратную ширину предшествующего временного шага; увеличение деформации ползучести в течение одного временного шага не должно превышать упругую деформацию, т.е.

$$\Delta t \leq \frac{\bar{\sigma}}{E \cdot \dot{\epsilon}^c} . \quad (2.10)$$

2. Энтальпия теплоносителя для каждого аксиального сегмента рассчитывается исходя из распределения энтальпии в конце предшествующего временного шага и учитывая увеличение энтальпии, определенное на основе

скорости потока и количества тепла, выделенного каждым сегментом.

3. Коэффициент теплопередачи в каждом режиме охлаждения твэла определяется на основе использования температуры теплоносителя в качестве ГУ, далее рассчитывается температура поверхности оболочки.

4. Распределение температуры от поверхности оболочки до центра таблетки рассчитывается в радиальной одномерной геометрии, используя в качестве ГУ температуру поверхности оболочки.

5. Теплопередача в аксиальном направлении твэла не рассматривается, поскольку предполагается, что теплопередача в аксиальном направлении, вызываемая наличием аксиального градиента тепловыделения, подавляется такими термическими сопротивлениями, как впадины и зазор около кромочной поверхности таблетки.

6. Массовая скорость и давление потока на каждом временном шаге постоянны.

Энтальпия произвольного малого объема теплоносителя (воды или пара) $H(z, t)$, Дж/кг в аксиальной координате z , м в момент времени t , с определяется следующей интегральной характеристикой этого объема:

$$H(z, t) = H(0, t_{in}) + \int_{t_{in}}^t \frac{V(z') \cdot Q(z')}{S(z')} d\tau, \quad (2.11)$$

где t_{in} – время, когда теплоноситель, находящийся в аксиальной координате z в момент времени t , проходит через вход обогреваемого участка; $z'(\tau)$ – аксиальная координата теплоносителя в момент времени τ , находившегося в момент времени t в координате z ; $V(z')$ – удельный объем теплоносителя, м³/кг; $Q(z')$ – линейная плотность теплового потока, Вт/м; $S(z')$ – площадь поперечного сечения проточного канала, м².

Рассматривая увеличение энтальпии потока только на отрезке времени Δt , для момента времени $t_0 + \Delta t$ выражение (2.44) записывается следующим образом:

$$H(z, t_0 + \Delta t) = H(z_0, t_0) + \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \frac{V(z') \cdot Q(z')}{S(z')} d\tau, \quad (2.12)$$

где z_0 – аксиальная координата в момент времени t_0 объема теплоносителя, находившегося в координате z в момент времени $t_0 + \Delta t$.

Поскольку условно считается, что теплоноситель, как и сам ТВЭЛ, разделен в аксиальном направлении на ряд сегментов, то полагается, что координата z поставлена в соответствие j -му сегменту; аналогичным образом, координата z_0 поставлена в соответствие k -му сегменту (рис. 2.2).

Пусть некоторый элементарно малый объем теплоносителя движется от координаты z_0 к координате z . Время, за которое теплоноситель, находящийся в момент $t_0 + \Delta t$ в координате z , проходит через i -й сегмент, обозначается как δt_i .

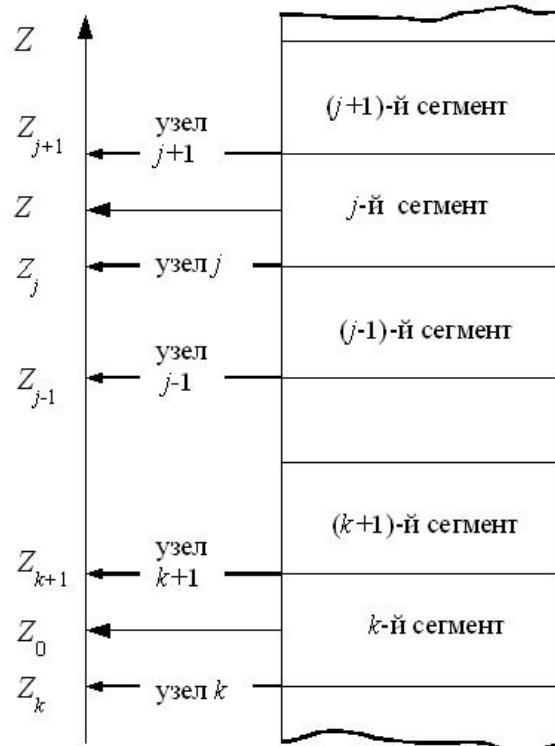


Рис. 2.2. Модель увеличения энтальпии теплоносителя

Тогда шаг по времени Δt представляется как

$$\Delta t = \delta t_k + \delta t_{k+1} + \dots + \delta t_{j-1} + \delta t_j . \quad (2.13)$$

Средние значения удельного объема теплоносителя V , линейной плотности теплового потока Q и площади поперечного сечения проточного канала S для i -го сегмента обозначаются соответственно как V_i , Q_i , S_i . Используя (2.12) и (2.13), энтальпия j -го сегмента H_j в момент времени $t_0 + \Delta t$ определяется как

$$H_j(t_0 + \Delta t) = H_0(t_0) + \sum_{i=k}^j \frac{V_i \cdot Q_i}{S_i} \delta t_i . \quad (2.14)$$

Время δt_i , за которое теплоноситель проходит длину i -го сегмента ΔL_i , выражается через скорость потока в i -м сегменте u_i , м/с:

$$\delta t_i = \frac{\Delta L_i}{u_i} = \frac{\Delta L_i}{G_i \cdot V_i} = \frac{S_i \cdot \Delta L_i}{W \cdot V_i} , \quad (2.15)$$

где G – массовая скорость потока теплоносителя, $[G] = \text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ($G = u/V$); W – массовый расход, $[W] = \text{кг/с}$ ($W = G \cdot S$).

Входящий в (2.15) параметр ΔL_i , определяется следующим образом (см. рисунок 2.2):

$$\Delta L_i = \begin{cases} \frac{z_{j+1} - z_j}{2} (i = j); \\ z_{i+1} - z_i (k \neq i \neq j); \\ z_{k+1} - z_0 (i = k). \end{cases} \quad (2.16)$$

Входящий в (2.14) параметр $H_0(t_0)$ находится интерполированием значений энтальпий в точках z_k и z_{k+1} :

$$H_0(t_0) = H_k(t_0) + [H_{k+1}(t_0) - H_k(t_0)] \frac{z_0 - z_k}{z_{k+1} - z_k} . \quad (2.17)$$

Энтальпия потока теплоносителя в репрезентативной точке каждого аксиального сегмента определяется как среднее значение энтальпий в верхнем и нижнем узлах сегмента.

Используя соотношения (2.11)–(2.17), для расчета энтальпии потока теплоносителя на текущем временном шаге, в задаче оценки долговечности оболочки твэла ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения использовалась

следующая методика [71]:

- в качестве исходных данных задавались температура, давление и скорость теплоносителя на входе ТВЭЛ, что определяло энтальпию и массовую скорость потока теплоносителя на входе ТВЭЛ, а также задавалось распределение энтальпии теплоносителя по расчетным узлам на предыдущем временном шаге;
- если какой-либо элементарный объем потока теплоносителя достигает в момент τ координаты какого-либо расчетного узла в i -м аксиальном сегменте, то, используя аксиальное распределение энтальпии потока теплоносителя на предыдущем временном шаге и зная аксиальную координату каждого элементарного объема потока теплоносителя на предыдущем временном шаге, определялась энтальпия этого элементарного объема на предыдущем временном шаге;
- зная величину теплового потока в i -м аксиальном сегменте и энтальпию элементарного объема на предыдущем временном шаге, находилась энтальпия элементарного объема в момент τ в данном расчетном узле.

Для вычисления коэффициента теплоотдачи на поверхности оболочки использовались известные эмпирические соотношения: в однофазной области – соотношение Диттуса-Боэлтера [99], а при пузырьковом кипении – соотношение Чена [100].

Распределение температуры в ТВЭЛ (с разницей между численным и аналитическим решениями не более 0,1 %) определялось используя одномерную радиальную геометрию, на основе учета внутреннего тепловыделения, изменений в теплопроводности таблетки и зазора, изменений в теплообмене между поверхностью и теплоносителем.

При анализе градиента температуры в каждом аксиальном сегменте ТВЭЛ использовались одномерные уравнения теплопроводности, записанные для радиальной координаты r , при этом теплопроводностью в осевом направлении пренебрегалось.

Границы радиальных ячеек (см. рисунок 2.1) такие же, как при анализе напряжений/деформаций, и их число равно 10. Принимается, что термические свойства топлива в каждой ячейке зависят от температуры. Основываясь на этих допущениях, теплопроводность в одном аксиальном сегменте описывается следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t} [C_v(T, r) \cdot T(r, t)] = \text{div} [k(T, r) \cdot \text{grad} T(r, t)] + q(r, t), \quad (2.18)$$

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 энергосвечения), Вт/м³.

Уравнение теплопроводности (2.18) интегрируется по объему, заключенному между пунктирными линиями, показанными на рис. 2.3.

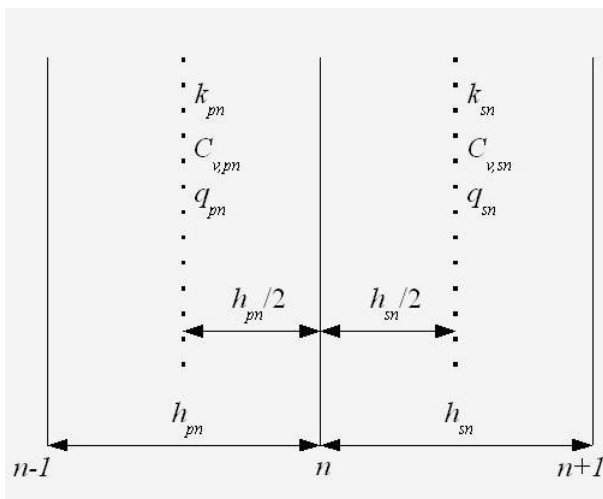


Рис. 2.3. Модель расчетной ячейки: h_{pn} – ширина ячейки между узлами $n-1$ и n ; h_{sn} – ширина ячейки между узлами n и $n+1$; k_{pn} , $C_{v,pn}$, q_{pn} – коэффициент теплопроводности, удельная объемная теплоемкость, плотность тепловыделения в средней точке ячейки h_{pn}

Далее уравнение теплопроводности (2.18) преобразуется в разностное аппроксимационное выражение для n -й точки ячейки:

$$\begin{aligned} \frac{(T_n^{m+1} - T_n^m)D_n}{\Delta t} = & -(T_n^{m+\theta} - T_{n-1}^{m+\theta})k_{pn} \cdot h_{pn}^S + (T_{n+1}^{m+\theta} - T_n^{m+\theta})k_{sn} \cdot h_{sn}^S + \\ & + (Q_{pn} \cdot h_{pn}^V + Q_{sn} \cdot h_{sn}^V) \cdot P(t_{m+\theta}). \end{aligned} \quad (2.19)$$

Используя полностью неявный метод, задается $\theta = 1$, тогда из (2.19) следует выражение:

$$\begin{aligned} \frac{(T_n^{m+1} - T_n^m)D_n}{\Delta t} = & -(T_n^{m+1} - T_{n-1}^{m+1})k_{pn} \cdot h_{pn}^S + (T_{n+1}^{m+1} - T_n^{m+1})k_{sn} \cdot h_{sn}^S + \\ & + (Q_{pn} \cdot h_{pn}^V + Q_{sn} \cdot h_{sn}^V)P(t_{m+1}), \end{aligned} \quad (2.20)$$

где T^{m+1} и T^m в (2.20) определяются используя среднюю температуру в узлах сетки $n-1$ и n , а также среднюю температуру в узлах n и $n+1$.

После преобразования (2.20), дифференциальное уравнение в узле сетки n (в средней области) определяется как

$$a_n \cdot T_{n-1}^{m+1} + b_n \cdot T_n^{m+1} + c_n \cdot T_{n+1}^{m+1} = d_n^m, \quad (2.21)$$

где

$$\begin{aligned} a_n = & -k_{pn} \cdot h_{pn}^S \cdot \Delta t; \quad b_n = D_n - a_n - c_n; \quad c_n = -k_{sn} \cdot h_{sn}^S \cdot \Delta t; \\ d_n^m = & D_n \cdot T_n^m + \Delta t(Q_{pn} \cdot h_{pn}^V + Q_{sn} \cdot h_{sn}^V)P(t_{m+1}) \end{aligned} \quad (2.22)$$

Модель теплопроводности зазора между таблеткой и оболочкой показана на рис. 2.4.

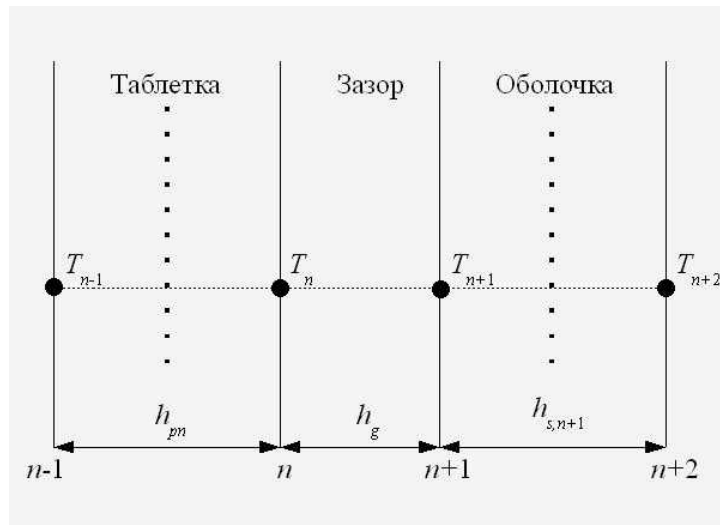


Рис. 2.4. Модель теплопроводности зазора между таблеткой и оболочкой: h_g – ширина зазора

По аналогии с (2.20), для области зазора между таблеткой и оболочкой записывается:

$$\begin{aligned} \frac{(T_n^{m+1} - T_n^m)D'_n}{\Delta t} = & -(T_n^{m+1} - T_{n-1}^{m+1})k_{pn} \cdot h_{pn}^s + (T_{n+1}^{m+1} - T_n^{m+1})k_g \cdot h_{sn}^s + \\ & + Q_{pn} \cdot h_{pn}^V \cdot P(t_{m+1}). \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{(T_{n+1}^{m+1} - T_{n+1}^m)D''_{n+1}}{\Delta t} = & -(T_{n+1}^{m+1} - T_n^{m+1})k_g \cdot h_{p,n+1}^s + (T_{n+2}^{m+1} - T_{n+1}^{m+1})k_{s,n+1} \cdot h_{s,n+1}^s + \\ & + Q_{s,n+1} \cdot h_{s,n+1}^V \cdot P(t_{m+1}), \end{aligned} \quad (2.24)$$

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

$h_{p,n+1}^s = \frac{1}{h_{p,n+1}} \left(r_n - \frac{h_{p,n+1}}{2} \right)$; $h_{sn} = h_{p,n+1} = h_g$ – ширина зазора; k_g – коэффициент теплопроводности зазора, Вт/м·К.

Модель центральной области твэла, зазора и поверхности оболочки показана на рис. 2.5.

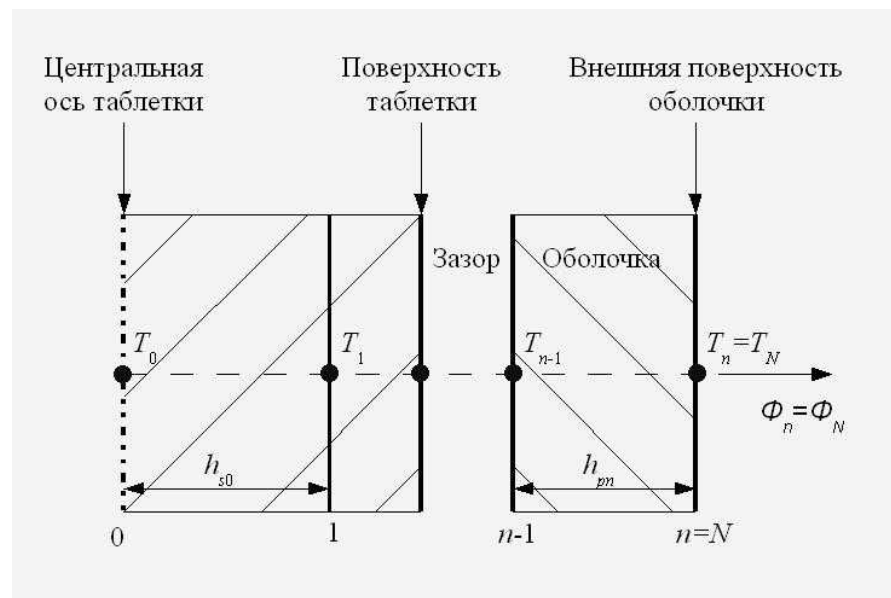


Рис. 2.5. Модель центральной области твэла, зазора и поверхности оболочки:

Φ_N – плотность теплового потока на поверхности оболочки

Для центра твэла выражение (2.20) трансформируется следующим образом:

$$\frac{(T_0^{m+1} - T_0^m)}{\Delta t} D_0'' = (T_1^{m+1} - T_0^{m+1}) k_{s0} \cdot h_{s0}^s + Q_{s0} \cdot h_{s0}^V \cdot P(t_{m+1}), \quad (2.25)$$

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

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

$$\frac{(T_N^{m+1} - T_N^m)}{\Delta t} D_N' = -(T_N^{m+1} - T_{N-1}^{m+1}) k_{pN} \cdot h_{pN}^s - r_N \cdot \hat{O}_N^{m+1} + Q_{pN} \cdot h_{pN}^V \cdot P(t_{m+1}), \quad (2.26)$$

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 (2.26) выражается в таком виде:

$$a_N \cdot T_{N-1}^{m+1} + b_N \cdot T_N^{m+1} = d_N, \quad (2.27)$$

где коэффициенты a_N , b_N и d_N даются как

$$a_N = -k_{pN} \cdot h_{pN}^s \cdot \Delta t. \quad (2.28)$$

$$b_N = D_N' - a_N. \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} d_N &= D_N' \cdot T_N^m - r_N \cdot \Phi_N^{m+1} \cdot \Delta t + Q_{pN} \cdot h_{pN}^V \cdot P(t_{m+1}) \cdot \Delta t = \\ &= d_N' + d_N'' \cdot \Phi_N^{m+1}. \end{aligned} \quad (2.30)$$

В выражениях (2.27) – (2.30) неизвестными переменными являются T_{N-1}^{m+1} , T_N^{m+1} и \hat{O}_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 [71]:

$$T_{N-1}^{m+1} = -E_{N-1} \cdot T_N^{m+1} + F_{N-1}. \quad (2.31)$$

Подставляя (2.28) – (2.31) в (2.27), получается:

$$A_1 \cdot T_N^{m+1} + B_1 = \hat{O}_N^{m+1}, \quad (2.32)$$

где

$$A_1 = (b_N - a_N \cdot E_{N-1}) / d_N'' . \quad (2.33)$$

$$B_1 = (a_N \cdot F_{N-1} - d_N') / d_N'' . \quad (2.34)$$

Таким образом, A_1 и B_1 – известные величины.

Для плотности теплового потока на поверхности оболочки имеется известное соотношение:

$$\Phi_N = h_W(T_N - T_B), \quad (2.35)$$

где T_B – температура т/н, К; h_W – коэффициент теплоотдачи на поверхности оболочки, Вт/м²·К.

Для T_N^{m+1} и \hat{O}_N^{m+1} на основании (2.35) справедливо:

$$\hat{O}_N^{m+1} = h_W(T_N^{m+1} - T_B^{m+1}), \quad (2.36)$$

где T_B^{m+1} – известная температура т/н, К; h_W – коэффициент теплоотдачи на поверхности оболочки, Вт/м²·К.

Из системы выражений (2.32) и (2.36), находятся T_N^{m+1} и \hat{O}_N^{m+1} . Итак, используя обратную подстановку по методу исключений Гаусса, можно последовательно получить T^{m+1} .

После расчета распределения температуры в радиальном направлении рассчитывались такие зависящие от температуры величины, как испускание г/о ПД, поток газа в зазоре в осевом направлении, а также их обратное влияние на теплопроводность зазора.

Пренебрегая конвективной теплопередачей внутри зазора, коэффициент теплопередачи зазора h , Вт/см²·К, выражается соотношением, полученным в результате модификации модели Росса и Стаута [101]:

$$h = h_g + h_s + h_r, \quad (2.37)$$

где h_g – составляющая коэффициента теплопередачи зазора, учитывающая теплопроводность газа,

$$h_g = \frac{\lambda_{gas}}{C(R_{eff} + R_2) + (g_1 + g_2) + GAP}, \quad (2.38)$$

где λ_{gas} – коэффициент теплопроводности смешанного газа, Вт/см·К; C – безразмерный эмпирический коэффициент, $C = 2,77 - 2,55 \cdot 10^{-8} \cdot P_c$; P_c – контактное давление между таблеткой и оболочкой, Па; R_{eff} – шероховатость поверхности таблетки, см ($R_{eff} \approx 1,0$ мк); R_2 – шероховатость поверхности оболочки, см ($R_2 \approx 1,0$ мк); $g_1 + g_2$ – длина скачка температуры между твердой и жидкой фазами, см; GAP – ширина радиального зазора, см;

h_s – составляющая коэффициента теплопередачи зазора, учитывающая теплопроводность областей плотного контакта топлива и оболочки,

$$h_s = \frac{\lambda_m \cdot P_c}{0,5 \cdot R \cdot H}, \quad (2.39)$$

где λ_m – эффективный коэффициент теплопроводности контакта топливо-оболочка, Вт/см·К; $R = \sqrt{\frac{R_{eff}^2 + R_2^2}{2}}$; H – твердость материала оболочки по Майеру, Па ($H = 2,8 \cdot \sigma_Y$) [102]; σ_Y – предел текучести материала оболочки, Па;

h_r – составляющая коэффициента теплопередачи зазора, учитывающая теплопроводность излучением,

$$h_r = \left[\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right]^{-1} \cdot \sigma \cdot \frac{T_{po}^4 - T_{ci}^4}{T_{po} - T_{ci}}, \quad (2.40)$$

где ε_p – коэффициент излучения таблетки (-); ε_c – коэффициент излучения черной окиси оболочки (-); σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/см²·К⁴ ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$); T_{po} – температура внешней поверхности таблетки, К; T_{ci} – температура внутренней поверхности оболочки, К;

$$\lambda_m = \frac{2 \cdot \lambda_p(T_{po}) \cdot \lambda_c(T_{ci})}{\lambda_p(T_{po}) + \lambda_c(T_{ci})}, \quad (2.41)$$

где λ_c – коэффициент теплопроводности оболочки, Вт/см·К; λ_p – коэффициент теплопроводности таблетки, Вт/см·К;

Математическая модель коэффициента теплопроводности смешанного газа (смеси гелия, азота, криптона и ксенона) λ_{gas} представлена следующей зависимостью [102]:

$$\lambda_{gas} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i}{1 - \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \hat{O}_{ij} \frac{x_j}{x_i}} \right), \quad (2.42)$$

где

$$\hat{O}_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{1/4} \right]^2}{2^{3/2} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{1/2}} \left[1 + \frac{2,41(M_i - M_j)(M_i - 0,142 \cdot M_j)}{(M_i + M_j)^2} \right], \quad (2.43)$$

где x_i – молярная концентрация i -го газа; λ_i – коэффициент теплопроводности i -го газа, Вт/см·К; M_i – молярная масса i -го газа.

Математическая модель длины скачка температуры между твердой и жидкой фазами представлена следующей зависимостью [101]:

$$g_1 + g_2 = \sum_{i=1}^n (g_1 + g_2)_i \cdot \frac{10^5}{P_{gas}}, \quad (2.44)$$

где $(g_1 + g_2)_i$ – длина скачка температуры между твердой и жидкой фазами для i -го газа, см (для гелия, азота, криптона и ксенона $10 \cdot 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-4}$ и $1 \cdot 10^{-4}$ см соответственно); P_{gas} – давление газа, Па.

2.2.3. Основные механические соотношения, моделирующие изменение свойств оболочки ТВЭЛ при переменных нагрузениях

Поскольку долговечность оболочки ТВЭЛ ВВЭР-1000 в переменном режиме

эксплуатации определяется накопленной энергией необратимых деформаций ползучести (см. п. 2.1.3), ключевой частью анализа изменения свойств оболочки является оценка напряжений/деформаций в оболочке.

Для анализа развития напряжений/деформаций в оболочке и таблетке общепринятым является использование либо метода конечных элементов (МКЭ-метод) [96], либо метода конечных разностей (МКР-метод) [103].

Одним из преимуществ ПС FEMAXI, обусловивших его выбор в качестве расчетного инструмента при анализе изменения свойств твэла в переменном режиме, является то, что в FEMAXI при анализе напряжений/деформаций в оболочке и таблетке используется МКЭ-метод.

Как отмечается в [71], МКР-метод в принципе пренебрегает механическим взаимодействием между соседними кольцевыми элементами и, хотя для стационарных режимов МКР-метод и может давать приемлемую точность, в переходных режимах он не в состоянии 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 изменения свойств твэла. Таким образом, можно сделать вывод, что применение ПС FEMAXI, использующего МКЭ-метод, оправдано в задаче определения долговечности оболочки в режиме переменного нагружения, поскольку это ПС может выполнять надежный и точный механический анализ не только в стационарных, но и в переходных режимах.

Анализ напряжений/деформаций в цилиндрической геометрии, представленной на рисунке 2.1, выполнялся с использованием МКЭ-метода, в котором четырехугольные элементы имеют четыре степени свободы (рис. 2.6).

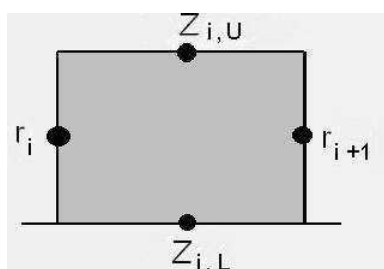


Рис. 2.6. Модель четырехугольного элемента с четырьмя степенями

Соотношение между МКЭ-разбиением на расчетные ячейки и степенью свободы каждого узла для произвольного аксиального сегмента показано на рис. 2.7.

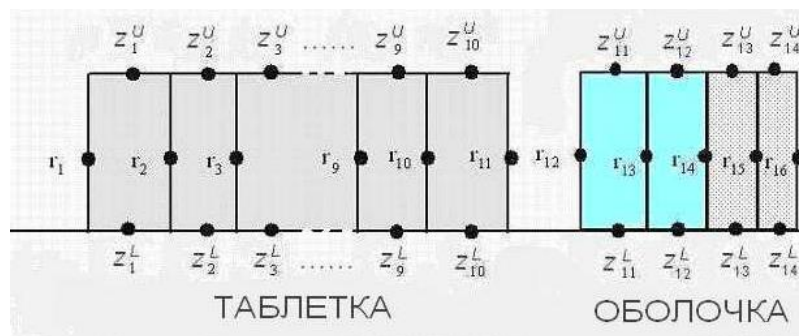


Рис. 2.7. Разбиение произвольного аксиального сегмента на ячейки по МКЭ-методу

Количество расчетных ячеек в радиальном направлении для таблетки и оболочки задавалось фиксированным и равным соответственно 10 и 4 (см. рисунок 2.7). Внутренние две ячейки оболочки (11, 12) моделируют металлическую фазу, тогда как две внешние ячейки (13, 14) – слой окиси циркония (ZrO_2). Преимуществом данной модели является возможность учитывать изменение толщины ячеек окисной и металлической фаз при развитии коррозии [71].

При анализе МВТО (в механическом анализе) сначала рассчитывается величина деформации таблетки, вызванной термическим расширением, уплотнением, распуханием и релокацией, и записывается уравнение жесткости с учетом растрескивания, эластичности/пластичности и ползучести таблетки.

Далее для таблетки и оболочки рассчитывается распределение напряжений и деформаций путем решения уравнения жесткости с граничными условиями (ГУ), соответствующими режиму контакта между таблеткой и оболочкой. Когда происходит МВТО и меняется режим контакта между таблеткой и оболочкой, начиная с момента изменения режима контакта выполняется новый

расчет, с новыми ГУ контакта.

В модели ползучести, имеющей ключевое значение при оценке долговечности оболочки в переменном режиме нагружения, учитываются эффекты, связанные с облучением и скорость эквивалентной (двухосевой) деформации ползучести оболочки $\dot{\rho}_e$ выражается как функция тангенциального напряжения в оболочке σ , температуры оболочки T и потока быстрых ($E > 1,0$ МэВ) нейтронов Φ , при этом скорость деформации ползучести оболочки возрастает при росте потока быстрых нейтронов, температуры оболочки, тангенциального напряжения в оболочке и времени облучения (см. п. 3.1).

Математическая модель ползучести в оболочке под влиянием одноосного напряжения представляется в виде [95]:

$$\dot{\rho}_e = f(\sigma_e, \varepsilon^H, T, \Phi, \dot{F}), \quad (2.45)$$

где $\dot{\rho}_e$ – скорость эквивалентной деформации ползучести, с^{-1} ; σ_e – эквивалентное напряжение, Па; ε^H – параметр упрочнения при ползучести (–); T – температура оболочки, К; Φ – поток быстрых нейтронов, $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; \dot{F} – скорость делений, $1/\text{м}^3 \cdot \text{с}$.

