

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 681.51

Андрощук А.В.

Одесский национальный политехнический университет

Тарахтий О.С.

Одесский национальный политехнический университет

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ТОПЛИВА ВВЭР-1000 С ПОДДЕРЖАНИЕМ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Обоснована необходимость разработки и внедрения автоматизированной системы управления свойствами ядерного топлива в процессе эксплуатации реактора типа ВВЭР-1000 с постоянной средней температурой теплоносителя первого контура. Рассмотрены принципы моделирования изменения свойств твэлов со временем для нормальных условий эксплуатации реактора. Показано, что управляющими воздействиями в автоматизированной системе управления свойствами ядерного топлива будут изменены положения в активной зоне регулирующих органов системы управления, а также расположение тепловыделяющих сборок в ячейках активной зоны в ходе плановых перегрузок ядерного топлива.

***Ключевые слова:** автоматизированная система управления, свойства ядерного топлива, реактор ВВЭР-1000, активная зона, средняя температура теплоносителя.*

Постановка проблемы. Из 15 действующих энергоблоков НАЭК «Энергоатом» 13 энергоблоков созданы на основе реактора типа ВВЭР-1000. В настоящее время реакторные установки (далее – РУ) с ВВЭР-1000 эксплуатируются преимущественно в проектном, т. е. базовом режиме – на постоянном уровне мощности 100% от номинала. Необходимость эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 в маневренном режиме следует из весьма значительной доли выработки электроэнергии реакторами этого типа, а также из необходимости адаптации энергоблоков АЭС к условиям работы в современных и перспективных энергосистемах. Эти условия состоят в том, что, если доля выработки электроэнергии на АЭС в объединенной энергосистеме (далее – ОЭС) страны близка к 50% и сокращается доля электрогенерирующих установок, работающих в полупиковом режиме, нарушается баланс между выработкой и потреблением электроэнергии в ОЭС [1].

Поскольку новые полупиковые генерирующие мощности своевременно не вводятся в экс-

плуатацию, необходимо участие уже существующих ядерных энергоустановок в регулировании частоты и мощности в ОЭС страны. Согласно регламенту, энергоблок с ВВЭР-1000 допустимо эксплуатировать в маневренном режиме, если это не снижает надежность, безопасность и экономическую эффективность эксплуатации РУ. Важно отметить, что оборудование первого контура РУ с ВВЭР-1000 (В-320) рассчитано на возможность эксплуатации в режиме регулирования частоты и мощности в ОЭС с допусаемым количеством циклов набора и снижения нагрузки, равным 10 000 в пределах регулировочного диапазона 30–100% от номинальной мощности [1].

Однако на АЭС НАЭК «Энергоатом» не внедрено стандартных методов расчета величины параметра деформационной поврежденности материала оболочек твэлов $\omega(\tau)$, накопленной на текущий момент времени, а также на момент разгерметизации оболочек твэлов, принимая во внимание историю нагружения конкретной

тепловыделяющей сборки (далее – ТВС), т. е. точную последовательность совокупностей эксплуатационных параметров, определяющих величину $\omega(\tau)$ для данной ТВС. На действующих АЭС с ВВЭР-1000 НАЭК «Энергоатом» не внедрены технологии для локализации разгерметизированных оболочек твэлов в ТВС и локализации аксиальных сегментов (далее – АС) оболочек твэлов, в которых произошла разгерметизация. Как следствие, невозможно учитывать влияние технологических процедур, например, алгоритма перестановок ТВС в активной зоне (далее – АКЗ), на вероятность разгерметизации оболочек твэлов [2].

Поскольку процедуры текущего контроля накопленной деформационной поврежденности оболочек твэлов реактора ВВЭР-1000 не разработаны и не внедрены, в настоящее время на АЭС НАЭК «Энергоатом» с ВВЭР-1000 невозможно гарантировать поддержание свойств ядерного топлива (далее – ЯТ) в регламентных пределах. С точки зрения системного подхода, текущий контроль накопленной деформационной поврежденности оболочек твэлов является составной частью контроля свойств ЯТ, неразрывно связанного с автоматизированным управлением свойствами ЯТ [1].