При обобщении (2.45) на случай ползучести под влиянием многоосного напряжения, вектор скорости деформации ползучести $\vec{\rho}$ выражается как векторная функция $\vec{\beta}$ от эквивалентного напряжения σ_e , параметра упрочнения при ползучести ε^H , температуры оболочки T (T известна из термического расчета), потока быстрых нейтронов Φ и скорости делений \dot{F} :

$$\vec{\rho} = \vec{\beta}(\sigma_e, \varepsilon^H, T, \Phi, \dot{F}). \quad (2.46)$$

После завершения i -й итерации по методу Ньютона-Рафсона, в ходе выполнения $(i+1)$ -й итерации вычисляется вектор скорости деформации ползучести $\vec{\rho}$ [95]. Когда закончен расчет $\vec{\rho}$ в момент t_n и выполняется расчет на следующем временном шаге Δt_{n+1} , вектор приращений деформации ползучести определяется как

$$\overline{\Delta p}_{n+1} = \Delta t_{n+1} \cdot \overline{\dot{p}}_{n+0} = \Delta t_{n+1} \cdot \overline{\beta}(\overline{\sigma}_{n+0}, \varepsilon_{n+0}^H, T_{n+0}, \Phi_{n+0}, \dot{F}_{n+0}), \quad (2.47)$$

где $\overline{\sigma}_{n+0} = (1-\theta) \cdot \overline{\sigma}_n + \theta \cdot \overline{\sigma}_{n+1}$; $\varepsilon_{n+0}^H = (1-\theta) \cdot \varepsilon_n^H + \theta \cdot \varepsilon_{n+1}^H$ (аналогично для $T_{n+0}, \Phi_{n+0}, \dot{F}_{n+0}$; θ – параметр итеративного метода Ньютона-Рафсона, $\theta = 1$ (в целях обеспечения стабильности численного расчета).

2.2.4. Учет взаимного влияния теплогидродинамических и механических процессов при моделировании изменения свойств оболочки твэла, подверженной переменным нагрузениям

При моделировании изменения свойств твэла в переменном режиме нагружения использован алгоритм совместного решения уравнений теплопроводности и механической деформации [71]. Уравнения теплопроводности и механической деформации нужно решать совместно, поскольку распределения температуры и деформации физически влияют друг на друга. Например, чтобы получить распределение температуры в твэле, необходимо предварительно рассчитать теплопроводность зазора, для этого должна быть определена ширина зазора.

Таким образом, необходимо связать термический анализ (расчет параметров, характеризующих процессы теплопередачи и теплообмена) и механический анализ (расчет напряжений и деформаций) путем организации конвергенционного расчетного цикла (цикла сходимости). Чтобы уменьшить затраты времени на итерации, желательно применить простую механическую модель, способную быстро определить геометрию твэла. С другой стороны, нереально выполнить детальный анализ напряжений/деформаций и смещений за короткое время. Поэтому при расчете параметров, характеризующих процессы теплопередачи и теплообмена, использовалась упрощенная механическая модель [71].

Данная механическая модель, включенная в термический анализ для совместного решения уравнений теплопроводности и механической

деформации, является упрощенная по сравнению с детальной механической моделью, используемой для точного предсказания распределения величин напряжений/деформаций и перемещений на основе температуры, полученной в термическом анализе.

Из (2.37)–(2.39) можно видеть, что для определения коэффициента теплопередачи зазора, предварительно должно быть получено контактное давление между таблеткой и оболочкой P_{fc} .

Контактное давление P_{fc} есть сила, приложенная к единице площади поверхности контакта таблетки и оболочки, генерируемая через поверхность контакта, направленная на устранение воображаемого перекрытия радиальных сдвигов таблетки и оболочки δ_{fc} посредством противодействия, когда таблетка и оболочка вступают в контакт в начале какого-либо временного шага.

Контактное давление P_{fc} может быть получено как сила, с которой оболочка толкает таблетку, при условии известности величины радиального сдвига оболочки, находящейся в контакте с таблеткой, из таких величин, как внутренний и внешний радиусы, толщина, и модуль Юнга оболочки.

Ширина радиального зазора между таблеткой и оболочкой δ выражается следующим образом:

$$\delta = \delta_o + u_c - u_f, \quad (2.48)$$

где δ_o – начальная ширина радиального зазора, м; u_c – радиальный сдвиг оболочки, м; u_f – радиальный сдвиг 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_{fc} . На этом временном шаге таблетка и оболочка имеют воображаемую зону взаимного перекрытия шириной

$$\delta_{fc} = -\delta = -(\delta_o + u_c - u_f) > 0. \quad (2.49)$$

Таким образом, величина воображаемого перекрытия радиальных сдвигов таблетки и оболочки δ_{fc} известна в начале этого временного шага. Полагается, что когда величина воображаемого перекрытия δ_{fc} положительна, оболочка толкает таблетку (и таблетка толкает оболочку) до тех пор, пока δ_{fc} не станет равной нулю.

Величина контактного давления P_{fc} определяется с помощью следующего соотношения [71]:

$$P_{fc} = E_c \frac{\delta_c (r_{co} - r_{ci})}{r_{ci}^2}, \quad (2.50)$$

где r_{ci} , r_{co} – соответственно внутренний и наружный радиусы оболочки, м; δ_c – радиальный сдвиг оболочки, вызванный давлением таблетки наружу, м; E_c – модуль Юнга оболочки, Па.

При расчетном анализе изменения свойств твэла в переменном режиме использовалась модель контактного давления, согласно которой суммарный радиальный сдвиг оболочки u_c представляется следующей зависимостью [71]:

$$u_c = \frac{d_{ci}}{E_c} \left[\frac{(P_{gas} + P_{fc})(d_{ci}^2 + d_{co}^2) - 2P_w \cdot d_{co}^2}{d_{co}^2 - d_{ci}^2} + \nu \cdot P_{gas} \right] + (\varepsilon^{th} + p) \frac{d_{co} + d_{ci}}{2}, \quad (2.51)$$

где E_c – модуль Юнга оболочки, Па; d_{ci} – внутренний диаметр оболочки, см; d_{co} – внешний диаметр оболочки, см; P_{gas} – внутреннее давление, Па; P_{fc} – контактное давление между таблеткой и оболочкой, Па; P_w – давление охлаждающей воды, Па; ν – число Пуассона оболочки; ε^{th} – термическая деформация оболочки; p – деформация ползучести оболочки.

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

$$\sigma_{\theta} = \frac{d_{ci}(P_{fc} + P_{gas}) - d_{co} \cdot P_w}{d_{co} - d_{ci}} . \quad (2.52)$$

$$\sigma_z = \frac{d_{ci}^2(P_{fc} + P_{gas}) - d_{co}^2 \cdot P_w}{d_{co}^2 - d_{ci}^2}, \quad (2.53)$$

где $P_{fc} = 0$ при отсутствии контакта таблетки и оболочки.

Поскольку в модели тонких цилиндрических оболочек не учитывается напряжение сдвига, эквивалентное напряжение σ_e выражается путем подстановки $\sigma_r = 0$ в (2.8) как

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{\theta} - \sigma_z)^2 + \sigma_{\theta}^2 + \sigma_z^2]}. \quad (2.54)$$

В общем виде математическая модель скорости эквивалентной деформации ползучести оболочки \dot{p}_e представляется как (2.45). Конкретный вид зависимостей для \dot{p}_e в разных моделях может отличаться. Например, \dot{p}_e может записываться следующим образом (см. п. 3.1):

$$\dot{p}_e = K \cdot \hat{O}(\sigma_e + B \cdot e^{C \cdot \sigma_e}) \exp(-10000/R \cdot T) t^{-1/2} \cdot k, \quad (2.55)$$

где $K = 5,129 \cdot 10^{-29}$; $B = 7,252 \cdot 10^2$; $C = 4,967 \cdot 10^{-8}$; $R = 1,987$ кал/моль·К; T – температура, К ($T < 730$ К); t – время, с; Φ – плотность потока быстрых нейтронов, $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ($E > 1, 0$ МэВ); σ_e – эквивалентное напряжение, Н/м².

После интегрирования выражения (2.55) по t получается:

$$p_e = 2 \cdot K \cdot \Phi(\sigma_e + B \cdot \exp(C \cdot \sigma_e)) \exp(-10000/R \cdot T) t^{0,5}. \quad (2.56)$$

Исключая время t , из выражений (2.55) и (2.56) следует соотношение:

$$f(\sigma_e, T, \hat{O}, p_e) = \dot{p}_e = 2\{K \cdot \hat{O}(\sigma_e + B \cdot \exp(C \cdot \sigma_e)) \exp(-10000/R \cdot T)\}^2 / p_e. \quad (2.57)$$

Приращения деформации ползучести dp в тангенциальном и аксиальном направлениях определяются так:

$$dp_{\theta} = \frac{1}{2 \cdot \sigma_e} (2 \cdot \sigma_{\theta} - \sigma_z) \cdot dp_e. \quad (2.58)$$

$$dp_z = \frac{1}{2 \cdot \sigma_e} (2 \cdot \sigma_z - \sigma_\theta) \cdot dp_e. \quad (2.59)$$

Эквивалентная деформация ползучести p_e в (2.57) на текущем временном шаге определяется как

$$p_{e,n+1} = p_{e,n} + \theta \cdot dp_e, \quad (2.60)$$

где $\theta = 0,5$; $n+1$ – номер текущего временного шага.

Деформация ползучести оболочки p в выражении (2.51) определяется как

$$p = p_{\theta,n+1} = \sum_{m=1}^{n+1} dp_{\theta,m}, \quad (2.61)$$

где $n+1$ – номер текущего временного шага.

Можно сделать вывод, что расчет деформации оболочки, а также изменения в ширине зазора таблетка-оболочка с помощью упрощенной механической модели нужен для достижения конвергенции в конце каждого шага по времени, поскольку используется итерационный процесс между расчётами температуры и температурозависимых величин (рис. 2.8).

Таким образом, рассчитав величины эквивалентных деформаций и напряжений ползучести в зависимости от времени для конкретного режима нагружения твэла реактора ВВЭР-1000, возможно найти накопленную энергию необратимых деформаций ползучести и рассчитать параметр поврежденности оболочки, определяющий долговечность оболочки в переменном режиме (см. п. 2.1.3).

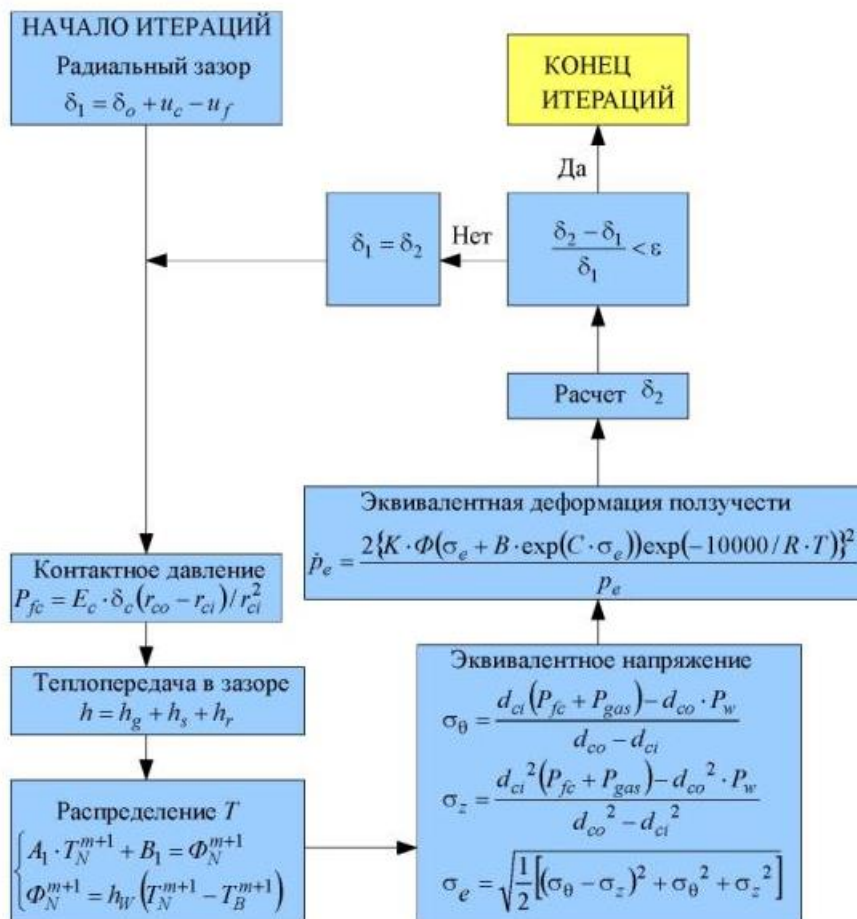


Рис. 2. 8. Схема итерационного процесса между расчетами температуры и температурозависимых величин

В результате проведенных исследований предложена математическая модель изменения свойств оболочки твэла РУ с ВВЭР-1000, позволяющая в рамках одной расчетной модели анализировать состояние оболочки в любом переменном режиме нагружения. В этой модели для расчета работы $A(\tau)$, накопленной в процессе ползучести до момента разрушения оболочки и потраченной на ее разрушение, при совместном решении уравнений теплопроводности и механической деформации компонентов твэла используются МКЭ, а также энергетический вариант теории ползучести, что позволяет определить изменение состояния оболочки твэла РУ в зависимости от режима ее нагружения и выполнить модельный эксперимент.

2.3. Выводы по второму разделу

1. Ключевым фактором при оценке долговечности оболочки твэла РУ ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения является ползучесть материала оболочки.

2. Метод анализа долговечности оболочки твэла реактора ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения на основе энергетического варианта теории ползучести позволяет использовать в явной форме совместно критерии прочности SC2 и SC4, а также учитывать неявно остальные прочностные критерии (SC1, SC3, SC5) в рамках одного расчетного алгоритма.

3. Математическая модель, заложенная в ПС FEMAXI, пригодна для анализа изменения свойств твэла реактора ВВЭР-1000 в режиме переменного нагружения, поскольку использует метод конечных элементов, позволяющий корректно оценивать изменения в состоянии твэла не только в стационарных, но и в переходных режимах, а также применяет алгоритм совместного решения уравнений теплопроводности и механической деформации для вычисления эквивалентных деформации ползучести и напряжения в зависимости от режима нагружения.

4. Синтез математической модели, заложенной в ПС FEMAXI, и модели оценки долговечности оболочки твэла на основе энергетического варианта теории ползучести позволил впервые описать изменение свойств твэла РУ ВВЭР-1000 в зависимости от режима переменного нагружения РУ.

5. Используя предложенную математическую модель изменения свойств твэла РУ ВВЭР-1000 в различных эксплуатационных режимах, необходимо выполнить оценку долговечности оболочки твэла в переменном режиме нагружения и проанализировать полученные результаты.

РАЗДЕЛ 3.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА РУ ВВЭР-1000/В-320 В ПЕРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ

3.1. Замыкающие соотношения для моделирования изменения свойств топлива РУ ВВЭР-1000 (В-320) в переменном режиме

Замыкающие соотношения для моделирования изменения свойств топлива РУ ВВЭР-1000 (В-320) в переменном режиме нагружения делятся на две группы: замыкающие соотношения, описывающие свойства материалов топливной таблетки и замыкающие соотношения, описывающие свойства материалов оболочки ТВЭЛА.

Замыкающие соотношения, описывающие свойства материалов топливной таблетки, включают в себя описание теплопроводности, термического расширения, плотности, модуля Юнга, коэффициента Пуассона, ползучести, распухания, горячего прессования, уплотнения, релокации, пластичности, удельной теплоемкости, роста зерна, температуры плавления спеченной двуокиси урана, а также интенсивности испускания г/о ПД в таблетке.

Математическая модель свойств материалов оболочки ТВЭЛА включает в себя описание теплопроводности, теплового расширения, модуля Юнга, коэффициента Пуассона, ползучести, пластичности, радиационного роста, удельной теплоемкости, плотности, скорости коррозии циркониевого сплава Э-110.

Для дальнейшего исследования систематизируем математические модели свойств материалов ТВЭЛА.

3.1.1. Замыкающие соотношения для моделирования свойств материалов топливной таблетки

Для описания теплофизических свойств двуокиси урана в специальной литературе предложено много альтернативных моделей: MATPRO-09 [102], WASHINGTON [104], HIRAI [105], WIESENACK [106], FORSBERG [107] и др. Наиболее часто используемой в задачах анализа изменения свойств топлива ЯР является модель MATPRO-09 [71, 102]. В дальнейшем теплофизические свойства двуокиси урана, если не оговорено особо, будут задаваться в соответствии с MATPRO-09.

Модель теплопроводности топливной таблетки представляется следующими зависимостями:

– в области температур 0 – 1650 °С как

$$K = \left\{ \frac{1 - \beta(1 - D)}{1 - 0,05 \cdot \beta} \right\} \cdot \left\{ \frac{40,4}{464 + T} + 1,216 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(1,867 \cdot 10^{-3} \cdot T) \right\}, \quad (3.1)$$

где K – коэффициент теплопроводности таблетки UO_2 , Вт/см·К; D – коэффициент теоретической плотности UO_2 , т.е. отношение реальной плотности двуокиси урана к ее теоретической плотности; β – коэффициент пористости, $\beta = 2,58 - 0,58 \cdot 10^{-3} \cdot T$; T – температура, °С.

– в области температур 1650 – 2840 °С как

$$K = \left\{ \frac{1 - \beta(1 - D)}{1 - 0,05 \cdot \beta} \right\} \cdot \left\{ 0,0191 + 1,216 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(1,867 \cdot 10^{-3} \cdot T) \right\}. \quad (3.2)$$

Модель термического расширения топливной таблетки представляется следующей зависимостью:

$$\frac{\Delta L}{L} = -4,972 \cdot 10^{-4} + 7,107 \cdot 10^{-6} \cdot T + 2,581 \cdot 10^{-9} \cdot T^2 + 1,140 \cdot 10^{-13} \cdot T^3, \quad (3.3)$$

где $\frac{\Delta L}{L}$ – линейное термическое расширение; T – температура, °С.

Теоретическая плотность ρ топливной таблетки представляется в виде следующей постоянной величины:

$$\rho = 10,96 \text{ г/см}^3. \quad (3.4)$$

Модуль Юнга топливной таблетки представляется следующей зависимостью:

$$E = 2,26 \cdot 10^{11} (1 - 1,131 \cdot 10^{-4} \cdot T) [1 - 2,62(1 - D)], \quad (3.5)$$

где E – модуль Юнга, Па; T – температура, °С; D – коэффициент теоретической плотности.

Коэффициент Пуассона ν топливной таблетки представляется в виде следующей постоянной величины:

$$\nu = 0,316. \quad (3.6)$$

Модель ползучести топливной таблетки представляется в виде следующей зависимости для скорости установившейся ползучести $\dot{\epsilon}$ топливной таблетки:

$$\dot{\epsilon} = \frac{(A_1 + A_2 \cdot \dot{F}) \sigma \cdot \exp(-Q_1 / R \cdot T)}{(A_3 + D) G^2} + \frac{A_4 \cdot \sigma^{4,5} \cdot \exp(-Q_2 / R \cdot T)}{(A_5 + D)} + \quad (3.7)$$

$$+ A_6 \cdot \sigma \cdot \dot{F} \cdot \exp(-Q_3 / R \cdot T),$$

где $\dot{\epsilon}$ – скорость установившейся ползучести, ч⁻¹; \dot{F} – скорость делений ($8,4 \cdot 10^{17} - 1,18 \cdot 10^{20} \text{ 1/м}^3 \cdot \text{с}$); σ – напряжение, psi ($\sigma \approx 1000-16000 \text{ psi}$, $\text{psi} \approx 6,895 \text{ кПа}$); T – температура (713–2073 К); D – коэффициент теоретической плотности (92–98 %); G – размер зерна (4–35 мк); R – газовая постоянная, кал/моль·К ($R \approx 1,987 \text{ кал/моль} \cdot \text{К}$).

Константы $A_1 - A_6$ и $Q_1 - Q_3$ имеют значения, представленные в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Значения констант $A_1 - A_6$ и $Q_1 - Q_3$

A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	Q_i , кал/моль		
						Q_1	Q_2	Q_3
$9,73 \cdot 10^6$	$3,24 \cdot 10^{-12}$	-87,7	$1,38 \cdot 10^{-4}$	-90,5	$9,24 \cdot 10^{-28}$	$9,00 \cdot 10^4$	$1,32 \cdot 10^5$	$5,20 \cdot 10^3$

Модель распухания топливной таблетки представляется в виде следующих соотношений для относительного увеличения объема $\frac{\Delta V}{V}$ двуокиси урана вследствие распухания под действием газообразных и твердых продуктов деления, представленных в табл. 3.2:

Таблица 3.2

Распухание двуокиси урана

Температура в центре таблетки, °С	$\frac{\Delta V}{V}$, %/10 ²⁰ дел./см ³
$T \leq 1400$	0,28
$1400 \leq T \leq 1800$	$0,28[1 + 0,00575(T - 1400)]$
$1800 \leq T \leq 2200$	$0,28[3,3 - 0,004(T - 1800)]$
$T > 2200$	0,476

Горячим прессованием называется изменение объемной деформации таблетки, сопровождаемое пластической деформацией и деформацией ползучести. Модель горячего прессования для изотропного материала представляется с помощью следующих зависимостей [71]:

$$\Delta \varepsilon_{h,n+1} = \frac{9 \cdot \alpha}{\bar{\sigma}} (\Delta \bar{\varepsilon}_{n+1}^P + \Delta \bar{\varepsilon}_{n+1}^c) (\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta), \quad (3.8)$$

где $\bar{\varepsilon}_{n+1}^P$, $\bar{\varepsilon}_{n+1}^c$ – эквивалентная деформация соответственно пластичности и ползучести на $n+1$ -м временном шаге; α – параметр горячего прессования таблетки [104], в простейшем случае параметр горячего прессования таблетки α для двуокиси урана может задаваться его фиксированным начальным значением 0,002 [71];

Эквивалентное напряжение $\bar{\sigma}$ в (3.8) представляется следующей зависимостью:

$$\bar{\sigma} = \left[\frac{3}{2(F+G+H)} \left\{ H(\sigma_r - \sigma_z)^2 + F(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + G(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + 2 \cdot N \cdot \tau_{rz}^2 \right\} + 3 \cdot \alpha (\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.9)$$

где $H = F = G = 1$, $N = 3$ для изотропного материала.

Модель уменьшения объема двуокиси урана из-за уплотнения представляется следующим соотношением [95]:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V^{\max}}{V} (1 - e^{-C \cdot Bu}), \quad (3.10)$$

где $\frac{\Delta V}{V}$ – уменьшение объема из-за уплотнения; $\frac{\Delta V^{\max}}{V}$ – максимальное уменьшение объема из-за уплотнения ($\approx 1,0$ %); Bu – выгорание, МВт·сут/т- UO_2 ; $C = 2,3025/SBU$; $SBU \approx 2500$ МВт·сут/т- UO_2 – выгорание, при котором $e^{-C \cdot Bu} = e^{-2,3025} = 0,1$, т.е. уплотнение завершено на 90 %.

Релокацией называют явление, при котором части треснувшей таблетки при пуске реактора расходятся в радиальном направлении, в результате чего зазор между таблеткой и оболочкой сужается. Начальная релокация REL_0 представляется пропорциональной ширине зазора в состоянии “нагруженного резерва”, т.е. когда выгорание и линейная плотность энерговыделения равны нулю, с помощью следующей зависимости [71]:

$$REL_0 = \gamma \cdot (r_{iA,0} - r_{oAA,0}), \quad (3.11)$$

где $r_{iA,0}$ и $r_{oAA,0}$ – соответственно внутренний радиус оболочки и радиус таблетки в состоянии нагруженного резерва, см; γ – параметр релокации, определяемый на основе опытных данных и составляющий от $\gamma = 0,2$ до $\gamma = 0,5$.

Модель изменения в зависимости от температуры предела текучести σ_Y и параметра деформационного упрочнения H' (тангенциальной жесткости) представляется с помощью следующих зависимостей [108]:

$$\sigma_Y = \begin{cases} 66,9 - 0,0397 \cdot T + (520,0 - 0,386 \cdot T) \cdot \bar{\epsilon}_p & (T \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}); \\ 36,6 - 0,0144 \cdot T + (139,5 - 0,06875 \cdot T) \cdot \bar{\epsilon}_p & (T > 1200 \text{ } ^\circ\text{C}), \end{cases} \quad (3.12)$$

где σ_Y – предел текучести, кг/мм²; T – температура, °C.

$$H' = \begin{cases} 520,0 - 0,386 \cdot T & (T \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}) \\ 139,5 - 0,06875 \cdot T & (T > 1200 \text{ } ^\circ\text{C}) \end{cases}, \quad (3.13)$$

где H' – тангенциальная жесткость, кг/мм².

Математическая модель удельной теплоемкости C_p двуокиси урана представляется следующей зависимостью:

$$C_p = 15,496 \left[\frac{K_1 \cdot \theta^2 \cdot \exp(\theta/T)}{T_2 [\exp(\theta/T) - 1]^2} + 2 \cdot K_2 \cdot T + \frac{K_3 \cdot E_D}{R \cdot T^2} \exp(-E_D / R \cdot T) \right], \quad (3.14)$$

где C_p – удельная теплоемкость UO_2 , Дж/кг·К; $K_1=19,145$ кал/моль·К; $K_2=7,8473 \cdot 10^{-4}$ кал/моль·К²; $K_3=5,6437 \cdot 10^6$ кал/моль; $\theta = 535,285$ К; $E_D = 37694,6$ кал/моль; T – температура, К; $R=1,987$ кал/моль·К.

Для описания роста диаметра зерна D двуокиси урана могут использоваться соотношения ИТОН [109], MACEWAN [110], LYONS [111] и др. Согласно модели ИТОН, модель роста диаметра зерна D двуокиси урана представляется следующей зависимостью:

$$\frac{dD}{dt} = K \left(\frac{1}{D} - \frac{1 + N_f / N_f^{\max}}{D_m} \right), \quad (3.15)$$

где D – диаметр зерна в момент времени t , мк; K – константа скорости, мк²/ч; $K = 5,24 \cdot 10^7 \cdot \exp(-2,67 \cdot 10^5 / R \cdot T)$; $R=8,314$ Дж/моль·К; T – температура, К; D_m – предельный размер зерна, мк; $D_m=2,23 \cdot 10^3 \cdot \exp(-7620/T)$; N_f, N_f^{\max} – соответственно плотность и предельная плотность атомов г/о ПД на границе зерна, 1/см².

Для описания интенсивности испускания г/о ПД поперечное сечение таблетки UO_2 делится с учетом градиента температуры на концентрические области. Модель, описывающая интенсивность испускания г/о ПД, представляется следующей зависимостью [71]:

$$f = \frac{1}{V} \sum_i a_i \cdot V_i, \quad (3.16)$$

где a_i – интенсивность испускания в i -й области, моль/с; V_i – объём i -й области, соответствующий единице высоты таблетки, м³; $V = \sum_i V_i$.

Согласно модели MATPRO-11 + CHRISTENSEN, температура плавления

таблетки из двуокиси урана представляется следующей зависимостью [112, 113]:

$$T = T_0 - 5,414 \cdot P + 0,007468 \cdot P^2 - 0,0032 \cdot Vi, \quad (3.17)$$

где T – температура плавления таблетки, °С; T_0 – температура плавления необлучённого материала UO_2 (2800 °С); P – молярная доля PuO_2 , %; Vi – выгорание, МВт·сут/т.

3.1.2. Замыкающие соотношения для моделирования свойств материалов оболочки твэла

В качестве материала оболочек твэлов РУ ВВЭР-1000 (В-320) применяется циркониевый сплав Э-110 (Zr + 1 % Nb).

Применяя линейную интерполяцию табличных данных [114], зависимость коэффициента теплопроводности сплава Э-110 в интервале температур 293–1773 К представляется как функция температуры следующим образом:

$$\lambda = k_1 + k_2 \cdot (T - k_3), \quad (3.18)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; T – температура, К; k_1, k_2, k_3 – константы, значения которых приведены в табл. 3.3.

Математическая модель теплопроводности окисного слоя ZrO_2 в соответствии с MATPRO-A представляется следующей зависимостью [115]:

$$k = 0,835 + 1,81 \cdot 10^{-4} \cdot T, \quad (3.19)$$

где k – коэффициент теплопроводности ZrO_2 , Вт/м·К.

**Константы для определения коэффициента теплопроводности
сплава Э-110**

Температура, К	k_1	$k_2 \cdot 10^2$	k_3
$293 \leq T < 373$	17,2	1,0	293
$373 \leq T < 473$	18,0	1,3	373
$473 \leq T < 573$	19,3	0,80	473
$573 \leq T < 673$	20,1	0,40	573
$673 \leq T < 773$	20,5	0,40	673
$773 \leq T < 873$	20,9	0,90	773
$873 \leq T < 973$	21,8	1,1	873
$973 \leq T < 1273$	22,9	1,633	973
$1273 \leq T < 1373$	27,8	1,2	1273
$1373 \leq T < 1473$	29,0	1,1	1373
$1473 \leq T < 1573$	30,1	1,1	1473
$1573 \leq T < 1673$	31,2	1,1	1573
$1673 \leq T \leq 1773$	32,3	1,1	1673

Применяя линейную интерполяцию табличных данных [114], математическая модель коэффициента теплового расширения сплава Э-110 в интервале температур 293–2323 К представляется следующей зависимостью:

$$\alpha = k_1 + k_2 \cdot (T - k_3), \quad (3.20)$$

где α – коэффициент теплового расширения, 10^{-6} 1/К; T – температура, К; k_1, k_2, k_3 – константы, значения которых приведены в табл. 3.4.

Математическая модель термического расширения окисной пленки оболочки ZrO_2 представляется следующей зависимостью MATPRO-A [115]:

$$\Delta L / L_0 = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot T - 2,34 \cdot 10^{-3}, \quad (3.21)$$

где $300 \leq T \leq 1478$ К; $\Delta L / L_0$ – линейное термическое расширение окисной пленки оболочки.

**Константы для определения коэффициента теплового
расширения сплава Э-110**

Температура, К	k_1	$k_2 \cdot 10^3$	k_3
$293 \leq T < 323$	5,8	0	0
$323 \leq T < 523$	5,8	2,0	323
$523 \leq T < 623$	6,2	1,0	523
$623 \leq T < 723$	6,3	1,0	623
$723 \leq T < 1123$	6,4	2,0	723
$1123 \leq T < 1523$	7,2	2,0	1123
$1523 \leq T < 1923$	8,0	2,0	1523
$1923 \leq T < 2223$	8,8	2,667	1923
$2223 \leq T \leq 2323$	9,6	8,0	2223

Для различных циркониевых сплавов величина модуля Юнга отличается несущественно [116]. Таким образом, для вычисления модуля Юнга сплава Э-110 можно принимать одну из зависимостей, используемых для вычисления модуля Юнга циркалоевой оболочки.

Согласно модели FISHER, изменение модуля Юнга циркалоя в зависимости от температуры представляется следующей зависимостью [117]:

$$E = [9,900 \cdot 10^5 - 566,9 \cdot (T - 273,15)] \cdot 9,8067 \cdot 10^4, \quad (3.22)$$

где E – модуль Юнга циркалоя, Па; T – температура, К.

Согласно модели MATPRO-A, изменение модуля Юнга окисной пленки оболочки ZrO_2 в зависимости от температуры представляется следующей зависимостью [115]:

$$E_{\text{окис}} = 1,367 \cdot 10^{11} - 3,77 \cdot 10^7 \cdot T, \quad (3.23)$$

где $E_{\text{окис}}$ – модуль Юнга окисной пленки оболочки, Па; T – температура, К.

Коэффициент Пуассона для оболочечного сплава Э-110 слабо зависит от фактора облучения и составляет: $\nu \approx 0,35$ [118]. Коэффициент Пуассона для окисной пленки оболочки ZrO_2 составляет: $\nu \approx 0,30$ [115].

Как показали расчетные оценки ползучести оболочки реактора ВВЭР-1000 в комбинированном цикле переменного нагружения (5 сут. — 100 % + 75 %; 2 сут. — 50 %), при достижении глубины выгорания топлива ≈ 26 МВТ·сут/кг величина эквивалентной деформации ползучести p_e материала оболочки максимально нагруженного твэла достигает величины $p_e \approx 2$ %, а при выгорании ≈ 60 МВТ·сут/кг эквивалентная деформация ползучести $p_e \approx 9$ % [10, 11].

Поскольку величина накопленной деформации ползучести оболочки твэла зависит от истории нагружения (полного набора уровней мощности, на которых находился реактор в ходе кампании), то при анализе допустимости того или иного режима переменного нагружения РУ должно быть учтено такое сложное и еще недостаточно изученное в реакторных условиях явление, как ползучесть оболочки [71, 72].

В настоящее время для описания ползучести во внутриреакторных условиях циркониевого сплава циркалой-4 широко применяются соотношения моделей MATPRO-09 [102] и ROSINGER [119].

Удобство соотношения, описывающего ползучесть циркониевого сплава в модели MATPRO-09, заключается в том, что построена обобщающая зависимость для скорости деформации ползучести, позволяющая вычислять накопленную деформацию ползучести при изменяющихся во времени режимных параметрах (температуре, потоке быстрых нейтронов, эквивалентном напряжении):

$$\dot{\epsilon} = K \cdot \hat{O}(\sigma_e + B \cdot e^{C \cdot \sigma_e}) \exp(-10000/R \cdot T) t^{-1/2} \cdot k, \quad (3.24)$$

где $\dot{\epsilon}$ – двухосная скорость деформации ползучести, м/м·с; $K = 5,129 \cdot 10^{-29}$; $B = 7,252 \cdot 10^2$; $C = 4,967 \cdot 10^{-8}$; $R = 1,987$ кал/моль·К; T – температура, К ($T < 730$ К); t – время, с; Φ – плотность потока быстрых нейтронов, $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ($E > 1,0$ МэВ); σ_e – эквивалентное напряжение, Н/м²; $k = 1$ – для РА-циркалоя, $k =$

1,3 – для SR-циркалоя.

Вне диапазона применимости модели MATPRO-09 для описания ползучести во внутриреакторных условиях циркониевого сплава циркалой-4 применяется модель ROSINGER (только при $t \geq 730$ K):

$$\dot{\varepsilon}_\alpha = 2000 \cdot \sigma_e^{5,32} \cdot \exp(-34220/T), \quad (3.25)$$

где $730 \text{ K} \leq T \leq 1073 \text{ K}$; $\dot{\varepsilon}_\alpha$ – скорость ползучести, с^{-1} ; σ_e – эквивалентное напряжение, МПа.

Данные по скорости ползучести сплава Э-110 во всём диапазоне внутриреакторных условий ВВЭР-1000 в открытых публикациях, в качестве типичного примера которых можно привести работы [72,121,122], отсутствуют, что затрудняет построение обобщающей зависимости по ползучести Э-110, аналогичной уравнениям ползучести (3.24)–(3.25).

В [72] приведены сравнительные экспериментальные данные по деформации ползучести циркониевых сплавов Э-110, Э-635 и циркалой-4 после 354 суток для постоянных температуры 350°C и внутреннего давления 100 МПа (рис. 3.1).

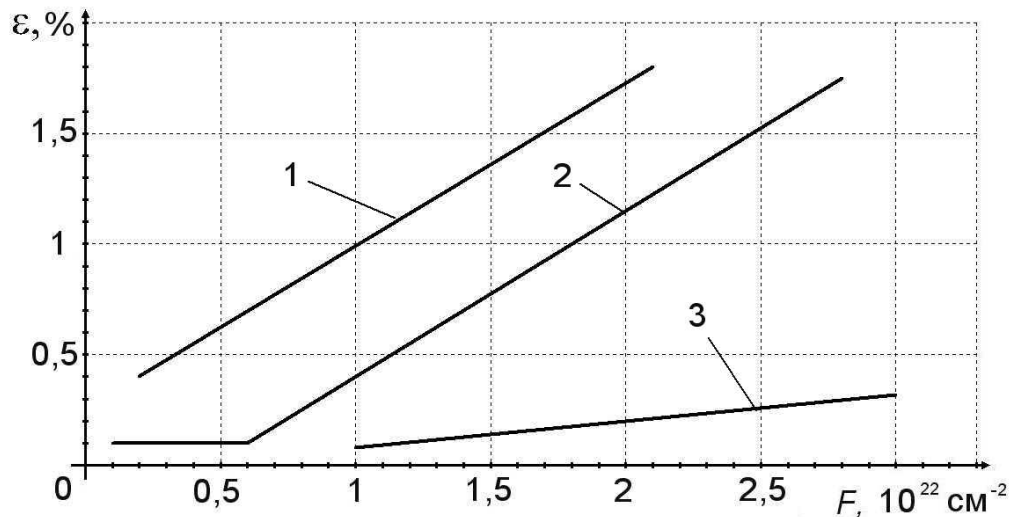


Рис. 3.1. Деформация ползучести оболочечных труб при 350°C , 100 МПа, 8500 ч: 1 – сплав циркалой-4; 2 – сплав Э-110; 3 – сплав Э-635; ε – деформация ползучести, %; F – флюенс нейтронов с энергией $> 0,1 \text{ МэВ}$, см^{-2}

Однако, в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000 необходимо рассматривать двухосную скорость деформации ползучести при переменных температуре и давлении [71], существенно отличных от принятых в указанном эксперименте постоянных значений $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 100 МПа . Как известно, давление под оболочкой твэла реактора ВВЭР-1000 в начале кампании равно $\approx 2\text{ МПа}$ и далее меняется по мере увеличения выгорания топлива, а давление теплоносителя снаружи оболочки составляет $\approx 16\text{ МПа}$. Как уже отмечалось, при достижении глубины выгорания $20\text{ МВт}\cdot\text{сут/кг}$, при подъеме в течение 1 ч мощности реактора ВВЭР-1000 с уровня 50 % до уровня 100 % (линейная тепловая нагрузка в твэле при этом меняется со 124 Вт/см до 248 Вт/см), температура максимально нагретой части оболочки твэла возрастает со $374,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $455,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, можно видеть, что экспериментальные данные по деформации ползучести циркониевого сплава Э-110 [72] не применимы для построения обобщающей зависимости для скорости деформации ползучести, аналогичной (3.24)–(3.25).

В качестве другого типичного примера данных по ползучести сплава Э-110, доступных из открытой печати, можно привести публикацию [121], где приведена зависимость окружной деформации термической ползучести от времени для оболочечных труб из штатного сплава Э-110 (смесь электролитического и иодидного циркония) и сплава Э-110 на основе губчатого циркония, полученная при испытании для постоянных температуры и внутреннего давления ($400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 100 МПа) (рис. 3.2).

На рис. 3.3 и 3.4 показана зависимость радиационной ползучести оболочечных труб из сплава Э-110 на основе смеси электролитического и иодидного циркония от флюенса в реакторе БОР-60, полученная в ходе испытаний при постоянных температуре и внутреннем давлении ($330\text{ }^{\circ}\text{C}$, 130 МПа) и ($340\text{ }^{\circ}\text{C}$, 110 МПа) соответственно [121].

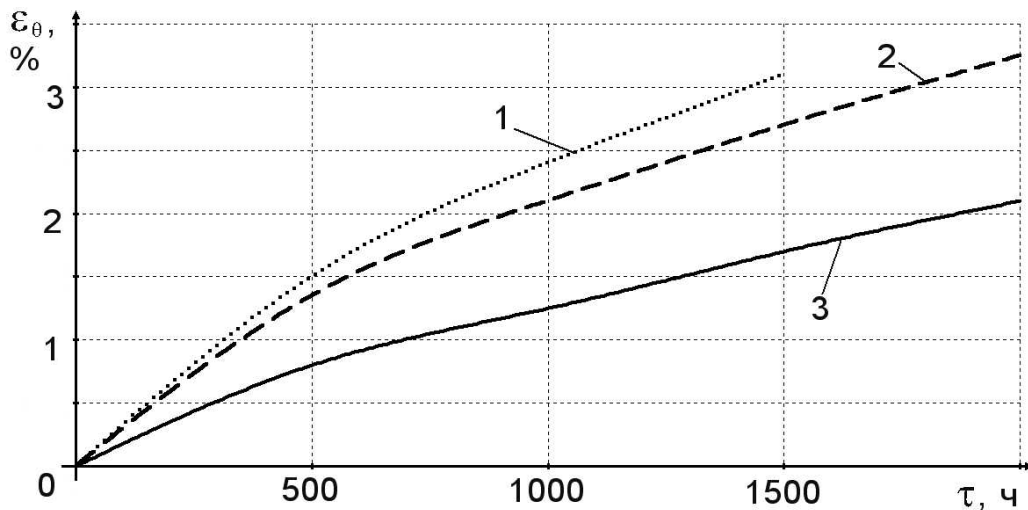


Рис. 3.2. Зависимость окружной деформации термической ползучести ϵ_θ от времени для оболочечных труб из штатного сплава Э-110 при внутренних параметрах (400 °С, 100 МПа): 1, 2, 3 – $\epsilon_\theta(\tau)$ для губчатого Zr плавки № 312-04, губчатого Zr № 440-05 и электролитного Zr № 224-03, соответственно

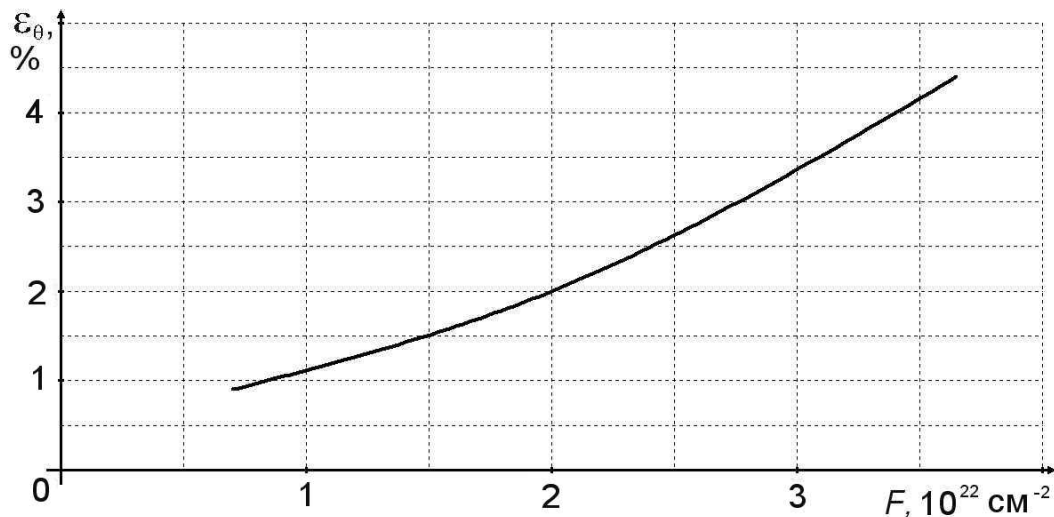


Рис. 3.3. Зависимость окружной деформации радиационной ползучести оболочечных труб из сплава Э-110 от флюенса при внутренних параметрах (330 °С, 130 МПа)

Анализируя данные, приведенные на рисунках 3.1–3.4, можно сделать вывод, что, поскольку оболочка твэла реактора ВВЭР-1000 эксплуатируется при переменных рабочих условиях, кардинально отличных от постоянных рабочих условий, принятых в [72] и [121], экспериментальные данные указанных источников неприменимы для адекватного описания скорости

ползучести сплава Э-110 во всем диапазоне режимных параметров, характерных для постоянного и переменного режимов нагружения РУ.

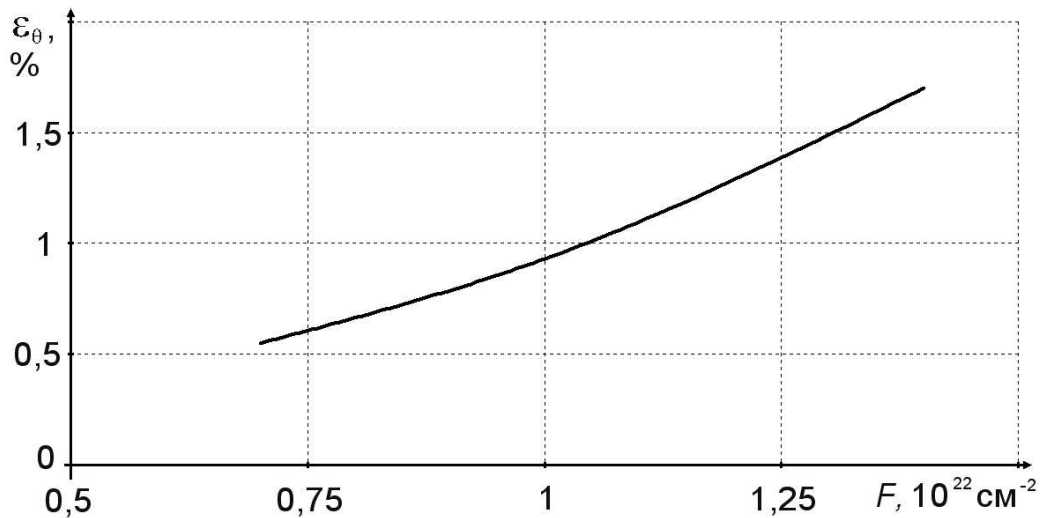


Рис. 3.4. Зависимость окружной деформации радиационной ползучести оболочечных труб из сплава Э-110 от флюенса при внутренних параметрах (340 °С, 110 МПа)

Использование уравнения ползучести (3.24) циркониевого сплава модели MATPRO-09 обеспечивает консервативность оценки деформации ползучести (см. рисунок 3.1), при этом для циркалового сплава марки SR оценка деформации ползучести более консервативна, чем для циркалового сплава марки RA – см. (3.24). В результате статистической обработки данных о величине условного предела текучести облученных твэльных оболочек реакторов ВВЭР и РБМК, изготовленных из сплава Э-110, получена следующая обобщенная температурная зависимость для условного предела текучести [123]:

$$\sigma_{0,2} \approx 542 - 0,569 \cdot (T - 273), \quad 293 \text{ K} \leq T \leq 773 \text{ K}, \quad (3.26)$$

где $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, МПа; T – температура, К.

В результате испытаний, проведенных в реакторе БОР-60, получены следующие данные по зависимости деформации радиационного роста оболочечных труб, изготовленных из сплава Э-110, от флюенса нейтронов (рис. 3.5) [71].

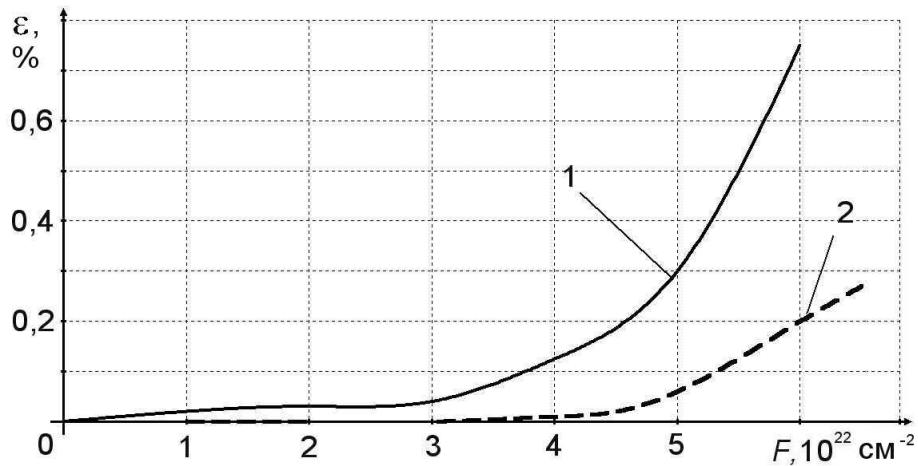


Рис. 3.5. Зависимость деформации радиационного роста оболочечных труб из сплава Э-110 от флюенса нейтронов: 1 – сплав Э110 на основе смеси электролитического и иодидного циркония; 2 – сплав Э110 на основе губчатого циркония

Анализируя зависимость деформации радиационного роста оболочечных труб из сплава Э-110 от флюенса нейтронов, приведенную на рисунке 3.5, можно сделать вывод, что указанная зависимость получена для сравнительно узкого диапазона температур 330–340 °С, что отличает ее от широко известного выражения, описывающего радиационный рост циркалоя модели MATPRO-09 [71, 102]

$$\frac{\Delta L}{L_0} \approx 3,13 \cdot 10^{-16} \cdot \exp(240,8/T) [\Phi \cdot t]^{1/2}, \quad (3.27)$$

где $\frac{\Delta L}{L_0}$ – деформация радиационного роста (–); T – температура, К; $\Phi \cdot t$ – флюенс быстрых нейтронов, $1/\text{м}^2$ ($E > 1$ МэВ).

Применяя линейную интерполяцию табличных данных [114], математическая модель удельной теплоемкости сплава Э-110 в интервале температур 373–1400 К представляется следующим образом:

$$c_p = k_1 + k_2 \cdot (T - k_3), \quad (3.28)$$

где c_p – удельная теплоёмкость, Дж/кг·К; T – температура, К; k_1, k_2, k_3 – константы, значения которых приведены в табл. 3.5.

Константы для определения удельной теплоемкости сплава Э-110

Температура, К	k_1	k_2	k_3
$373 \leq T < 500$	280	0,2913	373
$500 \leq T < 600$	317	0,16	500
$600 \leq T < 700$	333	0,16	600
$700 \leq T < 800$	349	0,16	700
$800 \leq T < 900$	365	0,53	800
$900 \leq T < 950$	418	0,14	900
$950 \leq T < 1000$	425	3,9	950
$1000 \leq T < 1050$	620	-4,2	1000
$1050 \leq T < 1100$	410	16	1050
$1100 \leq T < 1150$	1210	-11	1100
$1150 \leq T < 1200$	660	-6,24	1150
$1200 \leq T < 1300$	348	0,12	1200
$1300 \leq T \leq 1400$	360	0,13	1300

Математическая модель удельной теплоемкости окисной пленки циркония ZrO_2 представляется следующей зависимостью [71]:

$$c_p = 46,48 + 2,134 \cdot T - 2,936 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 1,433 \cdot 10^{-6} \cdot T^3, \quad (3.29)$$

где c_p – удельная теплоемкость окисной пленки, Дж/кг·К; T – температура, К.

Плотность сплава Э-110 при температуре 293 К равна 6550 кг/м³ [95]. При других температурах математическая модель плотности сплава представляется следующей зависимостью:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + 3 \cdot \alpha \cdot (T - T_0)}, \quad (3.30)$$

где ρ_0 – плотность сплава при 293 К, кг/м³; α – коэффициент теплового расширения, 1/К; T – температура, К;

Согласно данным [115], плотность окисной пленки циркония ZrO_2 равна:

$$\rho = 5,6 \text{ г/см}^3.$$

Кинетика коррозии сплава Э-110 на разной шихтовой основе в деаэрированной воде с температурой 360 °С, давлением 18,6 МПа и деаэрированном паре с температурой 400 °С, давлением 10,3 МПа показана

соответственно на рис. 3.6 и 3.7 [121].

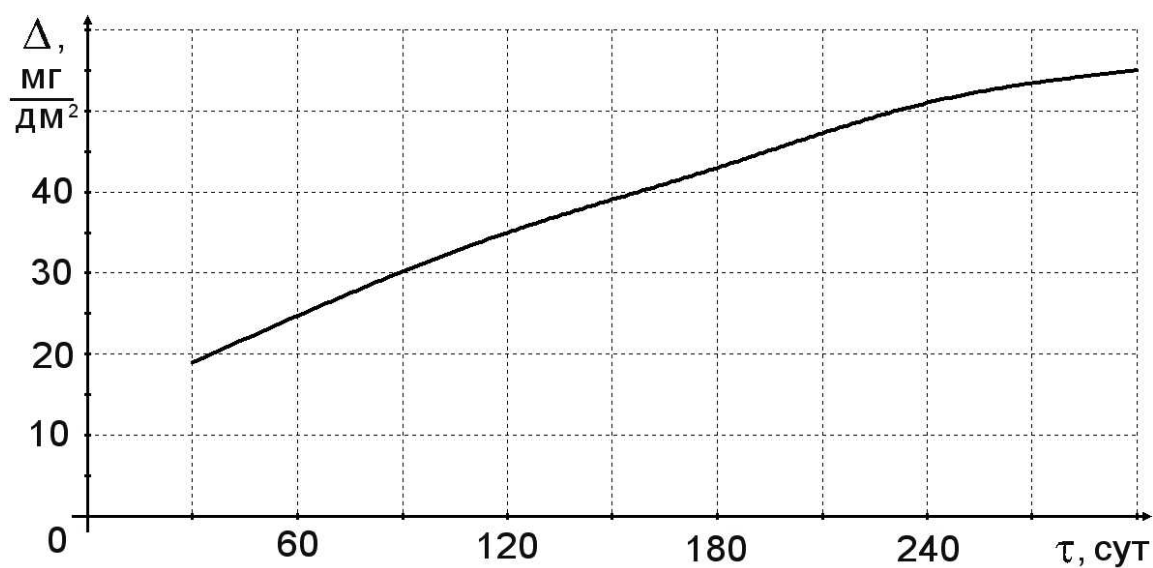


Рис. 3.6. Усредненная по разным плавкам зависимость от времени коррозионного привеса Δ в деаэрированной воде при (360 °C; 18,6 МПа) для сплава Э-110

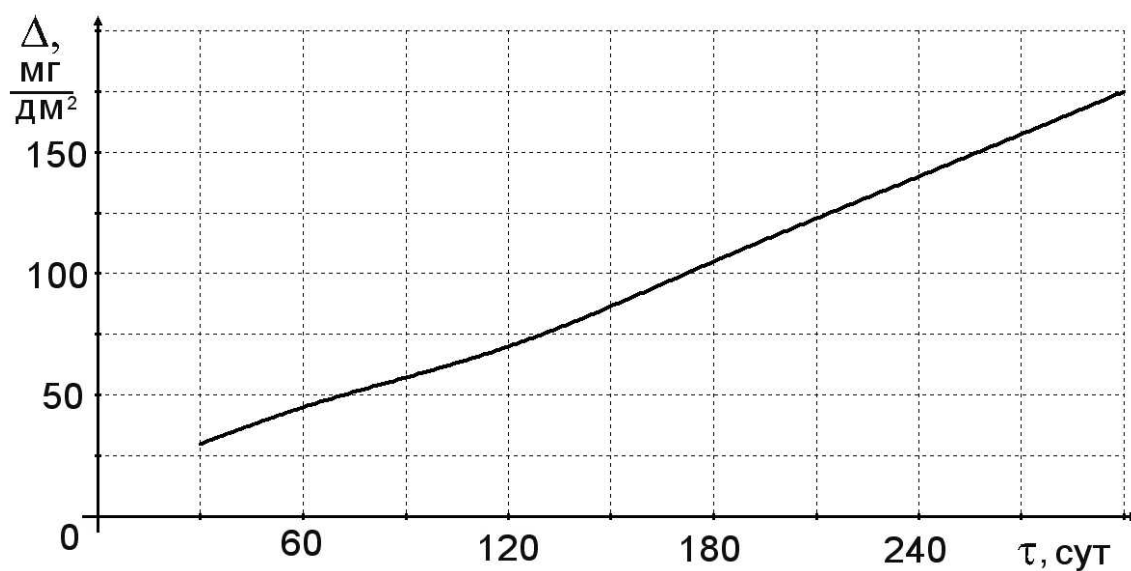


Рис. 3.7. Усредненная по разным плавкам зависимость от времени коррозионного привеса Δ в деаэрированном паре при (400 °C; 10,3 МПа) для сплава Э-110

Анализируя данные, приведенные на рисунках 3.6 и 3.7, можно сделать следующие выводы:

1) Кинетика коррозии различных разновидностей сплава Э-110 существенно различается. Например, после 300 суток испытаний кинетики коррозии сплава Э-110 в деаэрированной воде с температурой 360 °С и давлением 18,6 МПа (см. рисунок 3.6), расхождение в расчетной толщине оксидной пленки для различных видов сплава достигает $\approx 17\%$, причем минимальная расчетная толщина оксидной пленки составила 3,6 мкм, а максимальная – 4,2 мкм.

2) Условия проведения указанных экспериментов по изучению коррозии не соответствуют реально существующим в реакторе ВВЭР-1000 (вода с температурой 290–312 °С и давлением ≈ 16 МПа).

Вместе с тем, для скорости коррозии циркониевого сплава циркалой-4 имеются широко известные соотношения модели МАТПРО-А, применимые во всем интервале рабочих параметров ВВЭР-1000 [115]. Согласно этой модели, толщина окисного слоя оболочки из циркалового сплава до перехода от пузырькового кипения к пленочному оценивается как [71]:

$$S = \left(4,976 \cdot 10^{-3} \cdot A \cdot t \cdot \exp(-15660/T) + S_o^3\right)^{1/3}. \quad (3.31)$$

Толщина окисного слоя оболочки из циркалового сплава после перехода от пузырькового кипения к пленочному представляется следующим образом:

$$S = 82,88 \cdot A \cdot t \cdot \exp(-14080/T) + S_{TRAN}. \quad (3.32)$$

Толщина окисного слоя при переходе:

$$S_{TRAN} = 7,749 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-790/T), \quad (3.33)$$

где S – толщина окисного слоя оболочки из циркалового сплава, м; t – время, сут; T – температура на поверхности контакта окиси и металла, К; $A = 1,5$ (для реакторов типа PWR).

Согласно данным [121], эксперимент по оценке скорости коррозии сплава Э-110 проводился при температуре воды 360 °С и давлении 18,6 МПа, но при температуре воды 360 °С давление насыщения составляет 18,67 МПа.

Таким образом, вода в эксперименте [121] находилась как минимум в режиме развитого кипения и для сравнительной оценки скорости коррозии циркалоевого сплава по соотношению модели [115] и скорости коррозии различных разновидностей сплава Э-110 по данным эксперимента [121] необходимо использовать соотношение (3.32). Пренебрегая термическим сопротивлением окисной пленки и величиной S_{TRAN} , после подстановки $t = 300$ сут, $T = 633$ К в (3.32), толщина окисного слоя циркалоевой оболочки при указанных условиях будет составлять ≈ 10 мкм, тогда как максимальная толщина окисного слоя оболочки из Э-110 составила ≈ 4 мкм (см. рисунок 3.6).

Можно сделать вывод, что оценка скорости коррозии циркониевого сплава в условиях ректора ВВЭР-1000 по соотношению (3.32) модели [115] обеспечивает консервативность оценки.