Анализ последних исследований и публикаций. В данной публикации предложены состав и структура автоматизированной системы управления свойствами топлива реактора ВВЭР-1000, что обеспечивает баланс между безопасностью и экономичностью эксплуатации ЯТ. Предложена автоматизированная система управления свойствами ЯТ реактора ВВЭР-1000 с учетом параметра деформационного повреждения оболочек твэлов, глубины выгорания ЯТ и аксиального офсета.

Постановка задания. Целью работы является разработка технологических основ автоматизированного управления свойствами ЯТ, при его эксплуатации в переменном режиме нагружения, для повышения безопасности и эффективности эксплуатации РУ с ВВЭР-1000.

Изложение основного материала исследования. В работе использовались такие методы: моделирование изменения параметра поврежденности оболочки твэла $\omega(\tau)$ со временем; метод управления свойствами твэлов при эксплуатации РУ; методы системного анализа и теории автоматического управления.

Моделирование изменения поврежденности оболочки твэла со временем. Метод расчета $\omega(\tau)$ на основе энергетического варианта теории ползучести (далее – ЭВП) позволяет для нормальных условий эксплуатации твэла реактора типа ВВЭР-

1000 учесть основной процесс, вызывающий рост $\omega(\tau)$ и параметры, определяющие скорость этого роста. Положения ЭВП-метода [1]:

- при управлении свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации ВВЭР-1000 влияние на долговечность оболочек твэлов таких факторов, как МВТО при малых выгораниях ЯТ, механическое повреждение оболочек вследствие коррозионного растрескивания под напряжением, коррозия в области глубоких выгораний, а также пластическая деформация оболочек, может быть минимизировано путем оптимизации регламента эксплуатации РУ и технологии производства твэлов на основе уже известных методов;

- наиболее существенным для дальнейшего повышения безопасности эксплуатации твэлов путем управления их свойствами является корректное описание процесса разгерметизации оболочки, вызванного комбинацией многократных циклических и долговременных стационарных нагружений [3];

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

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

- в любой момент времени τ интенсивность разрушения оболочки оценивается через удельную энергию рассеяния $A(\tau)$, накопленную на данный момент в процессе ползучести;

- лимитирующий компонент A_0 критерия разрушения оболочки не зависит от последовательности совокупностей условий нагружения оболочки, в т. ч. от метода маневрирования мощностью РУ N , последовательности уровней мощности N , размещения органов регулирования (далее – ОР) системы управления и защиты (далее – СУЗ) в АКЗ, алгоритма перестановок ТВС в АКЗ и определяется исключительно свойствами материала оболочки;

A_0 находится как $A(\tau)$, рассчитанная на основе ЭВП-модели изменения свойств твэла в момент начала разрушения оболочки τ_0 , при выполне-

нии предельного условия для самого внутреннего радиального элемента в анализируемом АС оболочки, являющегося самым напряженным:

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

Метод управления свойствами твэлов при эксплуатации РУ. Метод управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР-1000 характеризуется учетом поврежденности оболочек в нормальных условиях их эксплуатации, балансом безопасности и экономичности эксплуатации твэлов, итерационным заданием главных факторов, детерминирующих процесс накопления микротрещин в оболочках твэлов, который численно описывается параметром поврежденности $\omega(\tau)$ [4; 5].

Метод управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР-1000 включает в себя два метода [1]:

1) Метод управления свойствами твэлов на стадии проектирования ВВЭР-1000, состоящий из методов управления конструкционными параметрами твэла и расположением регулирующей группы СУЗ в АКЗ.

2) Метод управления свойствами твэлов на стадии эксплуатации ВВЭР-1000, включающий методы управления температурным режимом теплоносителя, перестановками ТВС в АКЗ и балансом стационарного и переменного нагружения РУ.

В методе управления свойствами твэлов учитывается влияние таких главных факторов, детерминирующих контролируемые параметры, как конструкционные параметры твэлов, ТВС и АКЗ, а также режимные параметры: максимальная линейная мощность в твэле $q_{l,max}$ и температура теплоносителя на входе АКЗ t_{ex} .

В качестве контролируемых параметров в системе управления свойствами ЯТ используются:

1) Параметр поврежденности оболочек твэлов $\omega(\tau)$ – описывает безопасность эксплуатации твэлов.

2) Глубина выгорания ядерного топлива $B(\tau)$ – описывает экономичность эксплуатации твэлов.

3) Аксиальный офсет $A(\tau)$ поля энерговыделения в АКЗ – описывает безопасность и экономичность эксплуатации твэлов.