3.2. Влияние основных конструкционных характеристик твэла и режимных параметров АКЗ ВВЭР-1000 на долговечность оболочки твэла в переменном режиме нагружения

Накопленная удельная энергия рассеяния $A(N)$ оболочки твэла ВВЭР-1000 зависит от режимных характеристик РУ [73]. Например, с уменьшением средней по длине твэла температуры теплоносителя $\langle t_{т/н} \rangle$, остальные режимные характеристики РУ при этом фиксированы, переменный режим (5 суток – 100 %, 46 ч – 50 %), время наступления стадии ускоренного роста ползучести материала оболочки значительно сдвигается вправо по шкале времени (рис. 3.8).

С уменьшением среднего по длине твэла ВВЭР-1000 линейного теплового потока $\langle q_l \rangle$, остальные режимные характеристики РУ при этом не меняются, время наступления стадии ускоренного роста ползучести оболочки также значительно сдвигается вправо по шкале числа недельных циклов нагружения (рис. 3.9).

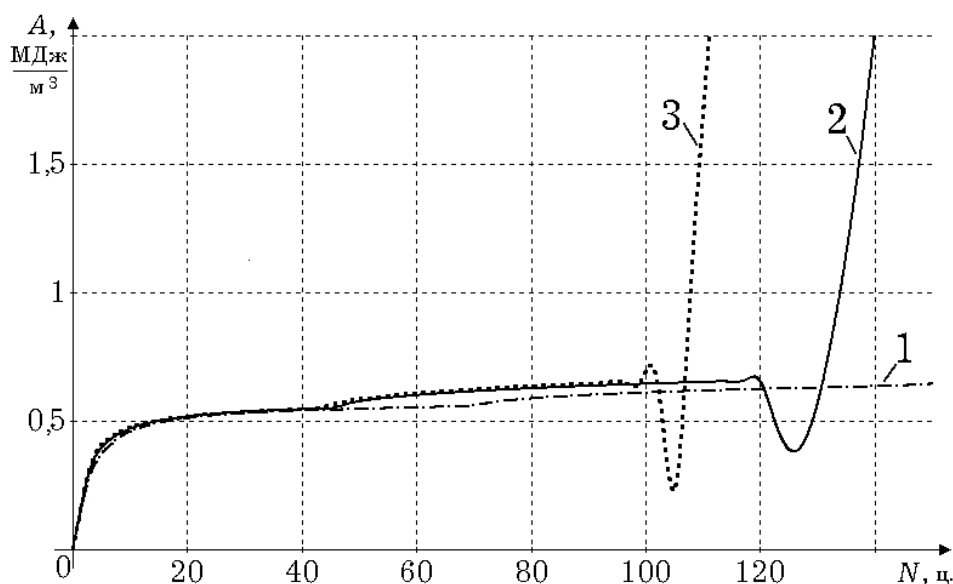


Рис. 3.8. Зависимость удельной энергии рассеяния $A(N)$ от средней по длине твэла температуры теплоносителя $\langle t_{Т/Н} \rangle$ реактора ВВЭР-1000:

1 — $\langle t_{Т/Н} \rangle = 295^\circ\text{C}$; 2 — $\langle t_{Т/Н} \rangle = 305^\circ\text{C}$; 3 — $\langle t_{Т/Н} \rangle = 310^\circ\text{C}$

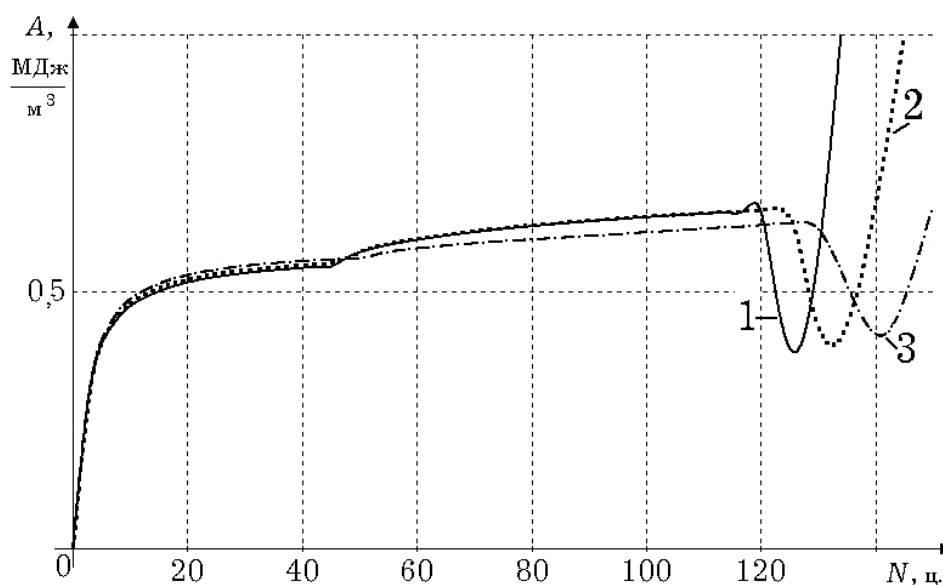


Рис. 3.9. Зависимость удельной энергии рассеяния от среднего по длине твэла ВВЭР-1000 линейного теплового потока $\langle q_l \rangle$:

1 — $\langle q_l \rangle = 180\text{ Вт/см}$; 2 — $\langle q_l \rangle = 175\text{ Вт/см}$; 3 — $\langle q_l \rangle = 170\text{ Вт/см}$

Анализ доступных в открытой печати источников показывает, что в настоящее время нет ни экспериментальных, ни расчетных данных по величине удельной энергии рассеяния A_0 , характерной для начала

разрушения материала оболочки твэла ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения [81, 85, 87–89, 93–95, 124].

В работах [73, 5–15] предложены следующие способы определения величины A_0 :

1) Величина A_0 находится как удельная энергия рассеяния в момент начала стадии ускоренной ползучести. Необходимо отметить, что данный способ определения A_0 является излишне консервативным, так как не позволяет учитывать возможность эксплуатации оболочки в начале стадии ускоренного роста ползучести [8].

2) Величина A_0 находится в соответствии с критерием разрушения оболочки твэла (2.3), синтезирующим критерии прочности оболочки SC2, SC4 и позволяющим учитывать все остальные прочностные критерии (см. таблицу 2.4) в рамках одного расчетного метода. Данный способ определения A_0 позволяет получать физически обоснованные зависимости долговечности оболочки твэла реактора ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения от режимных параметров АКЗ и конструктивных характеристик ТВС, избегая чрезмерного консерватизма, присущего первому способу.

Комбинированным режимом переменного нагружения (5 сут. — 100 % + 75 %; 2 сут. — 50 %) в дальнейшем будет называться режим, при котором РУ в будние дни недели работает по суточному режиму (16 ч — 100 %; 6 ч — 75 %), затем в течение последнего часа каждых пятых суток недели мощность снижается до 50 %. Далее реактор работает в течение 47 ч. на 50 % мощности, после чего в течение последнего часа каждых седьмых суток мощность РУ поднимается до уровня 100 %.

Расчетные оценки удельной энергии рассеяния $A(N)$ для материала оболочки ВВЭР-1000, выполненные на основе описанной во втором разделе математической модели для режима переменного нагружения (5 сут. — (100 % + 75 %), 2 сут. — 50 %) показали, что $A(N)$ существенно зависит от конструктивных характеристик ТВС (см. таблицы 2.5, 2.6).

Например, на рис. 3.10 приведена зависимость $A(N)$ от величины диаметра центрального отверстия таблетки $d_{\text{д\`а\`а}}^{\text{д\`а\`а}}$.

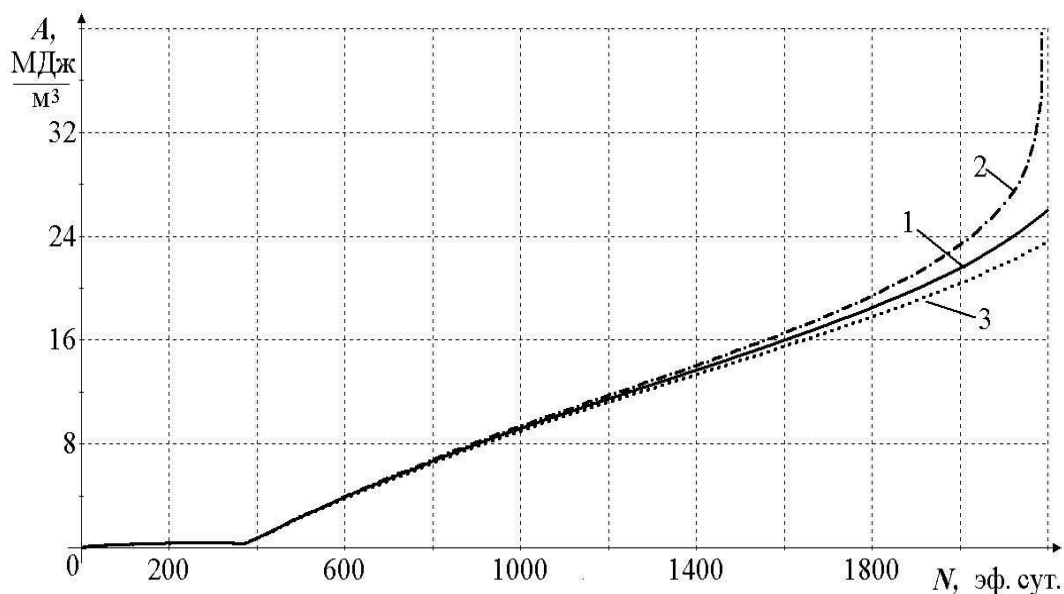


Рис. 3.10. Зависимость удельной энергии рассеяния $A(N)$ для трех величин $d_{\text{д\`а\`а}}^{\text{д\`а\`а}}$: 1 – $d_{\text{д\`а\`а}}^{\text{д\`а\`а}} = 0,140$ см (базовая – в соответствии с [66]); 2 – $d_{\text{д\`а\`а}}^{\text{д\`а\`а}} = 0,112$ см (уменьшена на 20%); 3 – $d_{\text{д\`а\`а}}^{\text{д\`а\`а}} = 0,168$ см (увеличена на 20%).

N – число эффективных суток

На рисунке 3.10 видно, что при уменьшении диаметра центрального отверстия таблетки (остальные режимные параметры АКЗ и конструктивные параметры ТВС при этом фиксированы и задаются для ВВЭР-1000 в соответствии с [80]) накопленная удельная энергия рассеяния материала оболочки значительно увеличивается в области глубоких выгораний (больших N).

В момент потери устойчивости материала оболочки $\tau_0 = 2074$ эф. сут. для случая, когда $d_{\text{д\`а\`а}}^{\text{д\`а\`а}}$ уменьшен на 20 % по сравнению с проектным значением, достигается выполнение условия $\sigma_e^{\text{max}}(\tau_0) = \sigma_0^{\text{max}}(\tau_0)$ (рис. 3.11).

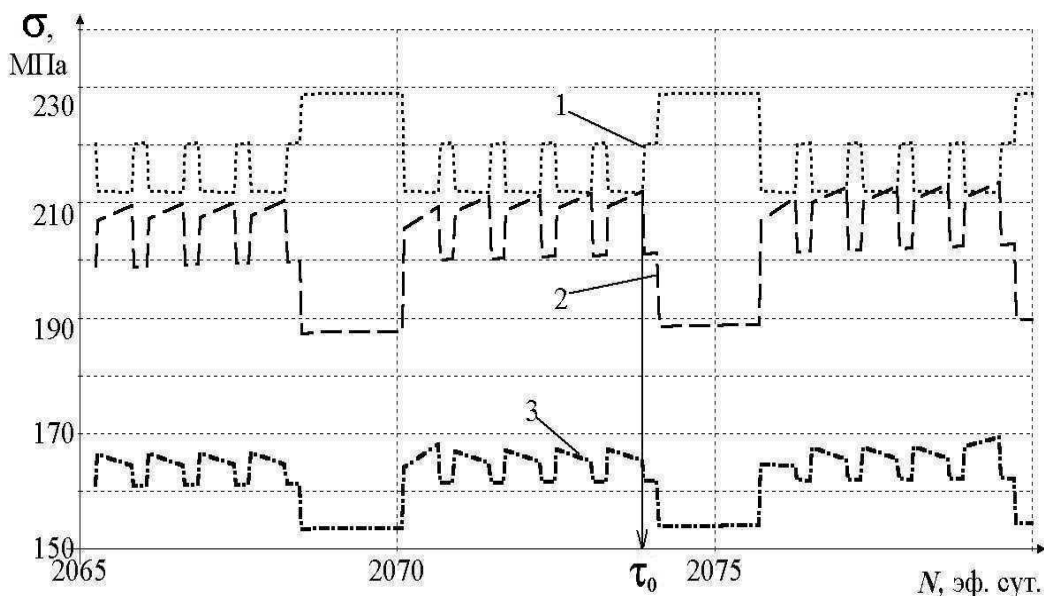


Рис. 3.11. Определение времени τ_0 для уменьшенного на 20 % $d_{\text{ддд}}^{\text{д.д.}}$. 1 – предел текучести $\sigma_0^{\text{max}}(\tau)$; 2 – эквивалентное напряжение $\sigma_e^{\text{max}}(\tau)$ для $d_{\text{ддд}}^{\text{д.д.}} = 0,112$ см (-20 %); 3 – эквивалентное напряжение $\sigma_e^{\text{max}}(\tau)$ для $d_{\text{ддд}}^{\text{д.д.}} = 0,168$ см (+20 %)

В результате анализа данных, представленных на рисунке 3.11, можно сделать вывод, что, поскольку при эксплуатации оболочки по комбинированному режиму (5 сут. – (100 % + 75 %), 2 сут. – 50 %) на каждые 7 суток приходится 6 маневрирований, то количество маневрирований мощностью, которое выдержала оболочка до потери устойчивости в момент $\tau_0 = 2074$ эф. сут. (для случая $d_{\text{ддд}}^{\text{д.д.}} = 0,112$ см), определяется как $2074 \cdot 6/7 \approx 1778$, что соответствует оценочным данным [71] для оболочки твэла реактора типа PWR (около 2000 маневрирований мощностью).

На рисунке 3.11 видно, что условие потери устойчивости для случая, когда $d_{\text{ддд}}^{\text{д.д.}}$ увеличен на 20 % по сравнению с проектным значением, в момент времени $N = 2074$ эф. сут. не выполняется.

Получив для уменьшенной на 20 % величины $d_{\text{ддд}}^{\text{д.д.}}$ значение $\tau_0 = 2074$ эф. сут., соответствующая величина $A_0 = 25,5$ МДж/м³ определяется на основе зависимости $A(N)$ (рис. 3.12).

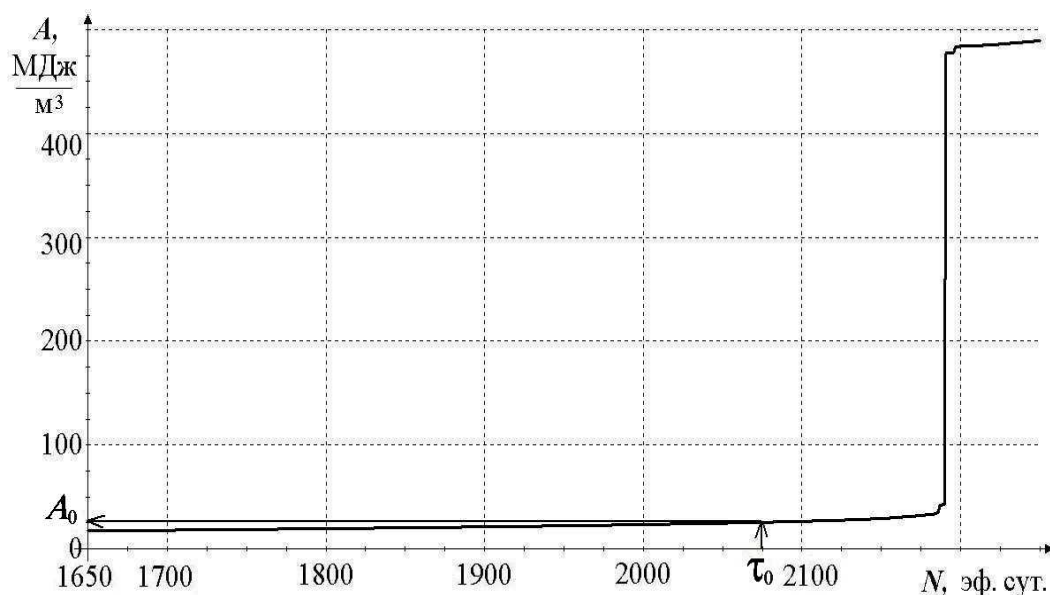


Рис. 3.12. Определение величины A_0 для уменьшенного на 20 % $d_{\dot{\sigma}\dot{\sigma}}$.

На рисунке 3.12 видно, что после достижения расчетного момента потери устойчивости материала оболочки τ_0 проходит примерно 110 эф. сут. до начала катастрофического роста (более чем в 18 раз в течение 3–4 эф. сут.) удельной энергии рассеяния.

Определив для конкретного набора режимных параметров АКЗ и конструктивных параметров ТВС величину удельной энергии рассеяния A_0 в момент потери устойчивости материала оболочки, с помощью выражения

$$\omega(\tau) = \frac{A(\tau)}{A_0}$$

число маневров, может быть определена величина параметра поврежденности материала оболочки $\omega(\tau)$.

Таким образом, при использовании метода анализа долговечности оболочки на основе энергетического варианта теории ползучести, объединяющего критерии прочности оболочки SC2, SC4 (очевидно, что остальные прочностные критерии в рамках этого метода также могут учитываться), возможно находить физически обоснованные зависимости долговечности оболочки твэла реактора ВВЭР-1000 в переменном режиме

нагружения от режимных параметров АКЗ и конструкционных характеристик ТВС.

3.3. Сравнение долговечности оболочки твэла РУ ВВЭР-1000 в различных режимах нагружения

В [5] рассматривался режим переменного нагружения, при котором РУ в течение 16 ч работает на 100 % мощности, затем в течение 1 ч реактор переводится на уровень мощности $k \cdot 100 \%$, $k = 1; 0,75; 0,5; 0,25$. Далее РУ работает в течение 6 ч на мощности $k \cdot 100 \%$, после чего возвращается в течение 1 ч на уровень мощности 100 %. Такой режим работы РУ в дальнейшем будет называться суточным режимом нагружения (16 ч — 100 %, 6 ч — $k \cdot 100 \%$). Расчетная величина удельной энергии рассеяния $A(N)$ оболочки средненагруженного твэла реактора ВВЭР-1000 существенно зависит от режима нагружения РУ (рис. 3.13).

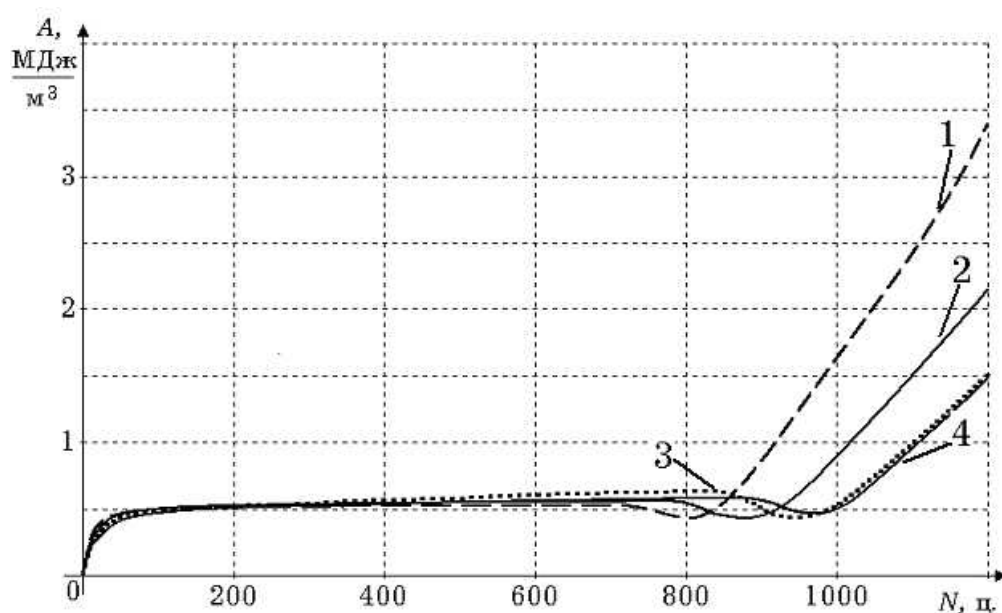


Рис. 3.13. Зависимость удельной энергии рассеяния $A(N)$ от числа суточных маневров мощностью. 1 — стационарная работа на 100 % мощности; 2 — суточный режим: (16 ч — 100 %; 6 ч — 75 %); 3 — суточный режим: (16 ч — 100 %; 6 ч — 50 %); 4 — суточный режим: (16 ч — 100 %; 6 ч — 25 %)

На рисунке 3.13 можно видеть, что удельная энергия рассеяния $A(N)$, МДж/м³ оболочки твэла ВВЭР-1000 существенно различается для разных суточных режимов переменного нагружения (16 ч — 100 %; 6 ч — $k \cdot 100$ %), $k = 1; 0,75; 0,5; 0,25$.

В общем случае явление ползучести проявляется в виде трех характерных стадий [88, 89, 93, 94]: неустановившейся, установившейся и ускоренной ползучести (последняя стадия – стадия предразрушения) (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Характерные стадии ползучести

Кривая	Стадия ползучести циркалоевой оболочки		
	Неустановившаяся ползучесть	Установившаяся ползучесть	Ускоренная ползучесть
1 – 100 %	$A_1(0) - A_1(100)$	$A_1(100) - A_1(702)$	$A_1(702) - A_1(1200)$
2 – 75 %	$A_2(0) - A_2(100)$	$A_2(100) - A_2(760)$	$A_2(760) - A_2(1200)$
3 – 50 %	$A_3(0) - A_3(100)$	$A_3(100) - A_3(820)$	$A_3(820) - A_3(1200)$
4 – 25 %	$A_4(0) - A_4(100)$	$A_4(100) - A_4(860)$	$A_4(860) - A_4(1200)$

Как известно, КИУМ ядерного реактора в течение времени T определяется (без учета времени ремонта) как

$$\hat{\epsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\tau_i \cdot N_i)}{T \cdot N}, \quad (3.34)$$

где $\Delta\tau_i$ — время работы РУ на мощности N_i ; T — суммарное время работы РУ; N — установленная мощность РУ (100 %).

Расчетные величины КИУМ для суточного режима нагружения (16 ч – 100 %; 6 ч – $k \cdot 100$ %), характеризуемого различными величинами параметра k ($k = 1; 0,75; 0,5; 0,25$), существенно различаются (табл. 3.7).

Кроме суточного режима переменного нагружения, для реакторов ВВЭР-1000 необходимо рассматривать в качестве возможного также комбинированный (сочетание дневного и недельного) режим [73].

КИУМ для суточных режимов нагружения (16 ч – 100 %; 6 ч – $k \cdot 100$ %)

k	1	0,75	0,5	0,25
КИУМ	1	0,93	0,85	0,78

С точки зрения эксплуатации РУ, при анализе изменения свойств твэла удобнее использовать понятие так называемых “эффективных” суток, т.е. суток работы РУ на 100 % номинальной мощности. Используя рассчитываемый по (3.34) КИУМ, число суточных маневров $N_{e,0}$ до начала стадии ускоренного роста ползучести в пересчете на эффективные сутки определяется как

$$N_{e,0} = N_0 \cdot \text{КИУМ}, \quad (3.35)$$

где N_0 — число календарных суточных маневров до начала стадии ускоренного роста ползучести.

Эквивалентная деформация ползучести p_e оболочки для всех режимов суточного нагружения, показанных на рисунке 3.13, постепенно увеличивается с течением времени, причем в начале стадии ускоренного роста ползучести для эквивалентного напряжения σ_e наблюдается смена тренда: тенденция уменьшения σ_e сменяется на тенденцию роста (рис. 3.14).

Отмеченная смена тренда σ_e сопровождается характерным кратковременным снижением p_e , названным в работах [5–12, 14, 15] гистерезисным ввиду того, что при смене тренда момент возобновления роста p_e отстает от момента начала роста σ_e (рис. 3.15). Для суточного режима переменного нагружения ВВЭР-1000, при котором РУ эксплуатируется на 100 % мощности в течение 14 ч, далее в течение 1 ч мощность снижается до 80 %, затем в течение 7 ч – эксплуатация РУ на мощности 80 %, далее – повышение мощности РУ до номинальной в течение 2 ч (суточного режима (14 ч – 100 %; 7 ч – 80 %)) момент возобновления роста p_e отстает от момента начала роста σ_e на 32,5 эф. сут. [11, 14].

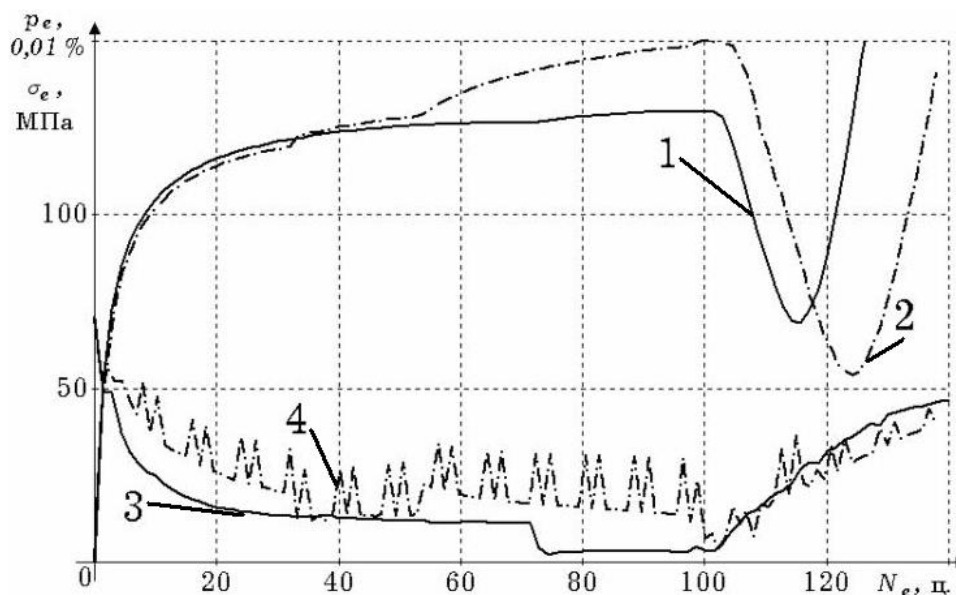


Рис. 3.14. Зависимость эквивалентной деформации ползучести p_e и эквивалентного напряжения σ_e оболочки от числа эффективных недельных маневров N_e : 1, 2 — $p_e(N_e)$ при эксплуатации РУ ВВЭР-1000 на 100 % мощности и в комбинированном режиме, соответственно; 3, 4 — $\sigma_e(N_e)$ при эксплуатации РУ ВВЭР-1000 на 100 % мощности и в комбинированном режиме, соответственно

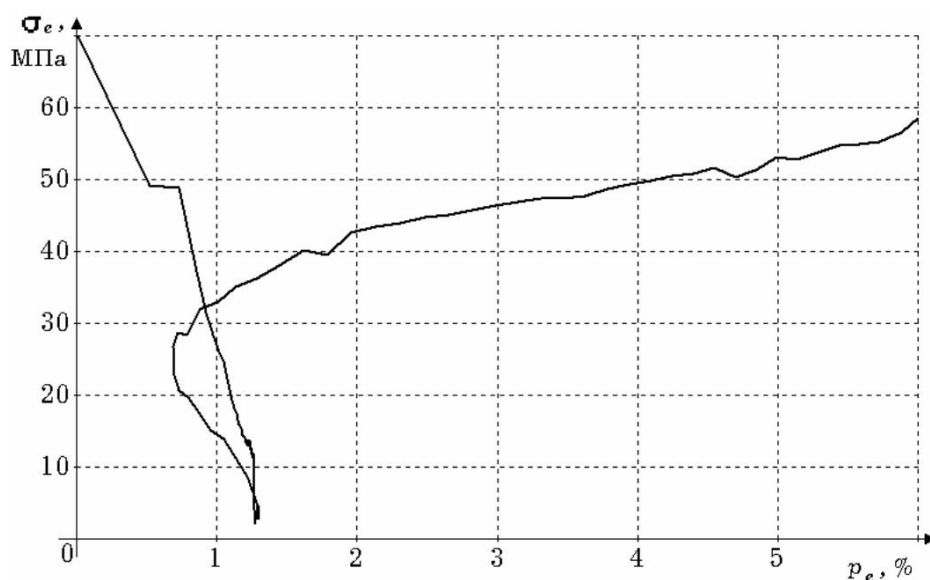


Рис. 3.15. Зависимость эквивалентного напряжения от эквивалентной деформации ползучести $\sigma_e(p_e)$ для оболочки твэла ВВЭР-1000, эксплуатация РУ ВВЭР-1000 на 100 % мощности

После отмеченного гистерезисного снижения p_e происходит быстрый рост эквивалентной деформации ползучести с достижением больших значений с точки зрения надежности твэла (табл. 3.8). Коэффициент использования установленной мощности КИУМ, накопленная удельная энергия рассеяния перед наступлением стадии ускоренной ползучести A_0 , числа N_0 и $N_{e,0}$ для кривых (1) — (4) приведены также в таблице 3.8.