На основе учета эволюции микроструктуры оболочек твэлов при нормальной эксплуатации ЯТ возможно сконструировать критерий эффективности управления свойствами ЯТ, дающий целевую функцию оптимизации параметров реактора в виде:

$$Eff = f(\omega^*, B^*, AO^*), \quad (2),$$

где ω^* , B^* и AO^* – безразмерные максимальные параметры поврежденности оболочек твэлов, средняя глубина выгорания ЯТ по ТВС какого-либо алгоритма перестановок ЯТ и максимальный аксиальный офсет для заданного температурного режима теплоносителя.

В результате итерационной оптимизации температурного режима теплоносителя, алгоритма перестановок ТВС в АКЗ, а также баланса стационарного и переменного нагружения РУ:

$$Eff \rightarrow \max\{Eff\} \text{ if } \begin{cases} \omega^* \rightarrow \max\{\omega^*\}; \\ B^* \rightarrow \max\{B^*\}; \\ AO^* \rightarrow \max\{AO^*\}. \end{cases} \quad (3)$$

Физический смысл критерия (3) заключается в том, что он позволяет достигать одновременно минимума параметра поврежденности оболочек, максимальной равномерности выгорания ЯТ среди ТВС алгоритма перестановок ТВС в АКЗ, а также максимальной стабильности аксиального офсета, а значит и поля энерговыделения в АКЗ [1].

Результаты. В настоящее время известны два основных метода регулирования мощности энергоблока с ВВЭР-1000, характеризующие значения технологических параметров в стационарных режимах энергоблока [2]:

1) Метод с постоянным давлением пара в парогенераторе второго контура $p_2 = \text{const}$.

Хотя метод регулирования мощности энергоблока с $p_2 = \text{const}$ обеспечивает наиболее благоприятные условия для работы парогенерирующего оборудования второго контура, однако, ввиду переменности средней температуры теплоносителя в первом контуре:

– требуется компенсатор давления увеличенных размеров;

– возникают 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 АКЗ.

2) Метод с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре $\langle t_1 \rangle = \text{const}$.

Недостатком метода регулирования мощности энергоблока с $\langle t_1 \rangle = \text{const}$ является повышение давления пара во втором контуре при снижении мощности энергоблока, что требует проектирования парогенераторов и главных паропроводов для работы с давлением, превышающим номинальное.

Однако метод с $\langle t_1 \rangle = \text{const}$ имеет такие важные преимущества:

– наиболее благоприятные условия для работы оборудования первого контура;

– возможность саморегулирования процессов в АКЗ реактора за счет температурного эффекта реактивности;

– минимизация воздействия на ОР СУЗ;

– стабильность поля энерговыделения в АКЗ.

Принимая во внимание отмеченные преимущества метода регулирования мощности энергоблока с $\langle t_1 \rangle = \text{const}$, напрямую влияющие на безопасность и экономическую эффективность эксплуатации ЯТ, примем, что средняя температура теплоносителя в АКЗ в ходе маневра мощностью реактора поддерживается постоянной. Тогда АСУ свойствами ЯТ в процессе эксплуатации реактора типа ВВЭР-1000 будет включать следующие основные контуры управления:

– управление свойствами ЯТ за счет оптимизации алгоритма перестановок ТВС в АКЗ;

– управление свойствами ЯТ за счет оптимизации баланса стационарного и переменного нагружения РУ.

Рассмотрим некоторые основные элементы перспективной АСУ свойствами ЯТ реактора типа ВВЭР-1000 с точки зрения теории автоматического управления.

1. Объект управления – АКЗ.

2. Регулируемые величины:

– уровень мощности реактора;

– энерговыделение и температура ЯТ в каждой ячейке АКЗ;

– температура теплоносителя на входе и выходе АКЗ реактора.

3. Контролируемые параметры:

– параметр поврежденности оболочек ТВЭЛ $\omega(\tau)$;

– глубина выгорания ЯТ $B(\tau)$;

аксиальный офсет $A(\tau)$ поля энерговыделения в АКЗ.

4. Управляющие воздействия:

– изменение глубины погружения ОР СУЗ в АКЗ,

– изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе;

– изменение расположения ТВС в ячейках АКЗ в ходе плановых перегрузок ЯТ.

Выводы.

1) Для поддержания баланса генерирующих и потребляющих мощностей в энергосистеме

Украины, путем перевода энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 НАЭК «Энергоатом» в маневренный режим эксплуатации, необходимо разработать и внедрить АСУ свойствами ЯТ в процессе эксплуатации реактора типа ВВЭР-1000, что обеспечит удовлетворение требований регламента к надежности и безопасности эксплуатации ядерных энергоблоков при минимальном участии эксплуатационного персонала.

2) При управлении свойствами ТВЭЛ в нормальных условиях эксплуатации реактора типа ВВЭР-1000, для моделирования изменения параметра поврежденности оболочек ТВЭЛ $\omega(\tau)$ со временем целесообразно использовать ЭВП-метод расчета $\omega(\tau)$, который позволяет для нормальных условий эксплуатации ТВЭЛ учесть основной процесс накопления параметра поврежденности оболочек ТВЭЛ и определяющие $\omega(\tau)$ параметры.

3) Управлять свойствами ТВЭЛ на стадии эксплуатации реактора типа ВВЭР-1000 возможно путем оптимизации температурного режима теплоносителя, перестановок ТВС в АКЗ, а также баланса стационарного и переменного нагружения РУ, при этом целевая функция оптимизации параметров реактора будет включать безразмерные параметр поврежденности оболочек ТВЭЛ, глубину выгорания ЯТ и аксиальный офсет.

4) Принимая во внимание такое преимущество метода регулирования мощности энергоблока с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре $\langle t_1 \rangle = \text{const}$, как наиболее благоприятные условия для эксплуатации ЯТ АСУ свойствами ЯТ в процессе эксплуатации реактора типа ВВЭР-1000, целесообразно разработать для метода регулирования мощности энергоблока с $\langle t_1 \rangle = \text{const}$.

5) Оптимальные показатели безопасности и эффективности эксплуатации ЯТ реактора типа ВВЭР-1000 будут достигаться за счет внедрения АСУ свойствами ЯТ, в которой управляющими воздействиями будут изменение глубины погружения ОР СУЗ в АКЗ, изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе и изменение расположения ТВС в ячейках АКЗ в ходе плановых перегрузок ЯТ.

Список литературы:

1. Пельх С.Н. Основы управления свойствами ТВЭЛ ВВЭР. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. 160 с.

2. Пелих С.М., Фролов М.О., Наливайко А.В., Хуйю Чжоу. Автоматизована система керування властивостями ядерного палива ВВЕР-1000 з урахуванням параметра пошкодження оболонок твелів. Збірник «Наукові праці». Одеса, 2017. С. 1.

3. Овчинников Ф.Я. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. Москва, 1988. 359 с.
4. Review of fuel failures in water cooled reactors. IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-2.1. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. 191 p.
5. Соснин О.В. Энергетический вариант теории ползучести Новосибирск, 1986. 95 с.
6. Сузуки М. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения. Одесса, 2010. 248 с.

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ ПАЛИВА ВВЕР-1000 З ПІДТРИМАННЯМ ПОСТІЙНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОНОСІЯ

Обґрунтовано необхідність розробки і впровадження автоматизованої системи керування властивостями ядерного палива в процесі експлуатації реактора типу ВВЕР-1000 з постійною середньою температурою теплоносія першого контуру. Розглянуто принципи моделювання зміни властивостей твєлів з часом для нормальних умов експлуатації реактора. Показано, що керуючими впливами в автоматизованій системі керування властивостями ядерного палива будуть зміна положення в активній зоні регулюючих органів системи управління.

Ключові слова: автоматизована система керування, властивості ядерного палива, реактор ВВЕР-1000, активна зона, середня температура теплоносія.

THE SYSTEM FOR CONTROL OF VVER-1000 FUEL PROPERTIES WHEN KEEPING THE COOLANT TEMPERATURE CONSTANT

The necessity of the development and introduction of the automated control system of nuclear fuel properties during the operation of the WWER-1000 type reactor with the constant average temperature of the heat carrier of the first circuit was substantiated. The principles of modeling the change of the properties of telescopes with time for the normal conditions of operation of the reactor are considered. It is shown that the controlling influence in the ASA on the properties of the DP will change the position in the active zone of the regulatory authorities of the control system.

Key words: automated control system, nuclear fuel properties, VVER-1000 reactor, active zone, average coolant temperature.