Таблица 3.8

**Характеристики суточных режимов нагружения
(16 ч – 100 %; 6 ч – $k \cdot 100$ %)**

k	$p_e, \%$ (1200 сут. маневров)	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	707
0,50	3,25	0,85	0,639	820	697
0,25	2,84	0,78	0,585	860	671

Время эксплуатации до момента начала ускоренной ползучести материала оболочки твэла (здесь и далее рассматривался, если не оговорено иначе, максимально нагруженный аксиальный сегмент с линейной плотностью теплового потока 248 Вт/см) для различных режимов нагружения реактора типа ВВЭР-1000 существенно различается (табл. 3.9) [73].

В работе [15], используя критерий (2.3), для постоянного и комбинированного режимов нагружения ВВЭР-1000 выполнена количественная оценка величины параметра поврежденности $\omega(\tau)$ материала оболочки твэла после 1576 эф. сут. непрерывной работы (табл. 3.10).

Там же для различных величин максимальной линейной плотности теплового потока в твэле приведены значения времени потери устойчивости τ_0 , количества маневров, которое выдержала оболочка до момента потери устойчивости $N_{ц}$, и энергии рассеяния A_0 (задавались проектные конструктивные данные ТВС-А – см. таблицы 2.5, 2.6).

Таблица 3.9

**Время эксплуатации до момента начала ускоренной ползучести
материала оболочки твэла**

Параметр	Режим нагружения ЯР			
	Стац. работа ЯР на 100 % мощности	Нед. режим (5 сут. – 100 %, 46 ч. – 50 %)	Сут. режим (16 ч. – 100 %, 6 ч. – 75 %)	Комб. режим (5 сут. – 100 % + 75 %; 2 сут. – 50 %)
КИУМ	1	0,860	0,927	0,805
N_0 , нед.	100,0	117,0	109,9	127,1
$N_{e,0}$, эф. нед.	100,0	100,6	101,9	102,3

Таблица 3.10

**Параметр поврежденности ω (1576 эф. сут) для постоянного и
переменного режимов нагружения ВВЭР-1000**

Максимальная линейная плотность теплового потока в твэле, Вт/см		248	258	263	273	298
Средняя плотность потока быстрых нейтронов, $10^{14}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$		1,00	1,04	1,06	1,10	1,20
Постоянный режим нагружения	τ_0 , эф. сут.	2211	2078	2016	1904	1631
	A_0 , МДж/м ³	33,37	35,66	36,87	39,74	47,64
	ω (1576 эф. сут), %	60	65	68	74	94
Комбинированный режим нагружения	τ_0 , эф. сут.	2246	2102	2032	1903	1576
	$N_{ц}$	1925	1802	1742	1631	1351
	A_0 , МДж/м ³	27,36	29,14	30,05	32,10	37,69
	ω (1576 эф. сут), %	57	64	67	74	100

На основании данных таблицы 3.10 можно сделать вывод, что число маневров по комбинированному режиму, которое выдерживает оболочка твэла реактора ВВЭР-1000 до момента потери устойчивости, при увеличении

$q_{l,max}$ с 248 Вт/см до 298 Вт/см (на 20 %) уменьшается с 1925 до 1351 (на 30 %).

Согласно результатам расчетной оценки величины параметра поврежденности ω материала оболочки после 1576 эф. сут. непрерывной работы ВВЭР-1000, выполненной по предлагаемому методу, работа в переменном режиме нагружения предпочтительна по сравнению с непрерывной работой в базовом стационарном режиме при величине линейной плотности теплового потока в центральном аксиальном сегменте твэла $q_{l,max} \leq 273$ Вт/см (см. таблицу 3.10). При $q_{l,max} > 273$ Вт/см работа реактора в базовом стационарном режиме предпочтительна по сравнению с работой в переменном режиме нагружения (принимая в качестве критерия только долговечность оболочки).

Можно сделать вывод, что метод оценки долговечности оболочки на основе энергетического варианта теории ползучести позволяет для постоянного и переменного режимов нагружения ВВЭР-1000 выполнить количественную оценку накопленной величины параметра поврежденности $\omega(\tau)$ материала оболочки с учетом реальной истории нагружения РУ и выделить диапазоны режимных параметров, в которых эксплуатация РУ предпочтительна с точки зрения долговечности оболочки .

3.4. Исследование параметрической чувствительности разработанной математической модели

В работе [9] выполнен анализ параметрической чувствительности математической модели, разработанной для оценки по методу [74] долговечности оболочки в режиме переменного нагружения. Относительная разница $\Delta A_i(N)$ между удельной энергией рассеяния $A_i(N)$ для набора конструкционных и режимных 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 числа эффективных суток N и

величины отклонения ΔX_i i -го варьируемого параметра, определяется выражением:

$$\Delta A_i(N) = \frac{A_i(N) - A_0(N)}{A_0(N)}. \quad (3.36)$$

В табл. 3.11–3.13 приведены значения $\Delta A_i(N)$ при варьировании ΔX_i (остальные параметры при этом фиксированы) после непрерывной работы по описанному комбинированному переменному режиму нагружения в течение $n \times 250$ эф. сут., где $n = 1, 2, \dots, 9$.

Выполненные расчеты показали, 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. 3.11).

Таблица 3.11

**Относительная разница $\Delta A_i(N)$, % при варьировании параметров
1-й группы**

N , эф. сут		250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250
$\Delta(T_{PL} - T_{ТН}) \equiv \Delta X_1$, %	+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
$\Delta R_{GR} \equiv \Delta X_2$, %	+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
$\Delta U_{235} \equiv \Delta X_3$, %	+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
$\Delta V_{PL} \equiv \Delta X_4$, %	+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 (3.36) 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) $\Delta(T_{PL} - T_{т/н}) \equiv \Delta X_1 = +20\%$ соответствует следующая относительная разница между значениями удельной энергии рассеяния $\Delta A_1(N)$: $\Delta A_1(250) = -0,01\%$; $\Delta A_1(500) = +0,25\%$; и так далее (см. таблицу 3.11);

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 $-0,06\%$ (см. таблицу 3.11).

Таким образом, 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. 3.12).

В таблице 3.12: $a \equiv X_5$ – 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 двуоксида урана; $P_{m/н}^{6x} \equiv X_9$ – давление т/н на входе в реактор; $w_{m/н} \equiv X_{10}$ – скорость т/н; $\delta \equiv X_{11}$ – шаг твэлов; $d_{\delta\delta\delta}^{\delta.\delta} \equiv X_{12}$ – диаметр центрального отверстия таблетки.

Следует отметить, что относительная разница $\Delta A_{12}(2250) = 1681\%$, соответствующая варьированию диаметра центрального отверстия таблетки $\Delta d_{\delta\delta\delta}^{\delta.\delta} \equiv \Delta X_{12} = -20\%$ (см. таблицу 3.12), относится к моменту времени $\tau \gg \tau_0 = 2074$ эф. сут.

**Относительная разница $\Delta A_i(N)$, % 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
$\Delta d_{\text{d}\hat{\text{a}}\hat{\text{a}}}^{\hat{\text{t}}\hat{\text{t}}} \equiv$ 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	1681

К 3-й группе относятся параметры, неопределенность в задании которых сильно влияет на результат оценки долговечности оболочки (табл. 3.13).

В таблице 3.13: $d_{\hat{\text{a}}\hat{\text{a}}}^{\hat{\text{t}}\hat{\text{t}}} \equiv X_{13}$ — наружный диаметр оболочки; $d_{\text{d}\hat{\text{a}}\hat{\text{a}}} \equiv X_{14}$ — диаметр таблетки; $q_l^{\text{max}} \equiv X_{15}$ — максимальная линейная удельная плотность энерговыделения; $T_{\text{d}\hat{\text{t}}\hat{\text{t}}}^{\hat{\text{a}}\hat{\text{a}}} \equiv X_{16}$ — температура т/н на входе в реактор.

Влияние неопределенности в задании параметров 1-й группы на величины τ_0 и A_0 для твэла ВВЭР-1000 показано в табл. 3.14. Задавались конструкционные характеристики ТВС-А (см. таблицу 2.5).

**Относительная разница $\Delta A_i(N)$, % при варьировании
параметров 3-й группы**

N , эф. сут		250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250
$\Delta d_{06}^H \equiv$ 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
$\Delta d_{таб} \equiv$ 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
$\Delta q_l^{max} \equiv$ 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
$\Delta T_{т/н}^{вх} \equiv$ 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

Таблица 3.14

**Чувствительность τ_0 и A_0 для ТВЭЛ ВВЭР-1000 к неопределенности в
задании параметров 1-й группы**

Параметр исходных данных	Численная величина	τ_0 , эф. сут	A_0 , МДж/м ³
Разница температур газа верхнего КО и т/н ($T_{PL} - T_{т/н}$), °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 U_{235}	0,044 (баз.)	2246	27,36
	0,053 (+20 %)	2243	27,25
	0,035 (-20 %)	2247	27,46
Верхний КО ТВЭЛ V_{PL} , см ³	0,21 (баз.)	2246	27,36
	0,25 (+20 %)	2247	27,37
	0,17 (-20 %)	2243	27,31

Влияние неопределенности в задании параметров 2-й группы на величины τ_0 и A_0 для ТВЭЛ ВВЭР-1000 показано в табл. 3.15 (для ТВС-А).

Таблица 3.15

Чувствительность τ_0 и A_0 для ТВЭЛ ВВЭР-1000 к неопределенности в задании параметров 2-й группы

Параметр исходных данных	Численная величина	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 $P_{He,0}$, МПа	2,0 (баз.)	2246	27,36
	2,4 (+20 %)	2201	27,80
	1,6 (-20 %)	> 2250	—
Начальное содержание гелия под оболочкой He_0 , %	100 (баз.)	2246	27,36
	80 (-20 %, доля азота: 20 %)	2223	27,05
Коэффициент теоретической плотности двуокси 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 $P_{т/н}^{вх}$, МПа	15,84 (баз.)	2246	27,36
	16,79 (+6 %)	> 2250	—
	14,89 (-6 %)	2218	27,01
Скорость т/н $w_{т/н}$, 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 $d_{\delta\delta\delta}^{\delta.\delta.}$, см	0,140 (баз.)	2246	27,36
	0,168 (+20 %)	> 2250	—
	0,112 (-20 %)	2074	25,52
	0,136 (-3 %)	2215	26,98

Влияние неопределенности в задании параметров 3-й группы на величины τ_0 и A_0 для средненагруженного твэла ВВЭР-1000 показано в табл. 3.16 (для ТВС-А).

Таблица 3.16

Чувствительность τ_0 и A_0 для твэла ВВЭР-1000 к неопределенности в задании параметров 3-й группы

Параметр исходных данных	Численная величина	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.), сред. плотность потока быстр. 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 т/н на входе в реактор $T_{т/н}^{вх}$, °С	290 (баз.)	2246	27,36
	307 (+6 %)	2136	33,05
	281 (–3 %)	> 2250	—
	299 (+3 %)	2190	30,37

Анализируя расчетные данные, приведенные в таблицах 3.14–3.16, можно сделать вывод, что основные режимные параметры АКЗ и конструктивные параметры твэла ВВЭР-1000, по степени чувствительности оценки эксплуатационного ресурса оболочки в режиме переменных нагрузок, определяемого в соответствии с выражением (2.3), к неопределенности в их задании, могут быть условно разделены на 3 группы.

К группе несущественно влияющих исходных данных, интервал задания

каждого из которых величиной 20 % приводит к изменению оценки времени потери устойчивости τ_0 не более 0,1 %, относятся разница между температурами газа верхнего компенсационного объема и теплоносителя; начальный размер зерна таблетки; обогащение топлива по U-235; величина верхнего компенсационного объема твэла.

К группе слабо влияющих исходных данных, интервал задания каждого из которых величиной 3 % приводит к изменению оценки времени потери устойчивости τ_0 не более 2 %, относятся толщина оболочки, начальное давление гелия под оболочкой, начальное содержание гелия в газовой смеси под оболочкой, эффективная плотность двуокиси урана, давление теплоносителя на входе в ЯР, скорость теплоносителя, шаг твэлов, диаметр центрального отверстия таблетки.

К группе сильно влияющих исходных данных, интервал задания каждого из которых величиной 3 % приводит к изменению оценки τ_0 более 2 %, относятся наружный диаметр оболочки твэла; диаметр таблетки; максимальная линейная мощность; температура теплоносителя на входе в ЯР.

3.5. Сравнение долговечности оболочек твэлов топлива различных производителей для комбинированного режима переменного нагружения РУ ВВЭР-1000

В работе [10] выполнено сравнение долговечности оболочки средненагруженного твэла различных типов ТВС в условиях АКЗ реактора ВВЭР-1000, работающего в переменном режиме нагружения, при следующих допущениях:

- при сравнении долговечности оболочек твэлов УТВС, ТВС-А и ТВС-В принималось во внимание различие в конструктивных характеристиках твэлов (наличие центрального отверстия в таблетке, диаметр таблетки и т.д.);
- режимные характеристики ВВЭР-1000, принятые в качестве исходных данных, задавались для всех типов ТВС одинаковыми, в соответствии с [80] –

см. таблицу 2.7;

– свойства материалов оболочки и топлива задавались в соответствии с [95].

Используя консервативную оценку, чтобы сравнить долговечность оболочек твэлов указанных типов ТВС при эксплуатации РУ по режиму переменного нагружения (5 сут. — (100 % + 75 %), 2 сут. — 50 %), достаточно ограничиться вычислением относительной удельной энергии рассеяния A материала оболочки средненагруженного твэла каждого типа ТВС для максимально нагруженного (центрального) аксиального сегмента, для истории нагружения РУ, соответствующей данному переменному режиму (рис. 3.16).

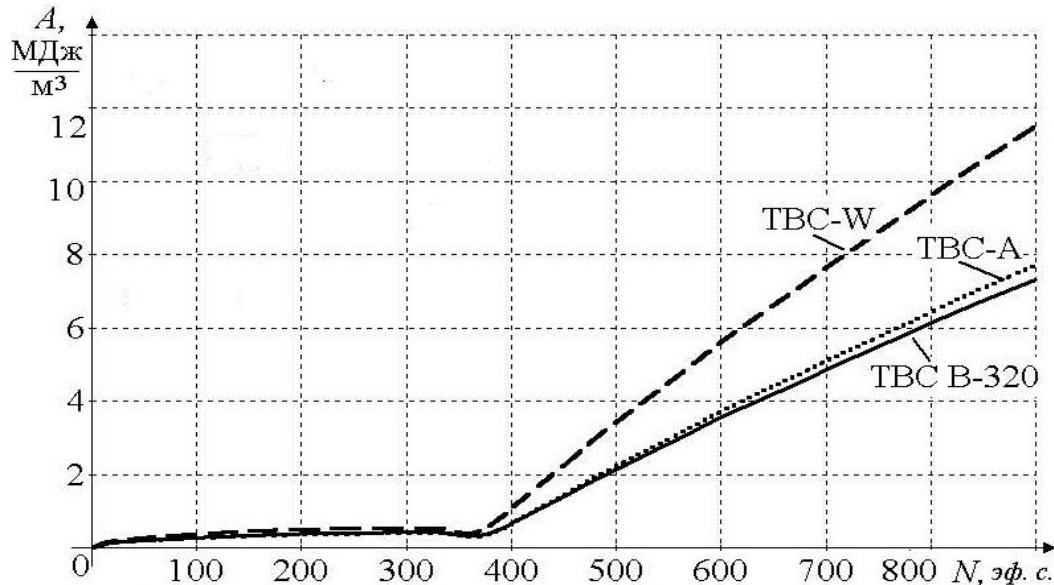


Рис. 3.16. Изменение удельной энергии рассеяния материала оболочки для УТВС (ТВС В-320), ТВС-А, ТВС-В в зависимости от числа эф. сут. при работе РУ в комбинированном режиме нагружения

В рамках принятых допущений получено, что для оболочки твэла ТВС-В достигается наибольшая (среди трех рассматриваемых вариантов ТВС) величина удельной энергии рассеяния при работе как в базовом, так и в переменном режиме нагружения (см. рисунок 3.16) [10].

Используя величины удельной энергии рассеяния $A_B(900)=16,03$ МДж/м³ и $A_{П}(900)=11,51$ МДж/м³, достигнутые после непрерывной работы ТВС-В в

течение 900 эф. сут. (771 маневр для режима комбинированного нагружения) соответственно в базовом и переменном режимах нагружения, качественная сравнительная оценка долговечности оболочки твэла указанных типов ТВС выполнена путем расчета для ТВС i -го типа величины относительной удельной энергии рассеяния: $A_i(900)/A_B(900)$ — в базовом и $A_i(900)/A_{П}(900)$ — в переменном режиме нагружения соответственно (табл. 3.17).

Таблица 3.17

Относительная удельная энергия рассеяния материала оболочки после 900 эф. сут. работы для УТВС, ТВС-А, ТВС-В

Режим нагружения	Базовый (100 %)			(5 сут. – (100 % + 75 %), 2 сут. – 50 %)		
	УТВС	ТВС-А	ТВС-В	УТВС	ТВС-А	ТВС-В
Тип ТВС	УТВС	ТВС-А	ТВС-В	УТВС	ТВС-А	ТВС-В
Глубина выгорания ядерного топлива, МВт·эф.сут/кг	63,83	59,45	56,88	63,95	59,56	57,00
Эквивалентная деформация ползучести оболочки, %	10,06	10,32	12,52	7,648	7,862	9,402
Удельная энергия рассеяния материала оболочки, МДж/м ³	9,933	10,42	16,03	7,313	7,721	11,51
Относительная удельная энергия рассеяния, %	62,0	65,0	100	63,5	67,1	100

Анализируя данные таблицы 3.17 можно сделать вывод, что в условиях АКЗ ВВЭР-1000 эксплуатационный ресурс оболочки твэла ТВС-А меньше, чем у оболочки твэла УТВС, как в стационарном, так и в переменном режиме нагружения. Поскольку конструктивно твэлы указанных ТВС отличаются только величиной диаметра центрального отверстия таблетки (0,24 см – для УТВС и 0,14 см – для ТВС-А), то можно сделать вывод, что увеличение диаметра центрального отверстия таблетки (при прочих равных условиях) приводит к повышению долговечности оболочки твэла в переменном режиме нагружения. Этот же вывод следует из вида зависимостей, приведенных на

рисунках 3.10, 3.11.

В условиях АКЗ ВВЭР-1000 эксплуатационный ресурс оболочки твэла ТВС-W наихудший по сравнению с УТВС, ТВС-А как в стационарном, так и в переменном режимах нагружения. Например, после 771 маневра комбинированного нагружения эквивалентная деформация ползучести оболочки для УТВС, ТВС-А, ТВС-W составила 7,65 %, 7,86 %, 9,40 %, соответственно (см. таблицу 3.17).

Поскольку долговечность оболочки твэла не описывает все аспекты безопасности, надежности и экономичности эксплуатации РУ в переменном режиме, используя комплексный показатель эффективности эксплуатации РУ в переменном режиме, учитывающий системные свойства РУ, необходимо обосновать метод регулирования мощности, обеспечивающий максимальную эффективность эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 в этом режиме.

Исследование параметрической чувствительности данных, определяющих условия разрушения оболочки, позволило создать научно обоснованные предпосылки для обоснования компромиссно-комбинированного метода регулирования мощности РУ.

3.6. Выводы по третьему разделу

1. Метод анализа долговечности оболочки твэла реактора ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения на основе энергетического варианта теории ползучести, обобщающий критерии прочности оболочки SC2, SC4, позволяет получать физически обоснованные зависимости долговечности оболочки от режимных параметров АКЗ и конструктивных характеристик ТВС.

2. Для описания скорости ползучести и коррозии сплава Э-110 при эксплуатации ВВЭР-1000 в переменном режиме возможно использовать аналогичные данные для циркониевого сплава циркалой-4 модели MATPRO, поскольку соотношения данной модели не только пригодны во всем

диапазоне режимных параметров ВВЭР-1000, но и дают консервативную оценку по сравнению с известными данными для сплава Э-110.

3. При эксплуатации ВВЭР-1000 в переменном режиме, после достижения расчетного момента потери устойчивости материала оболочки твэла, до начала катастрофического роста удельной энергии рассеяния оболочки (более чем в 18 раз в течение 3–4 эф. сут.) проходит около 110 эф. сут.

4. Эквивалентная деформация ползучести оболочки для всех режимов переменного нагружения ВВЭР-1000 постепенно увеличивается с течением времени, при этом в начале стадии ускоренного роста ползучести тенденция уменьшения эквивалентного напряжения в оболочке сменяется на тенденцию его роста.

5. Смена тенденции изменения эквивалентного напряжения в оболочке ВВЭР-1000 в начале стадии ускоренного роста ползучести сопровождается кратковременным снижением эквивалентной деформации ползучести оболочки, при этом момент возобновления роста эквивалентной деформации ползучести отстает от момента начала роста эквивалентного напряжения на 32,5 эф. сут. (оценка выполнялась для суточного режима (14 ч – 100 %; 7 ч – 80 %)).

6. После окончания стадии гистерезисного снижения эквивалентной деформации ползучести оболочки ВВЭР-1000 происходит ее ускоренный рост с достижением величин, значительно превышающих 2 %. При эксплуатации РУ по комбинированному режиму нагружения (5 сут. – (100 % + 75 %), 2 сут. – 50 %), после 900 эф. сут. непрерывной работы расчетная эквивалентная деформация ползучести оболочки ТВС-А составила 7,86 %.

7. На основе предлагаемой математической модели в области режимных параметров ВВЭР-1000 возможно выделить диапазоны, в которых РУ может эксплуатироваться в переменном режиме без снижения долговечности оболочки по сравнению с базовым режимом. В частности, при величине

линейной мощности в центральном аксиальном сегменте твэла $q_{l,max} \leq 273$ Вт/см, эксплуатация РУ в комбинированном переменном режиме нагружения, как минимум, не приводит к снижению долговечности оболочки по сравнению с непрерывной работой в базовом режиме.

8. Основные режимные параметры АКЗ и конструктивные параметры твэла ВВЭР-1000, по степени чувствительности оценки долговечности оболочки в режиме переменных нагрузок к неопределенности в их задании, могут быть условно разделены на следующие три группы.

К группе несущественно влияющих исходных данных, интервал задания каждого из которых величиной 20 % приводит к изменению оценки времени потери устойчивости τ_0 не более 0,1 %, относятся разница между температурами газа верхнего компенсационного объема и теплоносителя; начальный размер зерна таблетки; обогащение топлива по U-235; величина верхнего компенсационного объема твэла.

К группе слабо влияющих исходных данных, интервал задания каждого из которых величиной 3 % приводит к изменению оценки времени потери устойчивости τ_0 не более 2 %, относятся толщина оболочки, начальное давление гелия под оболочкой, начальное содержание гелия в газовой смеси под оболочкой, эффективная плотность двуокиси урана, давление теплоносителя на входе в ЯР, скорость теплоносителя, шаг твэлов, диаметр центрального отверстия таблетки.

К группе сильно влияющих исходных данных, интервал задания каждого из которых величиной 3 % приводит к изменению оценки τ_0 более 2 %, относятся наружный диаметр оболочки твэла; диаметр таблетки; максимальная линейная мощность; температура теплоносителя на входе в ЯР.

Увеличение диаметра центрального отверстия таблетки ТВС-А с $d_{\text{о\ddot{a}a}}^{\text{о.и.}} = 0,112$ см до $d_{\text{о\ddot{a}a}}^{\text{о.и.}} = 0,140$ см (на 20 %), при этом $q_{l,max} = 248$ Вт/см, увеличивает количество маневров комбинированного нагружения, которое выдерживает оболочка до потери устойчивости, с 1778 до 1925 (на 8,3 %).

Число маневров комбинированного нагружения, которое выдерживает

оболочка твэла реактора ВВЭР-1000 до момента потери устойчивости, при увеличении $q_{l,max}$ с 248 Вт/см до 298 Вт/см (на 20 %) уменьшается с 1925 до 1351 (на 30 %).

При увеличении входной температуры теплоносителя на 3 % (с 290 °С до 299 °С), при этом $q_{l,max} = 248$ Вт/см, число маневров комбинированного нагружения, которое выдерживает оболочка твэла реактора ВВЭР-1000 до момента потери устойчивости, уменьшается с 1925 до 1877 (на 2,5 %). При уменьшении входной температуры теплоносителя на 3 % (с 290 °С до 281 °С), $q_{l,max} = 248$ Вт/см, момент потери устойчивости материала оболочки не был достигнут до 1925 маневров комбинированного нагружения (2246 эф. сут.) включительно (для большего количества маневров комбинированного нагружения анализ не проводился).

9. В результате сравнительного анализа долговечности оболочки твэла УТВС, ТВС-А и ТВС-В в условиях АКЗ ВВЭР-1000 (при $q_{l,max} = 248$ Вт/см) получено, что в переменном режиме нагружения долговечность оболочки ТВС-В наименьшая, а УТВС – наибольшая. После 771 маневра комбинированного нагружения эквивалентная деформация ползучести оболочки для УТВС, ТВС-А и ТВС-В составила 7,65 %, 7,86 % и 9,40 % соответственно.

10. Для обеспечения максимальной эффективности эксплуатации РУ ВВЭР-1000 в переменном режиме необходимо разработать метод регулирования мощности РУ и комплексный показатель эффективности эксплуатации в переменном режиме, учитывающий системные свойства РУ.

РАЗДЕЛ 4

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИМЕНЕНИЯ КОМПРОМИССНО-КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ РУ ВВЭР-1000 (В-320)

4.1. Комплексный показатель эффективности эксплуатации РУ ВВЭР-1000 в переменном режиме

Комплексный подход к построению показателя эффективности эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 в переменном режиме подразумевает необходимость учета того факта, что РУ представляет собой сложную систему, состоящую из элементов, взаимосвязанных физически, динамически и функционально.

При обосновании возможности эксплуатации ядерных энергоблоков с ВВЭР-1000 НАЭК “Энергоатом” в режиме переменных нагрузок необходимо учитывать следующие факторы [4]:

- оборудование РУ и применяемое оборудование системы продувки-подпитки допускает возможность их использования в маневренных блоках;
- оборудование первого контура рассчитано на возможность эксплуатации АЭС в полупиковом режиме регулирования частоты и мощности в энергосистеме. За срок службы РУ допускается 5600 наборов и 5000 снижений нагрузки (с регламентной скоростью);
- регулировочный диапазон нагрузки находится в пределах 30–100 % от номинальной мощности, время работы на любом уровне мощности в пределах этого диапазона не ограничивается;
- допускается 10000 циклов полного изменения (набора и снижения нагрузки) в пределах регулировочного диапазона;

– при обосновании возможности эксплуатации ядерных энергоблоков с ВВЭР-1000 в переменном режиме одной из ключевых задач является оценка времени целостности (в заданных критериях) оболочки твэла при многократных изменениях мощности реакторной установки (РУ) [5–15].

Метод анализа долговечности оболочки твэла реактора ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения на основе энергетического варианта теории ползучести, использующий совместно известные критерии прочности оболочки SC2, SC4, позволяет получать физически обоснованные зависимости долговечности оболочки от режимных параметров АКЗ и конструкционных характеристик ТВС (см. разделы 2–3).

Поскольку долговечность оболочки твэла не описывает все аспекты безопасности, надежности и экономичности эксплуатации РУ в переменном режиме, то для обеспечения максимальной эффективности эксплуатации РУ в этом режиме необходимо разработать комплексный показатель эффективности алгоритма маневрирования мощностью РУ, учитывающий системные свойства РУ [12]. Комплексный подход к построению показателя эффективности алгоритма маневрирования мощностью РУ с ВВЭР-1000 подразумевает необходимость учета того, что РУ является сложной системой, состоящей из элементов, взаимосвязанных физически, динамически и функционально.

Состояние РУ как системы характеризуется:

- составом, свойствами и состоянием ее отдельных элементов;
- структурой системы, то есть динамическими и функциональными связями между отдельными элементами системы;
- интегральными технико-экономическими характеристиками системы, описывающими эффективность эксплуатации системы в течение достаточно длительного времени, которые не являются простой суммой каких-либо физических, динамических и функциональных характеристик отдельных элементов, образующих систему.
- надежностью управления системой.

Таким образом, РУ сохраняет свою целостность, безопасность, эффективность и надежность под воздействием различных внешних воздействий и внутренних изменений до тех пор, пока она сохраняет:

- целостность и безопасность ключевых элементов, образующих РУ;
- неизменность своей структуры, то есть стабильность важнейших динамических процессов, определяющих выполнение РУ своих функций;
- высокий уровень интегральных технико-экономических показателей эксплуатации РУ в течение достаточно длительного промежутка времени;
- высокий уровень надежности управления РУ.

В рамках комплексного подхода к построению показателя оценки эффективности алгоритма маневрирования мощностью РУ с ВВЭР-1000 можно выделить следующие уровни анализа РУ как системы [12]:

1-й уровень — параметрический — соответствует рассмотрению РУ на уровне элементов. При анализе эффективности алгоритма маневрирования на уровне элементов системы в первую очередь целесообразно рассматривать степень целостности наиболее важного элемента РУ, которым является оболочка твэла, поскольку она служит первым барьером безопасности (предлагаемый подход позволяет учитывать и другие важные с точки зрения безопасности элементы РУ, например, корпус реактора).

Сохранение целостности оболочки твэла ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения можно анализировать путем оценки величины параметра поврежденности материала оболочки твэла ω [73].

2-й уровень — структурный — соответствует рассмотрению структуры РУ. При анализе эффективности алгоритма маневрирования на уровне структуры системы целесообразно рассматривать стабильность наиболее важных физических процессов в РУ, к числу которых, прежде всего, относится энерговыделение в АКЗ [125]. Для оценки стабильности поля энерговыделения в АКЗ используют величину аксиального офсета (АО), определяющего высотную неравномерность поля энерговыделения АКЗ (возможно учитывать стабильность и других ключевых процессов, например,

циркуляции теплоносителя в первом контуре) [12].

3-й уровень — технико-экономический — соответствует рассмотрению РУ используя технико-экономические показатели эксплуатации РУ, к числу которых, прежде всего, относится КИУМ (возможно учитывать и другие важные технико-экономические характеристики эксплуатации РУ).

4-й уровень — вероятностный — соответствует рассмотрению надежности системы управления РУ. Надежность системы управления РУ в переменном режиме определяется вероятностью безотказной эксплуатации $P_{б/о}$ всех систем управления, включая действия персонала, обеспечивающих маневрирование мощностью РУ.

Составляющие комплексного показателя эффективности метода регулирования мощности РУ ВВЭР-1000 в переменном режиме приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Составляющие комплексного показателя эффективности метода регулирования мощности РУ ВВЭР-1000 в переменном режиме

Уровень анализа	Объект анализа	Показатель
Параметрический	Элемент РУ, наиболее важный с точки зрения надежности и безопасности эксплуатации РУ	Целостность оболочки ТВЭЛА
Структурный	Процесс в АКЗ РУ, наиболее важный с физической точки зрения	Стабильность поля энерговыделения в АКЗ
Технико-экономический	Наиболее важная экономическая характеристика эксплуатации РУ	КИУМ
Вероятностный	Надежность системы управления РУ	Вероятность безотказной эксплуатации всех систем управления, обеспечивающих маневрирование мощностью РУ

Для удобства дальнейшего анализа эффективности алгоритма маневрирования мощностью РУ в переменном режиме целесообразно ввести следующие приведенные параметры для параметра поврежденности материала оболочки, АО, КИУМ, вероятности безотказной эксплуатации всех систем управления, обеспечивающих маневрирование мощностью РУ:

$$\omega^* = |\omega - 1|, \quad (4.1)$$

где ω – параметр поврежденности оболочки (см. п. 2.1.3);

ω^* – приведенный параметр поврежденности оболочки.

$$AO^* = 1 - |\Delta \hat{AO}|, \quad (4.2)$$

где $|\Delta \hat{AO}|$ – амплитуда изменения в ходе маневра аксиального офсета (АО), определяющего высотную неравномерность поля энерговыделения и рассчитываемого как процентное отношение разности мощностей верхней $P_в$ и нижней $P_н$ половин АКЗ к полной мощности АКЗ [14]:

$$AO = \frac{P_в - P_н}{P_в + P_н} \cdot 100 \%. \quad (4.3)$$

\hat{AO}^* – приведенный аксиальный офсет.

$$КИУМ^* = КИУМ \cdot \frac{10}{N_н + 10}, \quad (4.4)$$

где $N_н$ – количество суток простоя РУ, приходящееся на каждые 10 суток эксплуатации ВВЭР-1000 на 100 % мощности;

КИУМ – коэффициент использования установленной мощности РУ без учета времени простоев;

КИУМ* – приведенный КИУМ, учитывающий суммарное время простоев.

$$P_{\hat{a}/i}^* = \prod_{i=1}^M P_{\hat{a}/i}, \quad (4.5)$$

где $P_{\hat{a}/i}$ – интегральная вероятность безотказной работы всех систем управления РУ (с учетом вероятности ошибок персонала), обеспечивающих

маневрирование мощностью в ходе i -го оперативного действия (переключения);

M – необходимое число оперативных действий (переключений) при маневрировании мощностью.

Используя параметры $\{\omega^*; \hat{\Lambda}^*; \hat{E}\hat{O}^*; P_{\hat{a}/i}^*\}$ в качестве компонентов комплексного показателя эффективности алгоритма маневрирования мощностью РУ, точка с координатами $(\omega^* = 1; \hat{\Lambda}^* = 1; \hat{E}\hat{O}^* = 1; P_{\hat{a}/i}^* = 1)$ соответствует предельному наилучшему переменному режиму эксплуатации, а $(\omega^* = 0; \hat{\Lambda}^* = 0; \hat{E}\hat{O}^* = 0; P_{\hat{a}/i}^* = 0)$ – 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 $(\omega_{\min}^*; \hat{\Lambda}_{\min}^*; \hat{E}\hat{O}_{\min}^*; P_{\hat{a}/i, \min}^*)$. Таким образом, допустимые значения компонентов комплексного показателя $\{\omega^*; \hat{\Lambda}^*; \hat{E}\hat{O}^*; P_{\hat{a}/i}^*\}$ при эксплуатации РУ в переменном режиме заключены в следующих диапазонах:

$$\begin{cases} \omega_{\min}^* \leq \omega^* \leq 1; \\ \hat{\Lambda}_{\min}^* \leq \hat{\Lambda}^* \leq 1; \\ \hat{E}\hat{O}_{\min}^* \leq \hat{E}\hat{O}^* \leq 1; \\ P_{\hat{a}/i, \min}^* \leq P_{\hat{a}/i}^* \leq 1. \end{cases} \quad (4.6)$$

Для наглядности область допустимых значений компонентов комплексного показателя $\{\omega^*; \hat{\Lambda}^*; \hat{E}\hat{O}^*; P_{\hat{a}/i}^*\}$ при эксплуатации ВВЭР-1000 в переменном режиме удобно представить без учета компонента $P_{\hat{a}/i}^*$, что соответствует идеальному случаю, когда $P_{\hat{a}/i}^* = 1$ (рис. 4.1) [12].

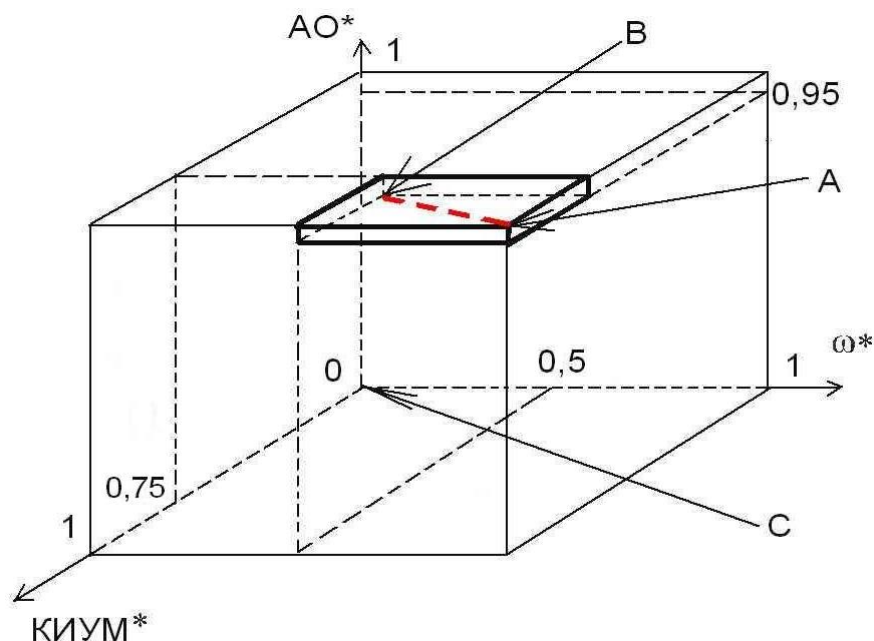


Рис. 4.1. Допустимая область эксплуатации ВВЭР-1000 в переменном режиме в пространстве трех компонентов комплексного показателя $\{\omega^*; \hat{\Delta I}^*; \hat{E} \hat{E} \hat{O} \hat{I}^*; P_{a/l}^*\}$: A – предельный наилучший переменный режим эксплуатации ($\omega^* = 1; \hat{\Delta I}^* = 1; \hat{E} \hat{E} \hat{O} \hat{I}^* = 1$); B – предельный допустимый переменный режим эксплуатации ($\omega_{\min}^*; \hat{\Delta I}_{\min}^*; \hat{E} \hat{E} \hat{O} \hat{I}_{\min}^*$); C – предельный наихудший переменный режим эксплуатации ($\omega^* = 0; \hat{\Delta I}^* = 0; \hat{E} \hat{E} \hat{O} \hat{I}^* = 0$)

На рисунке 4.1 компоненты комплексного показателя ограничены следующими минимально допустимыми значениями:

$$\begin{cases} \omega_{\min}^* = 0,5 (\omega_{\max} = 0,5); \\ \hat{\Delta I}_{\min}^* = 0,95 (|\Delta \hat{\Delta I}| = 5\%); \\ \hat{E} \hat{E} \hat{O} \hat{I}_{\min}^* = 0,75. \end{cases} \quad (4.7)$$

При выполнении требования достаточной малости длины АВ компоненты комплексного показателя достаточно мало отличаются от 1. Очевидно, что влияние величины ω^* на величины $\hat{\Delta I}^*$ и $\hat{E} \hat{E} \hat{O} \hat{I}^*$ возможно только при достаточно малых ω^* (достаточно больших ω). Аналогичным образом, влияние величины $\hat{\Delta I}^*$ на ω^* и $\hat{E} \hat{E} \hat{O} \hat{I}^*$ возможно только при

достаточно малых величинах $\hat{\Lambda}^*$ (достаточно больших $|\Delta AO|$).

Необходимо подчеркнуть, что величины компонентов $(\omega_{\min}^*; \hat{\Lambda}_{\min}^*; \hat{E}\hat{O}\hat{I}_{\min}^*; P_{\hat{a}/\hat{r}, \min}^*)$, определяющие положение точки В, должны определяться обоснованно из условия обеспечения взаимной независимости величин $\{\omega^*; \hat{\Lambda}^*; \hat{E}\hat{O}\hat{I}^*; P_{\hat{a}/\hat{r}}^*\}$ в пределах прямоугольного объема, ограниченного диагональю АВ. Во всех допустимых переменных режимах эксплуатации точка $(\omega_i^*; \hat{\Lambda}_i^*; \hat{E}\hat{O}\hat{I}_i^*; P_{\hat{a}/\hat{r}, i}^*)$ остается в пределах прямоугольного объема с диагональю АВ, при этом при улучшении i -го алгоритма маневрирования эта точка стремится к точке А, а при ухудшении – к точке В (см. рисунок 4.1).

Можно сделать вывод, что мерой эффективности i -го алгоритма является близость точки $(\omega_i^*; \hat{\Lambda}_i^*; \hat{E}\hat{O}\hat{I}_i^*; P_{\hat{a}/\hat{r}, i}^*)$ к точке А, которая определяется количественно следующим образом [12]:

$$Eff_i = 1 - \frac{L_i}{L_{\max}}, \quad (4.8)$$

где

$$L_i = \sqrt{(1 - \hat{E}\hat{O}\hat{I}_i^*)^2 + (1 - \omega_i^*)^2 + (1 - AO_i^*)^2 + (1 - P_{\hat{a}/\hat{r}, i}^*)^2} \quad (4.9)$$

$$L_{\max} = \sqrt{(1 - \hat{E}\hat{O}\hat{I}_{\min}^*)^2 + (1 - \omega_{\min}^*)^2 + (1 - AO_{\min}^*)^2 + (1 - P_{\hat{a}/\hat{r}, \min}^*)^2} \quad (4.10)$$

Таким образом, показатель $\{\omega^*; \hat{\Lambda}^*; \hat{E}\hat{O}\hat{I}^*; P_{\hat{a}/\hat{r}}^*\}$ позволяет численно оценивать эффективность того или иного алгоритма маневрирования мощностью РУ, анализируя состояние РУ на четырех уровнях: параметрическом, структурном, технико-экономическом и вероятностном, что дает возможность одновременно учитывать требования целостности ключевых элементов РУ, стабильности ключевых физических процессов, протекающих в РУ, экономичности и управляемости РУ.

4.2. Модельный эксперимент по выбору метода регулирования мощности РУ ВВЭР-1000/В-320

В настоящее время известны четыре основных метода регулирования мощности энергоблока с ВВЭР, характеризующие значения внутренних технологических параметров в стационарных режимах энергоблока [17]:

1) Метод с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре (№ 1) – см. рис. 4.2а.

Преимущества: наиболее благоприятные условия для работы оборудования первого контура; возможность регулирования реактора за счет температурного эффекта реактивности, минимизируя воздействия на органы регулирования (ОР) системы управления и защиты (СУЗ), что обеспечивает стабильность поля энерговыделения.

Недостатки: повышение давления пара во втором контуре при снижении мощности энергоблока, что требует проектирования парогенераторов и главных паропроводов для работы с давлением, превышающим номинальное.

2) Метод с постоянным давлением пара второго контура (№ 2) – см. рис. 4.2б.

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

Недостатки: ввиду переменной средней температуры теплоносителя в первом контуре 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, что может привести к изменению поля энерговыделения в активной зоне (АКЗ).

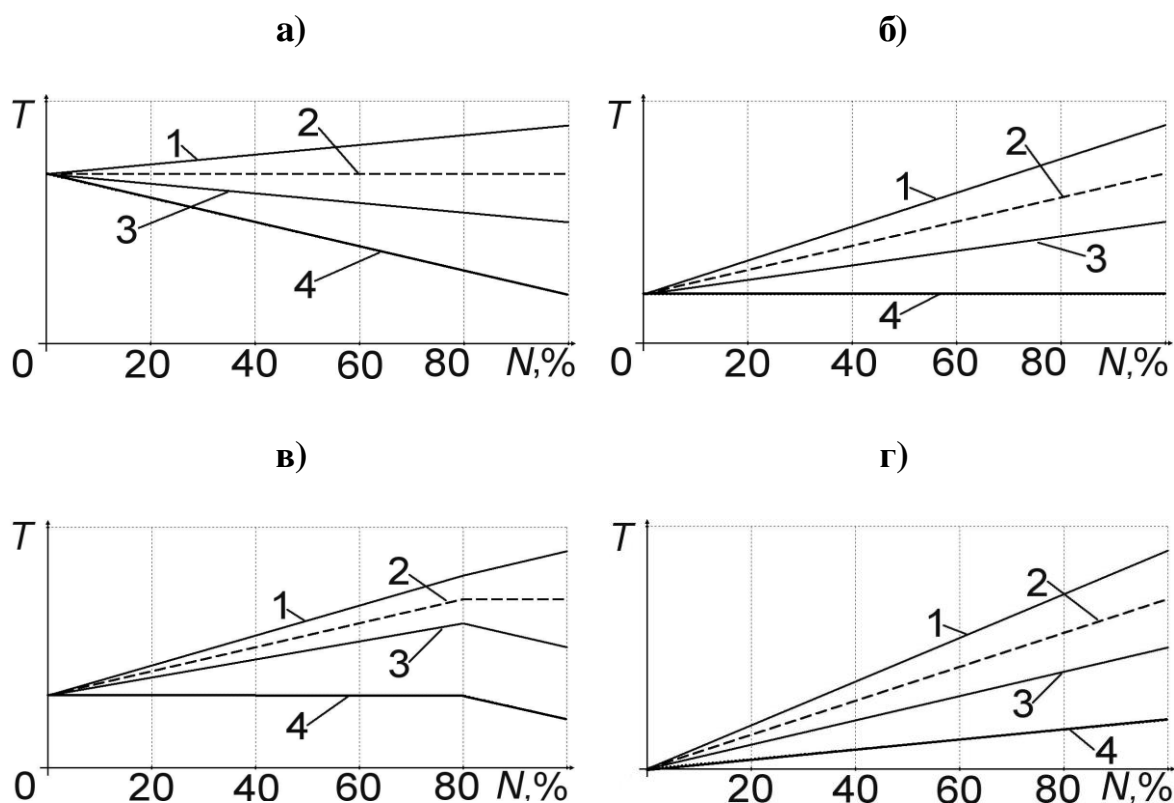


Рис. 4. 2. Характеристики энергоблока ВВЭР-1000 при различных методах регулирования: а – с постоянной средней температурой теплоносителя первого контура (№ 1); б – с постоянным давлением второго контура (№ 2); в – комбинированный метод (№ 3); г – компромиссный метод (№ 4): 1, 2, 3, 4 – $T_1^{\text{ср}}$, $T_1^{\text{сд}}$, $T_1^{\text{сб}}$ и T_2 , соответственно

3) Комбинированный метод с поддержанием постоянного давления второго контура при малых нагрузках и постоянной средней температуры теплоносителя первого контура при больших нагрузках (№ 3) – в диапазоне мощности от 100 % до 80 % блок работает по методу № 1, а при меньшей мощности – используется метод № 2 (рис. 4. 2в).

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: на практике поддержание постоянной средней температуры теплоносителя в первом контуре при маневрировании затруднительно при ограниченности разрешенного диапазона изменения давления в парогенераторе (62–64 бар).

4) Компромиссный метод с умеренным изменением средней температуры теплоносителя в первом контуре и начального давления пара во втором контуре (№ 4) – см. рис. 4. 2г.

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

Недостатки: методу № 4 присущи отмеченные выше недостатки методов № 1 и № 2.

На практике, например на энергоблоках Запорожской АЭС, реализован метод регулирования мощности с постоянным давлением пара во втором контуре (№ 2), т.е. в парогенераторах поддерживается давление 62–64 бар, при этом в главном паровом коллекторе (ГПК) давление 58–60 бар. Характерные значения температуры теплоносителя на входе $t_{вх}$ и выходе $t_{вых}$ АКЗ при изменении мощности ЯР от 100 до 80 % номинальной приведены в табл. 4.2 (разгрузка 5-го блока Запорожской АЭС 23.03.2008 г. по диспетчерской заявке). Давление в ГПК поддерживалось в пределах 58–60 бар (однако, при этом давление после СРК опускалось вплоть до 41,3 бар).

При уменьшении мощности РУ до 80 % в соответствии с методом № 2, входная температура теплоносителя уменьшается на 2 °С по сравнению с номинальным значением (см. таблицу 4.2).

При уменьшении уровня нагрузки турбоустановки (ТУ) энергоблока с ВВЭР-1000 КПД-брутто ТУ существенно уменьшается (табл. 4.3).

Таблица 4.2

Характерные значения температуры теплоносителя при изменении мощности РУ по диспетчерской заявке

Точка	Параметр			
	Входная температура теплоносителя $t_{вх}$, °С	Выходная температура теплоносителя $t_{вых}$, °С	Средняя температура теплоносителя $t_{ср}$, °С	Электрическая мощность энергоблока, % (МВт)
1	286,7	317,2	302,0	99,5 (1014)
2	285,5	313,0	299,3	87,2 (889)
3	284,9	310,2	297,6	78,0 (795)
4	284,8	310,1	297,5	77,8 (793)
5	285,1	310,5	297,8	79,6 (811)
6	286,8	316,5	301,7	100,0 (1019)

Таблица 4.3

Уменьшение КПД-брутто ТУ при уменьшении нагрузки ТУ

Нагрузка ТУ, %	Изменение КПД-брутто ТУ по сравнению с номинальным режимом, %
100 (номинал)	0
90	- 2
80	- 5

Давление пара перед стопорным клапаном принималось неизменным и равным 59 бар.

Несмотря на базовый режим работы, довольно часто возникают случаи снижения нагрузки энергоблоков Запорожской АЭС, вызванные рядом технологических и системных причин: плановые и неплановые ремонты; снижение нагрузки из-за ограничения по пропускной способности ЛЭП и из-за диспетчерских ограничений по отсутствию спроса на электроэнергию (см. таблицу 1.3); снижение нагрузки из-за повышения температуры охлаждающей воды, отклонения давления пара в конденсаторе от номинального значения, перегрева пара в СПП; снижение нагрузки из-за отбора пара на собственные нужды и на теплофикацию.

В 2005 г. на ЗАЭС зарегистрировано более 170 переходных режимов, связанных со снижениями, сбросами нагрузки, остановами и пусками, при этом нагрузка энергоблоков 82 раза снижалась на величину более 10 % номинальной мощности, в том числе 40 раз выполнялись снижения нагрузок на 30 % и полные остановки (планово-предупредительные и внезапные, с последующим пуском из горячего и холодного состояния).

Анализ обнаруженных за это время дефектов на основном тепломеханическом оборудовании не выявил корреляции между качеством дефектов и количеством разгрузок блоков. Было зафиксировано отсутствие снижения герметичности твэлов, что свидетельствует об их устойчивости к переходным процессам и позволяет предполагать возможность эксплуатации реакторов ВВЭР-1000 в переменных режимах нагрузки [22].

В эксплуатационной практике применяются следующие основные способы устойчивого управления реактивностью [126].

1) Введение-выведение твердого поглотителя.

Преимущества: быстроедействие; легкость автоматизации.

Недостатки: введение ОР СУЗ в АКЗ приводит к искривлению поля энерговыделения, что в свою очередь 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.

2) Изменение концентрации поглотителя в теплоносителе контура.

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

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

3) 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.

4) Отравление – разотравление реактора.

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

Недостатки: низкое быстродействие.

Оптимальный алгоритм суточного маневрирования мощностью, а значит и метод регулирования мощности, должен выбираться с учетом изменения КПД ТУ в зависимости от уровня мощности ЯР. Поскольку РУ ВВЭР-1000 проектировалась с учетом требования максимальности КПД ТУ при номинальном уровне мощности РУ (100 %), то в общем случае можно полагать, что существует следующая зависимость между КИУМ и КПД ТУ: чем выше КИУМ, тем выше КПД ТУ.

Кроме того, в п. 3.3 путем расчета накопленной энергии необратимых деформаций ползучести материала оболочки твэла показано, что выбор режима многократных изменений мощности значительно влияет на долговечность оболочки при эксплуатации ВВЭР-1000 в переменном режиме.

Таким образом, задача перевода тепловой мощности АКЗ с одного уровня на другой сводится к разработке метода регулирования мощности, позволяющего достигать максимально возможного КИУМ, контролированно

изменять мощность АКЗ с сохранением стабильности поля энерговыделения, но при этом не допускать разрушения оболочек твэлов.

В работах [8, 14] предложен следующий альтернативный алгоритм суточного маневра мощностью АКЗ (компромиссно-комбинированный метод регулирования мощности). Пусть энергоблок работает на номинальной мощности, ксеноновые колебания подавлены при помощи перемещения регулирующей группы. Первоначальное снижение (до 90 %) мощности реакторной установки (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 аксиальный офсет (АО) как гарантия невозникновения ксеноновых колебаний [125].

В дальнейшем снижение мощности происходит за счет отравления. Оптимальный 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 (рис. 4.3).

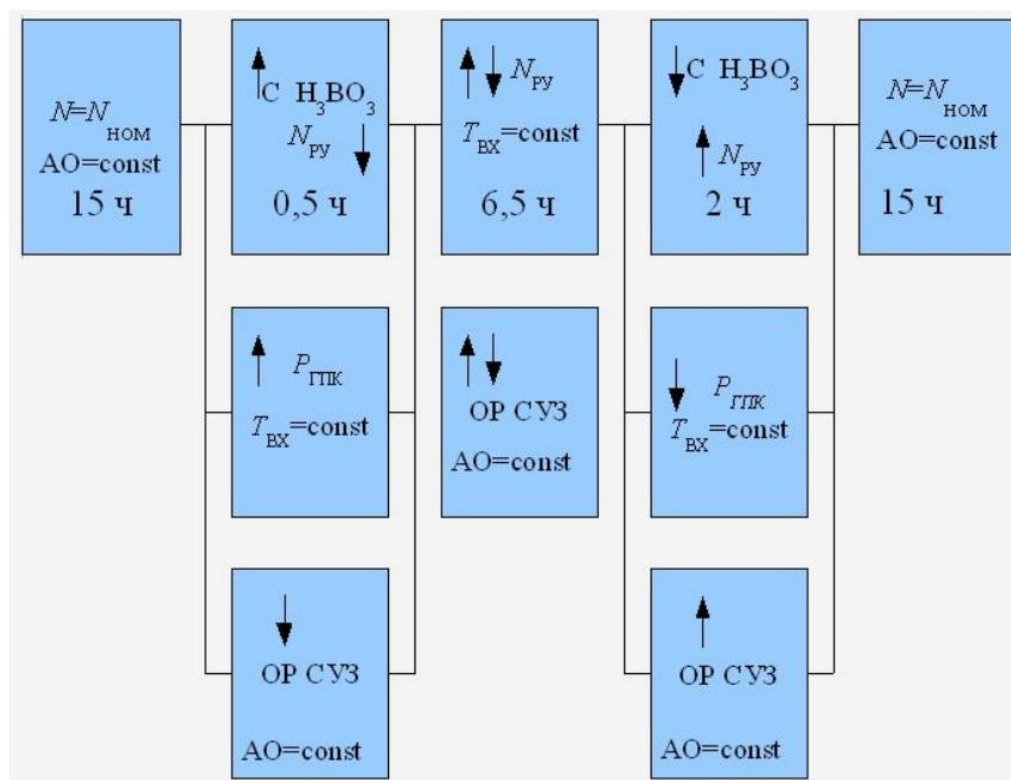


Рис. 4.3. Альтернативный алгоритм суточного маневра мощностью ВВЭР-1000

Таким образом, предлагается компромиссно-комбинированный метод регулирования мощности РУ с ВВЭР-1000, являющийся модификацией известного комбинированного метода регулирования, с умеренным изменением средней температуры первого контура $T_1^{сб}$ и давления во втором контуре p_2 в диапазоне мощности от 100 до 80 % номинальной, тогда как при мощности менее 80 % номинальной используется метод с постоянным p_2 (рис. 4.4).

На рисунке 4.4 пунктиром и сплошной линиями схематически показано изменение параметров при компромиссно-комбинированном и комбинированном методах регулирования, соответственно.

Преимущества предлагаемого метода регулирования: 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.

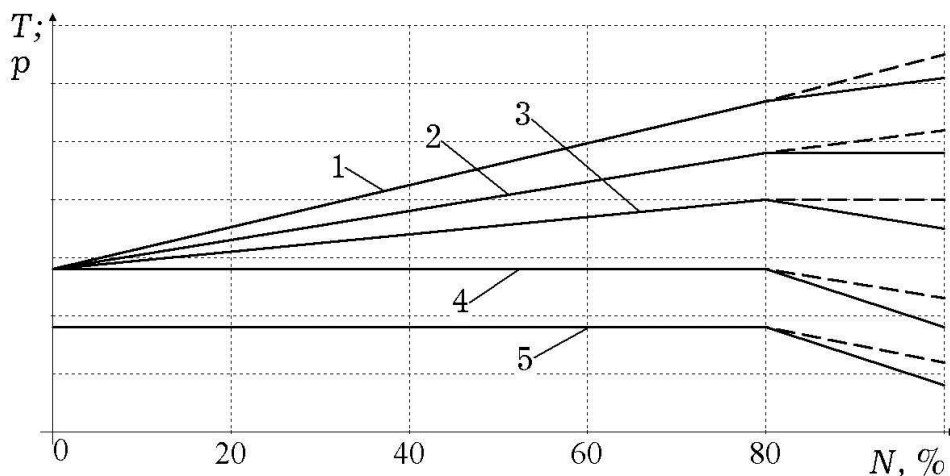


Рис. 4.4. Характеристики энергоблока ВВЭР-1000 при компромиссно-комбинированном и комбинированном методе регулирования мощности: 1, 2, 3 — $T_1^{\text{âüö}}$, $T_1^{\text{cö}}$ и $T_1^{\text{âö}}$, соответственно; 4, 5 — T_2 и p_2 , соответственно

Предлагаемый алгоритм, подразумевающий при суточном маневре мощностью в пределах от 100 до 80 % номинала поддержание постоянной входной температуры теплоносителя $T_1^{\text{âö}}$ при изменении давления пара в ГПК в пределах 58–60 бар, имеет описанные выше преимущества ПР с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре $T_1^{\text{cö}}$. При этом, за счет поддержания давления пара в парогенераторе и ГПК в регламентных пределах, предлагаемый алгоритм лишен описанных выше недостатков, присущих ПР с постоянной $T_1^{\text{cö}}$.

Можно выделить следующие физико-технические предпосылки создания компромиссно-комбинированного метода регулирования:

- частичная реализация регулирования с постоянной средней температурой;
- использование регулирующей группы ОР СУЗ исключительно для поддержания мгновенного АО;
- использование конкурирующих процессов на этапе отравления-

разотравления.

Использование регулирующей группы ОР СУЗ для поддержания мгновенного АО объясняется на рис. 4.5.

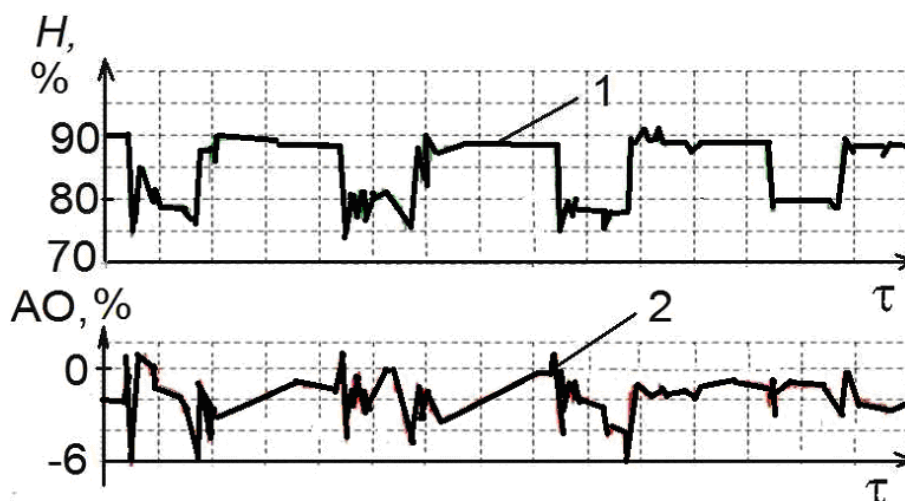


Рис. 4.5. Изменение положения рабочей группы органов СУЗ для поддержания мгновенного АО: 1 – положение H рабочей группы органов СУЗ, % от низа АКЗ; 2 – аксиальный офсет АО, %

Как известно, в реакторе ВВЭР-1000 температурный эффект реактивности проявляется прежде всего через зависимость плотности замедлителя от температуры по следующей цепочке причинно-следственных связей [127]: при повышении температуры воды t_{H_2O} ее плотность γ_{H_2O} и, следовательно, концентрация ядер N_{H_2O} уменьшаются, ухудшается замедляющая способность, ужесточается спектр тепловых нейтронов, уменьшаются сечение деления σ_f и реактивность ρ :

$$t_{H_2O} \uparrow \rightarrow \gamma_{H_2O} \downarrow \rightarrow N_{H_2O} \downarrow \rightarrow \sigma_f \downarrow \rightarrow \rho \downarrow$$

С другой стороны, при изменении мощности ВВЭР-1000 нарушается динамическое равновесие между прибылью и убылью отравителя ксенона-135, а именно: после снижения мощности происходит временное увеличение концентрации ксенона вследствие уменьшения скорости его радиоактивного распада из-за поглощения нейтронов, и соответствующее уменьшение

реактивности $\Delta\rho_{Xe} < 0$. Напротив, после увеличения мощности наблюдается временное уменьшение концентрации ксенона и соответствующее увеличение реактивности $\Delta\rho_{Xe} > 0$ [127].

Изменение поля энерговыделения ВВЭР-1000 (без учета эффективной добавки) на этапе отравления в результате совместного действия температурных эффектов реактивности и переходных процессов на ксеноне при уменьшении мощности РУ схематично изображено на рис. 4.6.

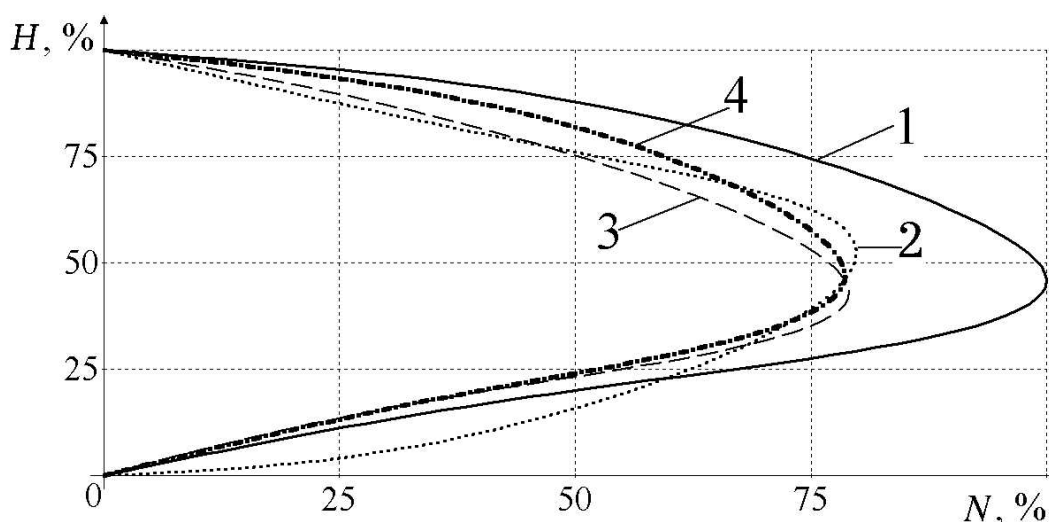


Рис. 4.6. Изменение поля энерговыделения ВВЭР-1000 на этапе отравления при уменьшении мощности РУ: 1 – поле энерговыделения перед уменьшением мощности ($\Delta O < 0$); 2 – дрейф поля энерговыделения вверх в результате температурных эффектов реактивности; 3 – дрейф поля энерговыделения вниз в результате нестационарного отравления Xe; 4 – результирующее поле энерговыделения после снижения мощности N ; H – относительное расстояние от низа АКЗ (в % от высоты АКЗ)

Таким образом, использование конкурирующих процессов при маневрировании мощностью РУ ВВЭР-1000, позволяющее стабилизировать поле энерговыделения в аксиальном направлении, основано на следующих закономерностях:

– поскольку при уменьшении электрической мощности ВВЭР-1000 со 100 до 80 % от номинала температура теплоносителя на входе АКЗ уменьшается на

1,7 °С, тогда как температура выхода – на 6 °С (см. таблицу 4.2), дрейф максимума поля энерговыделения за счет температурных эффектов реактивности при дальнейшем снижении мощности за счет отравления происходит вверх (линия 2, рисунок 4.6);

– дрейф максимума поля энерговыделения за счет переходных процессов на ксеноне (перед маневром АО отрицателен) происходит вниз (линия 3, рисунок 4.6);

– на этапе разотравления дрейф максимума поля энерговыделения за счет температурных эффектов реактивности происходит вниз, а дрейф максимума поля энерговыделения за счет переходных процессов на ксеноне – вверх.

Сравним эффективность двух алгоритмов суточного маневра мощностью энергоблока с ВВЭР-1000: предлагаемого алгоритма (альтернативного) и алгоритма, проходившего испытания на Хмельницкой АЭС 18.04.2006 г. (апробированного).

Апробированный алгоритм: снижение мощности до 80 % за 1 ч – работа 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 – работа на мощности 80 % в течение 4 ч – повышение мощности до номинальной в течение 2 ч.

С помощью программы “Имитатор Реактора” (ИР) [128, 129] выполнено сравнение двух вышеописанных алгоритмов суточного маневра мощностью. Программа ИР, аттестованная в ГАН РФ, является универсальным средством расчетного моделирования работы реактора ВВЭР-1000 и предназначена для проведения расчетов в проектных и исследовательских работах по усовершенствованию топливных циклов и алгоритмов управления реактором, а также для использования на действующих АЭС в качестве программного средства информационной поддержки оператора реактора.

Расчетная нейтронно-физическая модель АКЗ реактора, заложенная в ИР, идентична модели известной программы БИПР-7А. Настройка программы ИР на 19-ю кампанию блока № 5 Запорожской АЭС была выполнена следующим путем [126, 130, 131]:

- создан файл входных данных – master.set;
- создан файл часто изменяемых входных данных – user.set;
- с помощью БИПР-7А создан файл шлаков для 19-й кампании 5-го блока ЗАЭС с шагом 20 эфф. сут. по 30 точкам;
- в файл rgonew.bib внесены сорта топлива для текущей кампании.

Как известно, мгновенный АО соответствует текущему распределению концентрации ксенона, а равновесный АО отвечает равновесному распределению концентрации ксенона. Мощность реактора $P(\tau)$, положение регулирующей группы стержней $H(\tau)$, мгновенный и равновесный АО(τ), рассчитанные в зависимости от времени τ с помощью программы ИР, для апробированного и альтернативного алгоритма показаны соответственно на рис. 4.7 и 4.8.

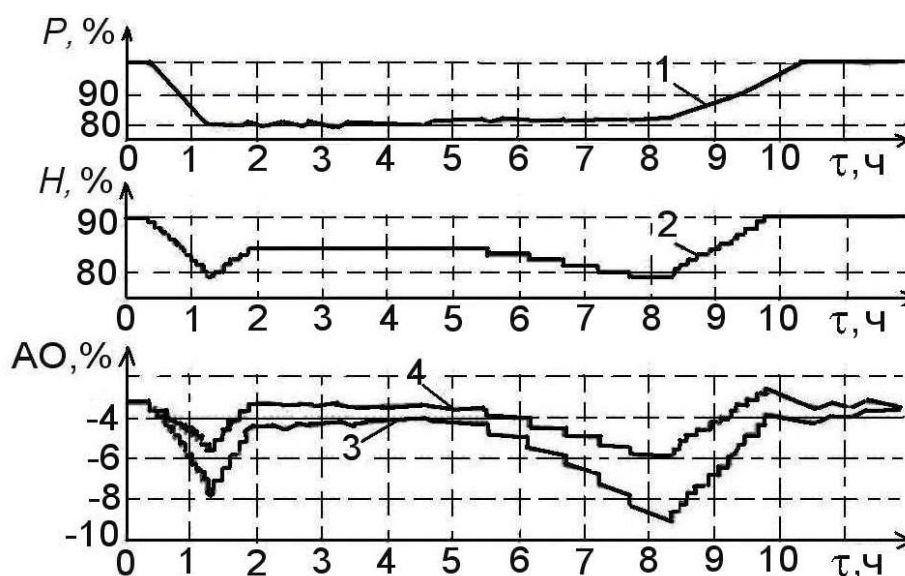


Рис. 4.7. Мощность РУ, положение ОР СУЗ, мгновенный и равновесный АО в зависимости от τ , ч для апробированного алгоритма: 1 – мощность реактора P , %; 2 – положение регулирующей группы стержней H , %; 3, 4 – соответственно мгновенный и равновесный АО, %

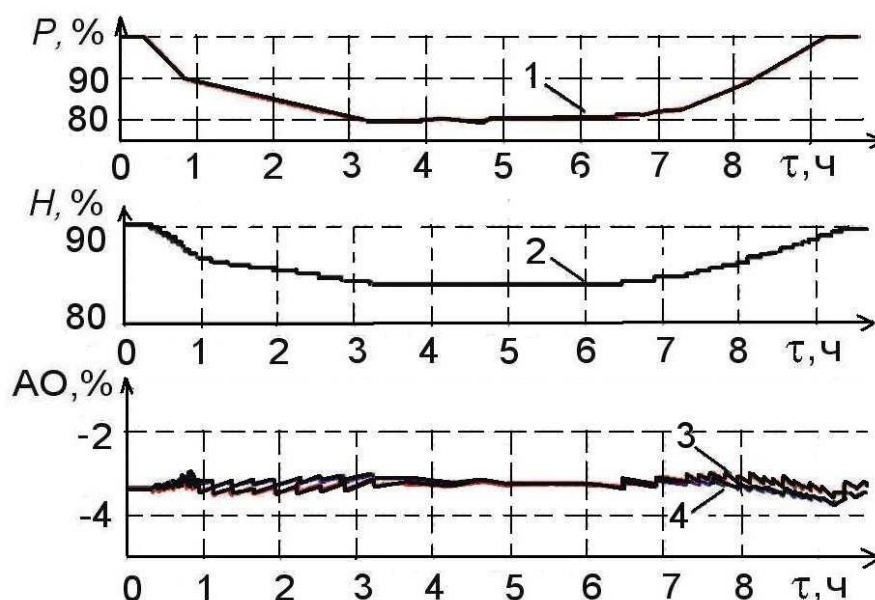


Рис. 4.8. Мощность РУ, положение ОР СУЗ, мгновенный и равновесный АО в зависимости от τ , ч для альтернативного алгоритма суточного маневра мощностью: 1 – мощность реактора P , %; 2 – положение регулирующей группы стержней H , %; 3, 4 – соответственно мгновенный и равновесный АО, %

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, показанных на рисунках 4.6–4.7, маневр начинается при $H = 90$ % от низа АКЗ.

Нижнее положение регулирующих стержней для апробированного алгоритма – $H = 78$ % , тогда как для альтернативного – $H = 84$ % – см. кривые (2), рисунки 4.7–4.8. 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 для апробированного алгоритма

примерно в 10 раз больше, чем для альтернативного, что является предвестником проблем со стабилизацией поля энерговыделения после окончания маневра – см. кривые (3), (4) на рисунках 4.7–4.8, а также рис. 4.9–4.10 [76, 78, 79, 132, 133–135].

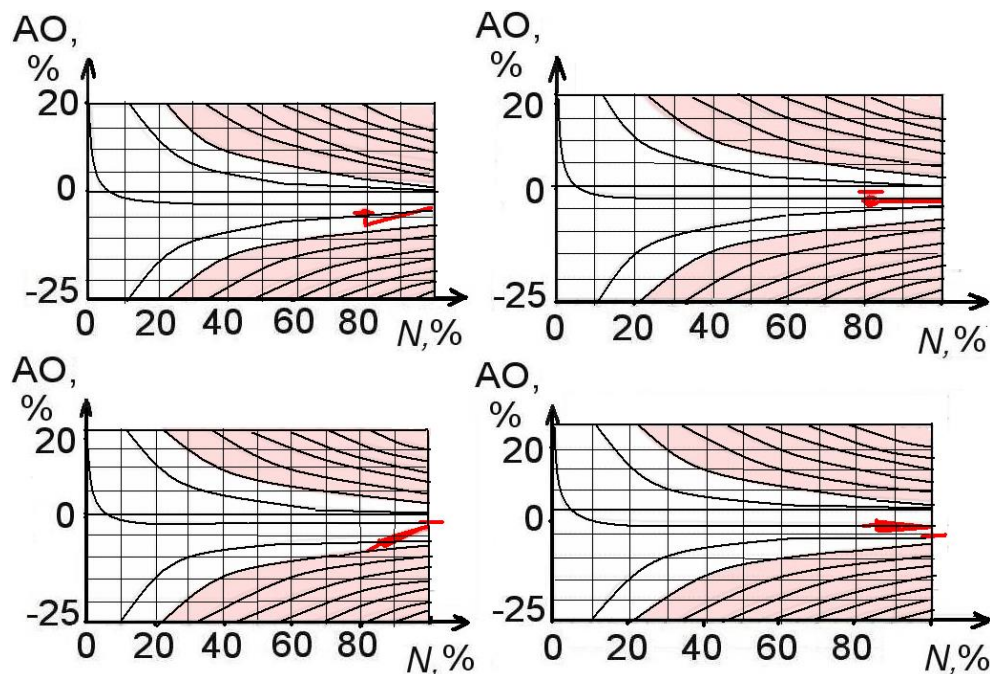


Рис. 4.9. Офсет-мощностная диаграмма для апробированного и альтернативного алгоритмов

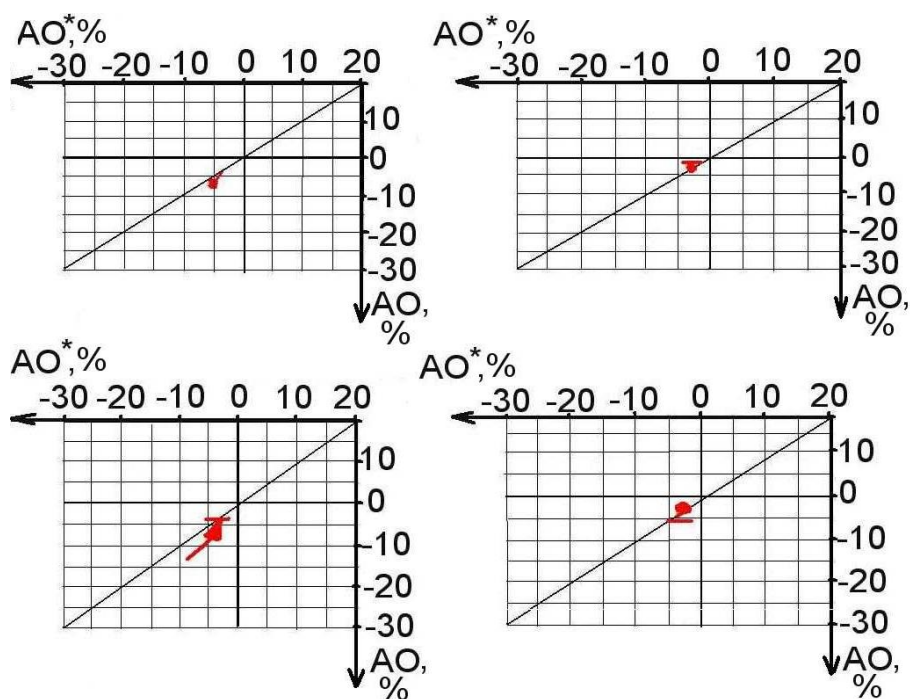


Рис. 4.10. Офсет-офсетная диаграмма для апробированного и

альтернативного алгоритмов

Для объективного сопоставления методов регулирования мощности необходимо принять показатель их эффективности, основанный на высоких требованиях к надежности и безопасности эксплуатации АЭС. Поскольку самой уязвимой составной частью АКЗ при многократных изменениях мощности РУ являются оболочки топливных элементов (ТВЭЛОВ), показателем эффективности метода регулирования мощности будем считать накопленную в процессе маневрирования остаточную деформацию оболочек ТВЭЛОВ. Чем она меньше, – тем более эффективен метод, и тем большее количество маневров нагрузка-разгрузка можно выполнить без нарушения регламентных характеристик эксплуатации оболочек ТВЭЛОВ. Для оценки времени эксплуатации оболочки ТВЭЛА в режиме переменных нагрузок используется метод [73].

Применяя комплексный показатель $\{\omega^*; \Delta I^*; \hat{E} \hat{E} \hat{O} \hat{I}^*; P_{a/l}^*\}$ (см. подраздел 4.1), был проведен модельный эксперимент по выбору наиболее эффективного метода регулирования мощности РУ ВВЭР-1000/В-320. Рассматривались алгоритм суточного маневра мощностью энергоблока с ВВЭР-1000, проходивший испытания на Хмельницкой АЭС 18.04.2006 г. (апробированный) и альтернативный алгоритм [8, 13, 14, 54].

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 метод регулирования с постоянным 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” (рис. 4.11).

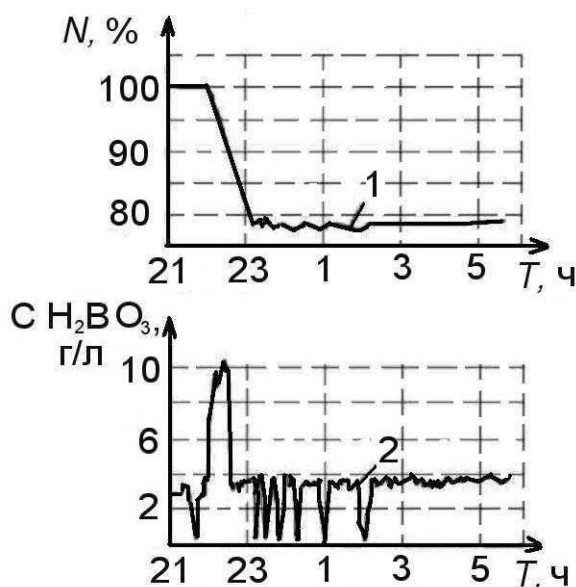


Рис. 4.11. Изменение нейтронной мощности (1) и концентрации борной кислоты на подпитке (2) при испытаниях на втором блоке Хмельницкой АЭС 17—18 апреля 2006 г.

Общее количество оперативных действий (переключений) M_1 при маневрировании мощностью по апробированному алгоритму составило [12]:

$$M_1 = 140. \quad (4.11)$$

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 [12]:

$$M_2 = 40. \quad (4.12)$$

Необходимо отметить, что на разных АЭС величина вероятности $P_{\dot{a}/i, i}$ 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.

Тогда $P_{\hat{a}/\hat{i}, i}$ будет иметь следующее значение:

$$P_{\hat{a}/\hat{i}, i} = 0,999, \quad (4.13)$$

где $i = \overline{1, M_j}$;

j – номер алгоритма маневрирования.

Используя (4.5), (4.11)–(4.13), вероятность безотказной работы системы управления РУ, обеспечивающей маневрирование мощностью по апробированному и альтернативному алгоритмам, имеет соответственно значения $P_{\hat{a}/\hat{i}, 1}^*$ и $P_{\hat{a}/\hat{i}, 2}^*$:

$$P_{\hat{a}/\hat{i}, 1}^* \approx 0,869. \quad (4.14)$$

$$P_{\hat{a}/\hat{i}, 2}^* \approx 0,961. \quad (4.15)$$

Пусть заданы следующие минимально допустимые значения компонентов комплексного критерия $\{\omega^*; \hat{A}^*; \hat{E}\hat{E}\hat{O}\hat{I}^*; P_{\hat{a}/\hat{i}}^*\}$:

$$\omega_{\min}^* = 0,5; \hat{A}_{\min}^* = 0,95; \hat{E}\hat{E}\hat{O}\hat{I}_{\min}^* = 0,75; P_{\hat{a}/\hat{i}, \min}^* = 0,95. \quad (4.16)$$

Тогда, в соответствии с (4.10):

$$L_{\max} = 0,563. \quad (4.17)$$

Применяя метод оценки времени эксплуатации оболочки твэла в режиме переменных нагрузок [8], 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. 4.12).

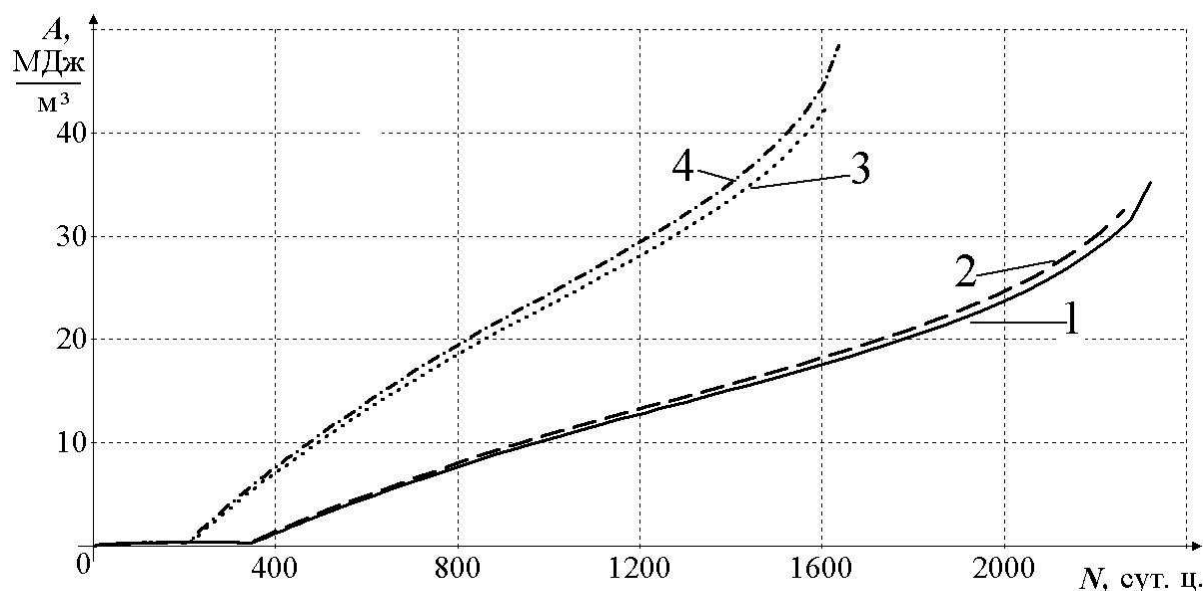


Рис. 4.12. Зависимость удельной энергии рассеяния $A(N_e)$ от числа суточных циклов нагружения N_e : 1, 3 – апробированный алгоритм суточного маневра мощностью для $q_{l,\max} = 248$ и 298 Вт/см, соответственно; 2, 4 – альтернативный алгоритм суточного маневра мощностью для $q_{l,\max} = 248$ и 298 Вт/см, соответственно

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. 4.13 для альтернативного алгоритма.

Используя метод оценки долговечности оболочки [8], программу ИР для определения амплитуды изменения АО в ходе маневра [13], а также модель оценки эффективности алгоритма маневрирования на основе комплексного показателя $\{\omega^*; \hat{A}^*; \hat{E}\hat{O}\hat{I}^*; P_{a/l}^*\}$ [12], получены характеристики апробированного и альтернативного алгоритмов суточного маневра мощностью ВВЭР-1000 для $q_{l,\max} = 248$ Вт/см, 260 Вт/см и 298 Вт/см (ТВС-А), сравнение которых дано в табл. 4.4, 4.5.

Величины Eff , приведенные в таблице 4.5, рассчитывались при $N_n = 2$.

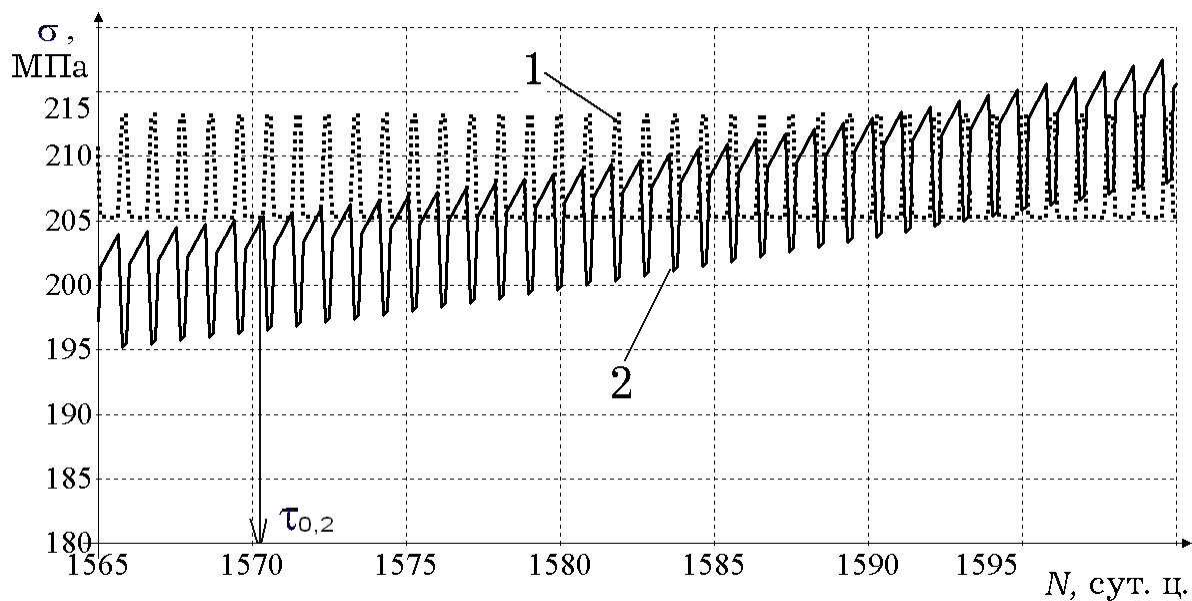


Рис. 4.13. Определение $\tau_{0,2}$ в максимально нагретой точке оболочки твэла для альтернативного алгоритма: 1 — предел текучести $\sigma_0^{\max}(\tau)$; 2 — эквивалентное напряжение $\sigma_e^{\max}(\tau)$

Таблица 4.4

**Характеристики апробированного и альтернативного алгоритмов
суточного маневрирования мощностью РУ с ВВЭР-1000**

$q_{l,\max}$, Вт/см	Алгоритм	$ \Delta AO $, %	КИУМ	A_0 , МДж/ м ³	τ_0 , эф. сут.	ω (1000 эф. сут)
248	Апробированный	3,0	0,929	29,59	2228	0,351
	Альтернативный	0,3	0,942	30,29	2209	0,357
298	Апробированный	3,0	0,929	41,15	1589	0,567
	Альтернативный	0,3	0,942	42,43	1570	0,576

Таблица 4.5

Сравнительная оценка эффективности апробированного и альтернативного алгоритмов суточного маневрирования мощностью РУ с ВВЭР-1000 на основе критерия $\{\omega^*; \hat{A}_i^*; \hat{E}\hat{E}\hat{O}\hat{I}^*; P_{\hat{a}/i}^*\}$

$q_{l,max}$, Вт/см	Алгоритм	$ \Delta A O $, %	КИУМ	A_0 , $\frac{МДж}{м^3}$	τ_0 , эф. сут.	ω (1000 эф. сут)	Eff (1000 эф. сут)
248	Апробированный	3,0	0,929	29,59	2228	0,351	0,220
	Альтернативный	0,3	0,942	30,29	2209	0,357	0,256
260	Апробированный	3,0	0,929	32,04	2061	0,400	0,150
	Альтернативный	0,3	0,942	32,85	2044	0,407	0,179

На основе анализа данных, приведенных в таблице 4.5, можно сделать вывод, что по результатам эксплуатации РУ ВВЭР-1000 в течение 1000 эф. сут. альтернативный алгоритм суточного маневра мощностью более предпочтителен по сравнению с апробированным алгоритмом, поскольку имеет большую эффективность Eff как при $q_{l,max} = 248$ Вт/см, так и при $q_{l,max} = 260$ Вт/см, оцениваемую по комплексному показателю $\{\omega^*; \hat{A}_i^*; \hat{E}\hat{E}\hat{O}\hat{I}^*; P_{\hat{a}/i}^*\}$.

Расчет показал, что при значении $q_{l,max} = 298$ Вт/см, соответствующем максимально нагруженным твэлам в АКЗ ВВЭР-1000, $Eff < 0$ после 1000 эф. сут. по обоим алгоритмам. Следовательно, можно сделать вывод, что непрерывная эксплуатация ВВЭР-1000 в течение 1000 эф. сут по обоим рассмотренным алгоритмам суточного маневрирования недопустима в рамках принятых ограничений (4.16). Предлагаемый подход позволяет определить допустимую длительность T непрерывной эксплуатации ВВЭР-1000 в переменном режиме исходя из требования нахождения точки $(\omega_i^*; \hat{A}_i^*; \hat{E}\hat{E}\hat{O}\hat{I}_i^*; P_{\hat{a}/i,i}^*)$ в пределах допустимой области для величины $q_{l,max} = 298$ Вт/см (табл. 4.6).

**Допустимая длительность непрерывной эксплуатации ВВЭР-1000
в переменном режиме**

Алгоритм	T , эф. сут.	ω^*	КИУМ*	$\hat{\Delta i}^*$	$P_{\hat{a}/\hat{i}}^*$	L	Eff
Альтернативный	500	0,744	0,785	0,997	0,961	0,337	0,401
	600	0,672	0,785	0,997	0,961	0,394	0,300
	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	0,500	0,785	0,997	0,961	0,546	0,030

Предельно допустимое количество циклов суточного нагружения РУ ВВЭР-1000 $T_{\text{доп}}$, лимитируемое предельно допустимым значением параметра поврежденности материала оболочки максимально нагруженных твэлов $\omega_{\text{max}}=0,5$, по апробированному и альтернативному алгоритмам равно $T_{\text{доп},1}=882$ и $T_{\text{доп},2}=870$ 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 общей численной погрешности расчетной модели [95].

Однако, альтернативный алгоритм (и соответствующий ему компромиссно-комбинированный метод регулирования мощности) имеет преимущество перед апробированным, поскольку при сохранении долговечности оболочки примерно на том же уровне характеризуется более высокими показателями использования установленной мощности РУ, стабильности поля энерговыделения, надежности системы управления РУ в ходе маневрирования.

Таким образом, в результате проведенного исследования предложен и обоснован компромиссно-комбинированный метод регулирования мощности РУ с ВВЭР-1000 в интервале от 80 до 100 % при поддержании постоянной температуры теплоносителя на входе в реактор, что дало возможность

использования конкурирующих процессов на этапе отравления-разотравления и стабилизации поля энерговыделения в аксиальном направлении.

Можно сделать вывод, что последовательность решенных исследовательских задач устранила научно-техническое противоречие и разрешила научную задачу диссертационной работы. Это позволит обеспечить безопасную работу РУ в переменной части графика электрической нагрузки за счет учета влияния ползучести оболочки в переменном режиме нагружения на ее свойства в зависимости от режимных характеристик АКЗ РУ и конструктивных параметров ТВЭЛ.

4.3. Выводы по четвертому разделу

1. Для оценки эффективности метода регулирования мощности при эксплуатации РУ ВВЭР-1000 в переменном режиме возможно использовать комплексный показатель $\{\omega^*; \hat{A}^*; \hat{E}^*; P_{a/l}^*\}$, отличающийся от известного коэффициента использования установленной мощности, учитывающего только один уровень анализа, наличием четырех уровней анализа (элементарного, структурного, экономического и вероятностного), основанного на приведенных параметре поврежденности ω^* материала оболочки ТВЭЛ, аксиальном офсете \hat{A}^* , коэффициенте использования установленной мощности \hat{E}^* , вероятности $P_{a/l}^*$ безотказной работы систем управления, обеспечивающих переменный режим нагружения, соответственно, что дает возможность сопоставлять различные методы регулирования нагрузки РУ по интегральному показателю.

2. Предложен и обоснован компромиссно-комбинированный метод регулирования мощности РУ с ВВЭР-1000, являющийся модификацией комбинированного метода регулирования, предусматривающего изменение мощности РУ в интервале от 80 до 100 % при поддержании постоянной

средней температуры теплоносителя в ЯР, который отличается поддержанием постоянной температуры теплоносителя на входе в реактор, что дает возможность использования конкурирующих процессов на этапе отравления-разотравления и стабилизации поля энерговыделения в аксиальном направлении.

3. При допущении предельно допустимого значения параметра поврежденности материала оболочки для максимально нагруженных твэлов $\omega_{\max} = 0,5$, допустимое количество маневров по переменному режиму суточного нагружения РУ ВВЭР-1000 для апробированного и альтернативного алгоритмов составляет 882 и 870 соответственно. Разница в долговечности оболочки при эксплуатации РУ по двум указанным алгоритмам лежит в пределах общей численной погрешности расчетной модели.

4. Для альтернативного алгоритма приведенный $\hat{E}E\hat{O}\hat{I}^*$, характеризующий степень использования установленной мощности РУ, составляет 0,785 против 0,774 для апробированного. Приведенный $\hat{A}\hat{I}^*$, характеризующий стабильность поля энерговыделения в ходе маневра, для альтернативного алгоритма составляет 0,997 против 0,970 для апробированного. Вероятность $P_{\hat{a}\hat{l}}^*$ безотказной работы системы управления, обеспечивающей маневрирование мощностью РУ в переменном режиме, характеризующая интегральную надежность системы управления РУ в ходе маневра, для альтернативного алгоритма составляет 0,961 против 0,869 для апробированного.

5. Используя в качестве критерия эффективности алгоритма степень удаленности в пространстве компонентов комплексного критерия точки $(\omega_i^*; \hat{A}\hat{I}_i^*; \hat{E}E\hat{O}\hat{I}_i^*; P_{\hat{a}\hat{l},i}^*)$, соответствующей i -му алгоритму маневрирования, от точки с координатами $(\omega^* = 1; \hat{A}\hat{I}^* = 1; \hat{E}E\hat{O}\hat{I}^* = 1; P_{\hat{a}\hat{l}}^* = 1)$, соответствующей предельному наилучшему переменному режиму эксплуатации, альтернативный алгоритм характеризуется более высокой

эффективностью по сравнению с апробированным как при максимальной линейной мощности твэла $q_{l,\max} = 248$ Вт/см, так и при $q_{l,\max} = 260$ Вт/см. Эффективность Eff по результатам эксплуатации РУ ВВЭР-1000 в течение 1000 эф. сут., оцениваемая по комплексному показателю $\{\omega^*; \hat{A}^*; \hat{E}^*; P_{\hat{a}/\hat{i}}^*\}$, составляет при $q_{l,\max} = 248$ Вт/см для альтернативного и апробированного алгоритмов 0,256 и 0,220, соответственно. При $q_{l,\max} = 260$ Вт/см Eff после 1000 эф. сут составляет для альтернативного и апробированного алгоритмов 0,179 и 0,150, соответственно.

ВЫВОДЫ

Диссертационная работа содержит ранее незащищенные научные положения и полученные автором новые научно обоснованные результаты, состоящие в разработке компромиссно-комбинированного метода регулирования мощности РУ с ВВЭР-1000 (В-320) в переменном режиме нагружения. В работе решена задача поиска механизма влияния режимов нагружения РУ с ВВЭР-1000 на изменение состояния оболочки твэла, включая ее предельное состояние.

Полученные научные и практические результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. В результате анализа литературных источников установлено, что для перевода РУ с ВВЭР-1000 в режим эксплуатации в переменной части графика электрической нагрузки необходимо разработать метод регулирования мощности, применение которого должно гарантировать сохранение целостности оболочек твэлов, не ухудшить показатели надежности и экономичности эксплуатации энергоблока, а также стабильности распределения энерговыделения в АКЗ при маневрировании.

2. На основе энергетического варианта теории ползучести усовершенствован метод анализа долговечности оболочки твэла, что позволяет учитывать требования всех критериев прочности (SC1...SC5) оболочки твэла РУ с ВВЭР-1000 (В-320) в единой расчетной модели.

3. На базе решения системы уравнений теплопроводности и механической деформации МКЭ предложена математическая модель свойств оболочки твэла РУ, отличающаяся тем, что процессы ползучести и накопления повреждений определяются взаимосвязанно через работу разрушения оболочки твэла, которая дает возможность определить условия изменения состояния оболочки твэла при любом нагружении РУ. Для переменного нагружения выявлено, что в твэле ТВС-А при максимальной линейной мощности $q_{l,max} = 248$ Вт/см предельное состояние оболочки

достигается через $\tau_0 = 2246$ эф. сут, при этом $A_0 = 27,36$ МДж/м³, параметр поврежденности оболочки после 1576 эф. сут равен 57 %. Для постоянного режима нагружения при $q_{l,\max} = 248$ Вт/см $\tau_0 = 2211$ эф. сут, при этом $A_0 = 33,37$ МДж/м³, параметр поврежденности оболочки после 1576 эф. сут равен 60 %. Работа ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения предпочтительна по сравнению с работой в стационарном режиме при $q_{l,\max} \leq 273$ Вт/см.

4. На основе предложенной математической модели изменения свойств оболочки твэла РУ в переменном режиме нагружения исследована параметрическая чувствительность оценки долговечности к режимным характеристикам и конструктивным параметрам твэла ВВЭР-1000. К группе несущественно влияющих исходных данных, интервал задания каждого из которых 20 % приводит к изменению времени потери устойчивости τ_0 не более 0,1 %, относятся разница между температурами газа верхнего компенсационного объема и теплоносителя, начальный размер зерна таблетки, обогащение топлива, верхний компенсационный объем твэла. К группе слабо влияющих исходных данных, интервал задания каждого из которых 3 % приводит к изменению времени потери устойчивости τ_0 не более 2 %, относятся толщина оболочки, начальное давление гелия под оболочкой, начальное содержание гелия в газовой смеси под оболочкой, эффективная плотность двуокиси урана, давление теплоносителя на входе в реактор, скорость теплоносителя, шаг твэлов, диаметр центрального отверстия таблетки. К группе сильно влияющих исходных данных, интервал задания каждого из которых величиной 3 % приводит к изменению оценки τ_0 более 2 %, относятся наружный диаметр оболочки твэла, диаметр таблетки, максимальная линейная мощность, температура теплоносителя на входе в реактор.

5. Предложен комплексный показатель для оценки эффективности эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 в переменной части графика электрической нагрузки, учитывающий четыре уровня анализа (параметрический,

структурный, технико-экономический и вероятностный) в виде приведенных параметров поврежденности оболочки твэла ω^* , аксиального офсета AO^* , коэффициента использования установленной мощности $КИУМ^*$, вероятности безотказной работы $P_{б/о}^*$ систем управления, обеспечивающих циклический режим нагружения, соответственно, что дает возможность сопоставлять различные модели регулирования нагрузки РУ по интегральному показателю, принимая в качестве меры эффективности j -го алгоритма близость точки $(\omega_j^*; AO_j^*; КИУМ_j^*; P_{б/о,j}^*)$ к точке $(\omega^* = 1; AO^* = 1; КИУМ^* = 1; P_{б/о}^* = 1)$.

6. Предложен и обоснован компромиссно-комбинированный метод регулирования мощности РУ с ВВЭР-1000, предусматривающий изменение мощности РУ в интервале от 80 до 100 % при поддержании постоянной входной температуры теплоносителя в ЯР, что дает возможность использования конкурирующих процессов на этапе отравления-разотравления, стабилизации поля энерговыделения в аксиальном направлении. После 1000 эф. сут при $q_{l,max} = 248$ Вт/см эффективность Eff апробированного и альтернативного алгоритмов составляет 0,220 и 0,256, соответственно, а при $q_{l,max} = 260$ Вт/см – 0,150 и 0,179, соответственно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Nuclear power for the 21-st century: international ministerial conference, (Paris, 21–22 march 2005 y.). – Vienna: IAEA, 2005. – 298 p.
2. Бронніков В. Перспективи розвитку ядерної електрогенерації в контексті завдань Енергетичної стратегії України / В. Бронніков, Л. Литвинський // Національна безпека і оборона. – 2008. – № 3. – С. 42 – 45.
3. АЭС с ВВЭР: режимы, характеристики, эффективность / [Аминов Р. З., Хрусталева В.А., Духовенский А.С., Осадчий А.И.]– М.: Энергоатомиздат, 1990. – 365 с.
4. Запорожская АЭС: блоки 5,6 (расширение до 6000 МВт). Проект.– М.: Ин-т "Атомтеплоэлектропроект", 1985.–214 с. – (Препринт / Ин-т "Атомтеплоэлектропроект"; ТП.З. 3.7 (т. 1)).
5. 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. – № 1. – С. 94–98.
6. 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.
7. Максимов М.В. Сравнение долговечности оболочек твэлов реактора ВВЭР-1000, работающего в переменном режиме / М.В. Максимов, С.Н. Пелых, В.Е. Баскаков // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2009. – № 1. – С. 49–53.
8. Maksimov M.V. 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.
9. Максимов М.В. 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. – № 2. – С. 13–18.

10. Максимов М.В. Методика сравнения долговечности оболочек твэлов, работающих в переменном режиме / М.В. Максимов, С.Н. Пелых, О.В. Маслов, В.Е. Баскаков // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – Харьков, 2009. – № 4/2. – С. 192–197.

11. Максимов М.В. 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. научно-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. – Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2009. – С. 133.

12. 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. – № 2.– С. 34–38.

13. Баскаков В.Е. Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержании суточного баланса мощности энергосистемы / В.Е. Баскаков, М.В. Максимов, О.В. Маслов // Тр. Одес. политехн. ун-та.– 2007. – № 2. – С. 56–59.

14. Максимов М.В. Метод оценки эффективности алгоритма маневра мощностью энергоблока с реактором типа ВВЭР / М.В. Максимов, С.Н. Пелых, О.В. Маслов, В.Е. Баскаков // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – № 4. – С. 128–139.

15. Максимов М.В. Метод оценки эксплуатационного ресурса оболочки твэла легководного реактора в различных режимах нагружения / М.В. Максимов, С.Н. Пелых, О.В. Маслов, В.Е. Баскаков // Атомная энергия.– 2010. – Т. 108, Вып. 5 (принято к опубликованию).

16. Юрко В.В. Солнечная энергетика: проблемы и решения / В.В. Юрко, Ю.В. Шкиль // Екологія та ноосферологія.– 2002.– Т. 12, № 3.– С. 16–31.

17. Иванов В.А. Эксплуатация АЭС. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 384 с.
18. Притула К.М. Формирование энергетического баланса Украины // Региональная экономика. – 2006. – № 3. – С. 41.
19. Практическое руководство по повышению энергоэффективности муниципальных систем / [ред. А.С. Копеца и Р.В. Кишканя]. – Донецк: Украинский центр экологического аудита и страхования, 2007. – 204 с.
20. Андриющенко А.И. Оптимизация режимов работы и параметров тепловых электростанций.– К.: Наук. думка, 1983. – 256 с.
21. Сообщение Минтопэнерго [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.investor.ua/news/140-41683.html>.
22. Кострыкин В.А. Тепловое состояние турбин АЭС при работе на частичных нагрузках [Электронный ресурс] / В.А. Кострыкин, И.Г. Шелепов .– Режим доступа: <http://tyrbin.ru/blog/2008-12-30-49>.
23. Короткевич А.Н. Баланс мощностей Белорусской энергосистемы и проблема регулирования суточного графика нагрузок / А.Н. Короткевич, О.М. Фомина // Энергетика и ТЭК. – 2008. – № 4 – С. 12–15.
24. Піріашвілі Б. З. Перспективний паливно-енергетичний баланс – основа формування енергетичної стратегії України до 2030 року / Піріашвілі Б.З., Чиркін Б.П., Чукаєва І.К. – К.: Наук. думка, 2002. – 240 с.
25. Нові тенденції у сфері енергетичної безпеки: [Збірка статей на основі матеріалів міжнар. наук.-практ. конф.]. – К.: Логос, 2004. – 250 с.
26. Сообщение Минтопэнерго [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.pilot-capital.com.ua/detnews/9554/economics.unian.net/rus/lastnews/economics.unian.net/rus/lastnews/>.
27. Сапрыкин В.М. О «Концепции государственной энергетической политики Украины на период до 2020 г.» [Электронный ресурс] // Зеркало недели / Деньги.– 2001.– № 8 (332).– Режим доступа: <http://www.zn.ua/2000/2200/30199/>.

28. Качество электроэнергии в распределительных сетях, дополнительные потери в них и средства восстановления качества энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nettech.com.ua/article3.php>.
29. Ковецкий В.М. Оценка маневренных возможностей электрогенерирующих установок для обеспечения качества электроэнергии / В.М. Ковецкий, М.М. Ковецкая // Проблемы загальної енергетики. – 2007. – № 16. – С. 47–53.
30. Фотин Л.П. О конкурентоспособности энергии АЭС, поставляемой на рынок // Сб. трудов 2-й межд. научно-техн. конф. “Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики”. Часть 2. Стендовые доклады. – Москва, 2001. – С. 309.
31. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення: ДСТУ 13109-97. – [Действует с 1997-01-01].– К.: Госпотребстандарт Украины, 1997.– 181 с.– (Национальные стандарты Украины).
32. Комплексный анализ эффективности технических решений в энергетике / [Гук Ю. Б., Долгов П. П., Огороков В. Р. и др.]; под ред. В. Р. Огорокова и Д. С. Щавелева. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 176 с.
33. Обзор рынка электроэнергетики Украины: [отчет]. – К.: ПРО-Консалтинг, 2008. – 79 с.
34. Кини Р. Размещение энергетических объектов: выбор решений. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
35. Енергетична стратегія України на період до 2030 року та подальшу перспективу: [проект]. – К.: Мінпаливенерго та НАН України, 2003. – 16 с.
36. Підсумки роботи електроенергетики у 2003 р: [звіт].– К.: Мінпаливенерго України, 2003. – 8 с.
37. Крамарский В.А. Оценка механических напряжений в обмотке статора турбогенератора при регулировании охлаждения / В. А. Крамарский, К. А. Кучинский // Тр. ИЭД НАНУ. – 1995. – № 1. – С. 27–31.

38. Шигловский А.К. Энергосбережение в Украине. – К. : Либидь, 1997. – 142 с.
39. Анализ возможности использования различных видов топлива для строительства тепловых электростанции на предприятиях Украины [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://nm4.ru/investicii/28748.htm>.
40. Шеберстов О.М. Стан теплових електростанцій України, перспективи їх оновлення і модернізації // Енергетика і електрифікація. – 2004. – № 12.– С. 31–34.
41. Фаворский О.П. ГТУ – основа будущей энергетики России // Журнал ЭСКО энергосервисной компании “Экологические системы”. – 2004. – № 7.– С. 56–60.
42. Маляренко В.А. Энергетика и окружающая среда / В.А. Маляренко, Л.В. Лысак.– Х.: Рубікон, 2004. – 217 с.
43. Сообщение агентства "РБК-Украина" от 29.08.2009 [Электронный ресурс].– Режим доступа: http://www.newscat.ru/news_MosgorBTI-budet-borot-sja-s-konkurentami-rynochnymi-cenami_file_393678.html.
44. Мураяма Х. Опыт эксплуатации электростанций, работающих при сверхкритических параметрах, и опыт применения других передовых технологий / Х. Мураяма, М. Секита // Электрические станции. – 2003. – № 10. – С. 58.
45. Об уровне цен на электроэнергию во Франции и ФРГ [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://alisa-klimat.ru/archives/34>.
46. Сараева Н.В. Анализ конкурентоспособности атомной энергетики [Электронный ресурс].– Режим доступа: http://journal.esco.co.ua/2003_7/art16.htm.
47. Борисов Н.А. Реабилитация ТЭС – обеспечение устойчивой работы объединенной энергосистемы Украины // Энергетика и электрификация. – 2004. – № 3. – С. 2–3

48. Павленко А.В. Реконструкция энергоблока мощностью 300 МВт на Змиевской ТЭС. Процесс пуско-наладки / А.В. Павленко, О.В. Кононок // Энергетика и электрификация. – 2003. – № 3. – С. 15.
49. Участие ТЭС в регулировании частоты и активной мощности в ОЭС Украины [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.er.gov.ua/doc.php?p=1318>.
50. Дементьев Б.А. Кинетика и регулирование ядерных реакторов.– М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
51. Овчинников Ф.Я. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов / Ф.Я. Овчинников, В.В. Семенов.– М.: Энергоатомиздат, 1988. – 359 с.
52. 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.
53. Украинско-российский научно-практический семинар “Опыт эксплуатации и внедрения топлива ВВЭР нового поколения. Обеспечение работоспособности ядерного топлива в маневренных режимах” / [Новиков В.В., Медведев А.В., Богатырь С.М. и др.]– Хмельницкий: ХАЭС, 2005. – 22 с.
54. 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.
55. 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.
56. Продолжение срока эксплуатации: [программа проведения обследования технического состояния типичного оборудования АЭС].– К.: НАЭК “Энергоатом”, 2007. – 76 с.

57. 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.
58. Овчинников Ф.Я. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов / Ф.Я. Овчинников, В.В. Семенов.– М.: Энергоатомиздат, 1988. – 359 с.
59. Материалы межд. конференции “Продолжение срока эксплуатации энергоблоков АЭС. Оценка технического состояния и управление старением оборудования и кабельных приборов”. – К.: НАЭК “Энергоатом”, 2007. – 256 с.
60. Толстоногов В.К. О состоянии работ по управлению ресурсом энергоблоков АЭС Украины. – Чернобыль: ОЯРБ МНТЦ “Укрытие”, ПО ЧАЭС, 2007. – 19 с.
61. Стратегия развития ядерной энергетики в Украине на период до 2030 г и на дальнейшую перспективу: [проект].– К.: НАЭК “Энергоатом”, 2005. – 34 с.
62. Ядерная энергия во Франции. Официальный сайт Всемирной ядерной ассоциации [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.world-nuclear.org/info/inf40.html>.
63. Вопросы теории и методы проектирования энергетических систем / [Болотов В. В., Артюгина И. М., Бурцева Г. Е., Долгов П. П.]. – Л.: Наука, 1970. – 274 с.
64. 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.
65. 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.

66. Гавриш О. Облгазам и облэнерго грозит банкротство [Электронный ресурс] // Коммерсантъ-Украина. – 2009. – Режим доступа к журн:

<http://www.ffa.in.ua/nc/full/article/oblgazam-i-oblehnergo-grozit-bankrotstvo.html>

67. Яковлев Б. В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения. – Мн.: Адукацыя і выхаванне. – 2002. – 448 с.

68. Простаков Г.Н. Киловатты вне рынка // Украинский бизнес. – 2009. – № 40. – С. 15–21.

69. Сб. трудов 2-й межд. научно-техн. конф. “Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики”. Часть 1. – М.: ВНИИАЭС, 2001. – 342 с.

70. Design of the core for nuclear power plants: safety guide № NS-G-1.12.– Vienna: IAEA, 2004.– 247 p.

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

72. Никулина А.В. Взаимосвязь легирующего состава циркониевых Nb-содержащих сплавов с коррозией и механическими свойствами / А.В. Никулина, В.Ф. Коньков, В.Н. Шишов // Сб. докладов 7-й Рос. конф. по реакторному материаловедению.– Димитровград: НИИ Атомных реакторов, 2003.– 328 с.

73. Максимов М.В. Метод оценки времени эксплуатации оболочки твэла в режиме переменных нагрузок / М.В. Максимов, С.Н. Пелых // Ядерная и радиационная безопасность. – 2008. – № 3. – С. 3–6.

74. Кудинов В.В. Конкурентоспособность различных электрогенерирующих технологий // Атомная техника за рубежом.– 2005. – № 11. – С. 7–24.

75. Небоян В.Т. Методы расчета устойчивости систем управления нейтронным полем реактора / В.Т. Небоян, П.Т. Потапенко // Атомная техника за рубежом.–1977. – № 12. – С. 10–16.

76. Филимонов П.Е. Управление энергораспределением ВВЭР с помощью офсет–офсетной диаграммы // Атомная энергия. – 1992. – Т. 73, № 3. – С. 175–179.
77. 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.
78. 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.
79. 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.
80. Шмелев В. Д. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций / В. Д. Шмелев, Ю. Г. Драгунов, В. П. Денисов. – М.: Академкнига, 2004. – 220 с.
81. 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.
82. Андрианов А.Н. Моделирование ядерно-физических процессов в поверхностном слое топливного сердечника / А.Н. Андрианов, В.Г. Баранов, Г.В. Тихомиров, А.В. Хлунов // Атомная энергия. – 2008. – Т. 104, № 6. – С. 353–358.
83. Баранов В.Г. Моделирование ядерно-физических процессов в поверхностном слое топливного сердечника с выгорающим поглотителем / В.Г. Баранов, М.Ю. Терновых, Г.В. Тихомиров, А.В. Хлунов // Атомная энергия. – 2008. – Т. 105, № 6. – С. 307–311.

84. Андрианова Е.А. Повышение выгорания топлива в ВВЭР / Е.А. Андрианова, В.Ф. Цибульский // Атомная энергия. –2008. – Т. 104, № 3. – С. 137–141.
85. 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.
86. 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.
87. Семишкин В.П. 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.
88. 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.
89. Соснин О.В. Энергетический вариант теории ползучести / О.В. Соснин, Б.В. Горев, А.Ф. Никитенко . – Н.: СО РАН, 1986. – 95 с.
90. Новиков В.В. Исследование топлива ВВЭР с легирующими добавками / В.В. Новиков, Ю.К. Бибилашвили, Е.Н. Михеев // Атомная энергия. – 2008. – Т. 105, № 4. – С. 205–210.
91. Бурукин А.В. Испытания в реакторе ”Мир” твэлов ВВЭР в режимах с циклическим изменением мощности / А.В. Бурукин, А.Ф. Грачев, В.В. Калыгин // Атомная энергия. – 2008. – Т. 104, № 2. – С. 80–84.

92. 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.
93. 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.
94. 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.
95. 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.
96. White R.J. A new fission gas release model / R.J. White, M.O. Tucker // Journal of nuclear materials. – 1983. – № 118. – P. 1–38.
97. Kitajima S. Development of a code and models for high burnup fuel performance analysis / S. Kitajima, M. Kinoshita // Proc. of the IAEA meeting on water reactor fuel element modelling at high burnup and its experimental support.– Windermere: IAEA, 1994.– 276 p.
98. 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.
99. 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.
100. Chen J.A. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow // Process design developments. – 1966. – № 5.– P. 126–133.
101. 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.

102. 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.

103. 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.

104. Washington A.B. Preferred values for the thermal conductivity of sintered ceramic fuel for fast reactor use. TRG 2236(D).– Culham: United Kingdom Atomic Energy Authority, 1973.– 329 p.

105. 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.

106. Wiesenack W. Assessment of UO_2 conductivity degradation based on in-pile temperature data // Proc. of the int. topical meeting on light water reactor fuel performance.– Portland (USA): OECD, 1997.– 507 p.

107. Forsberg K. Modelling of some high burnup phenomena in nuclear fuel / K. Forsberg, F. Lindstrom, A.R. Massih // Proc. of the IAEA meeting on water reactor fuel element modelling at high burnup and its experimental support.– Windermere: IAEA, 1994.– 276 p.

108. Tachibana T. Dependence on strain rate and temperature shown by yield stress of uranium dioxide / T. Tachibana, H. Furuya, M. Koizumi // Journal of nuclear science and technology. – 1976. – № 13.– P. 497–502.

109. 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.

110. MacEwan J.R. Grain growth in sintered uranium dioxide // Journal of american ceramic society. – 1962. – № 45.– P. 37–38.

111. 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.
112. Hagrman 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. Hagrman, G.A. Reyman.– Idaho Falls: Idaho National Engineering Lab., 1979.– 482 p.
113. 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.
114. База данных по ЯППУ для анализа проектных аварий ЮУ АЭС, энергоблок № 1. – Южноукраинск: ЮУ АЭС, 1999. – 643 с.
115. 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.
116. 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.
117. Fisher E.F. Single-crystal elastic moduli and the hcp-bcc transformation in Ti, Zr, and Hf / E.F. Fisher, C.J. Renken // Physical Review. – 1954. – P. A482–A494.
118. 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.
119. Rosinger H.E. Steady-state creep of zircaloy-4 fuel cladding from 940 to 1873 K // Journal of nuclear materials. – 1979. – № 82.– P. 286–289.
120. Никулина А.В. Взаимосвязь легирующего состава циркониевых Nb-содержащих сплавов с коррозией и механическими свойствами / А.В. Никулина, В.Ф. Коньков, В.Н. Шишов // Сб. докладов 7-й Рос. конф. по реакторному материаловедению.– Димитровград: НИИ Атомных реакторов, 2003.– 328 с.

121. 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.
122. Займовский А.С. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике / А.С. Займовский, А.В. Никулина, Н.Г. Решетников. – М.: Энергоиздат, 1994. – 232 с.
123. Шмаков А.А. Концентраторы напряжений в твэлах РБМК / А.А. Шмаков, Е.М. Морозов, Ю.Г. Матвиенко. – М.: МИФИ, 2003. – 37 с.
124. Самойлов О.Б. Результаты эксплуатации ТВСА на АЭС с ВВЭР-1000 / О.Б. Самойлов, В.Б. Кайдалов, В.С. Кууль // Тр. 4-й межд. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. – Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2005. – С. 15–19.
125. Аверьянова С.П. Исследование ксеноновых переходных процессов в ВВЭР-1000 на Тяньваньской АЭС (Китай) / С.П. Аверьянова, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков // Атомная энергия. – 2008. – Т. 105, № 4. – С. 183–190.
126. 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.
127. Владимиров В.И. Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 304 с.
128. 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.
129. 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.

130. Пономаренко Г.Л. Моделирование энергораспределения в активной зоне ВВЭР для анализа безопасности / Г.Л. Пономаренко, М.А. Быков, А.К. Подшибякин // Атомная энергия. – 2003. – Т. 94, № 5. – С. 339–344.
131. 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.
132. 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.
133. Филимонов П.Е. Подавление аксиальных колебаний энергораспределения ВВЭР-1000 без органов регулирования половинной длины / П.Е. Филимонов, Ю.А. Крайнов // Атомная энергия. – 1995. – Т. 78, № 5. – С. 338–339.
134. Горохов А.К. Методика анализа аксиальных ксеноновых колебаний и режимов их подавления в реакторах ВВЭР-1000 и некоторые результаты ее применения // Вопросы атомной науки и техники. Сер. ”Обеспечение безопасности АЭС”. – 2006. – № 15. – С. 13–30.
135. 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.