

Легкие материалы после некоторой выдержки непосредственно на станции подвергаются окончательному захоронению. Через несколько сот лет их активность снизится до уровня, безопасного для окружающей среды. Заметим, между прочим, поскольку для твердых тел коэффициент диффузии составляет 10^{-5} см²/с, то за 300 лет радиоактивное захоронение распространится не более чем на 10 м от первоначального места.

Поступила в Редакцию 15.09.97

УДК 621.039.512.44

ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ВВЭР-440 ПО ПОКАЗАНИЯМ ВНЕРЕАКТОРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Камышан А.Н., Костицин А.Р., Лужнов А.М.,

Морозов В.В. (РНЦ «Курчатовский ин-т»),

Жернов В.С., Соколов И.В. (АО СНИИП),

Казаков В.А., Кряквин Л.В. (ВНИИАЭС),

Бекриев Д., Каменов К., Уручев В., Харалампиева Ц. (АЭС «Козлодуй»)

При разработке ВВЭР-440 не ставились жесткие требования к контролю распределения энерговыделения в активной зоне. Объяснялось это стабильностью энерго-распределения и значительными запасами до реализации критических тепловых режимов при нормальной эксплуатации реактора. Интегральный оперативный контроль энергонапряженности ТВС осуществлялся с помощью покассетного температурного контроля, при этом предусматривался неоперативный эпизодический контроль высотного энерговыделения в центральных каналах некоторых ТВС с помощью активационных измерений. Однако предназначенная для этой цели система «Волна» не обеспечила необходимой надежности эксплуатации и представительности измерений и была выведена из работы как морально устаревшая.

С течением времени требования повышения экономичности использования топлива, увеличения его энергонапряженности и ужесточения национальных и международных требований безопасности эксплуатации АЭС в целом и ядерного топлива в частности определили необходимость оперативного контроля неравномерности распределения энерговыделения в активной зоне. Впервые контроль пространственного распределения энерговыделения был реализован на ВВЭР-440 АЭС «Ловиса» с помощью внутриреакторных β -эмиссионных детекторов, затем сборки таких детекторов были включены в проект реакторной установки В-213 (Ровенская АЭС — блок 1, 2, АЭС «Пакш», Кольская АЭС - блок 3, 4 и т.д.). На ВВЭР-440 типа В-230 такой контроль распределения энерговыделения отсутствует, хотя требования контроля распределения энерговыделения в последнее время предъявляются и к реакторам данного типа. Так, согласно технологическому регламенту эксплуатации при работе реактора на мощности необходимо следить за тем, чтобы коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны не превышал установленный, а это невозможно без контроля неравномерности энерговыделения по высоте активной зоны. В частности, на Кольской АЭС (блок 1, 2) в некоторые ТВС были установлены сборки внутриреакторных детекторов. Однако такое дорогостоящее переоборудование реакторов не всегда оправдано.

Для контроля распределения энерговыделения в активных зонах реакторов большой мощности с водой под давлением широко применяются компьютерные системы, использующие показания вне реакторных детекторов нейтронов [1]. В России прототип подобной системы был установлен и испытан на Нововоронежской АЭС (блок 5) [2].

Преимущество вне реакторного контроля распределения энерговыделения по сравнению с чисто внутриреакторным контролем состоит в сокращении числа детекторов в активной зоне и, следовательно, мест уплотнения корпуса реактора, уменьшении дозовых нагрузок на персонал и объема работ, связанных с их извлечением. Последнее обусловлено невозможностью, как правило, повторного применения внутриреакторных детекторов в реакторах первого поколения. Поэтому было принято решение разработать систему вне реакторного контроля высотного распределения энерговыделения для действующих ВВЭР-440 типа В-230 с минимумом реконструкции штатных систем. Результаты работы, выполненной сотрудниками РНЦ «Курчатовский ин-т», ВНИИАЭС, АОЗТ СНИИП и АЭС «Козлодуй», приведены в настоящей статье.

Описание системы. Разработанная система предназначена для оперативного измерения среднего высотного распределения энерговыделения в активной зоне ВВЭР-440 с использованием сигналов вне реакторных детекторов нейтронов штатной аппаратуры контроля нейтронного потока «Иней». Ионизационные камеры энергетического диапазона аппаратуры контроля нейтронного потока «Иней» первого комплекта установили на высоте 187 см от низа активной зоны напротив верхней ее половины, второго комплекта — на высоте 62 см от низа активной зоны напротив ее нижней половины. Такое расположение ионизационных камер не приводит к существенному изменению показаний, но делает их чувствительными к перераспределению нейтронного потока по высоте активной зоны, в том числе при перемещении управляющей группы СУЗ. Ионизационные камеры энергетического диапазона первого и второго комплектов, расположенные таким образом в соседних каналах, условно (алгоритмом обработки показаний) объединяются в три сборки по две ионизационные камеры в каждой. Дополнительно на первом из оснащаемых системой реакторе в ее состав были

включены три нейтронных измерительных канала. Показания внутриреакторных детекторов использовали для калибровки системы и контроля корректности работы на первом этапе, в дальнейшем возможен отказ от их применения.

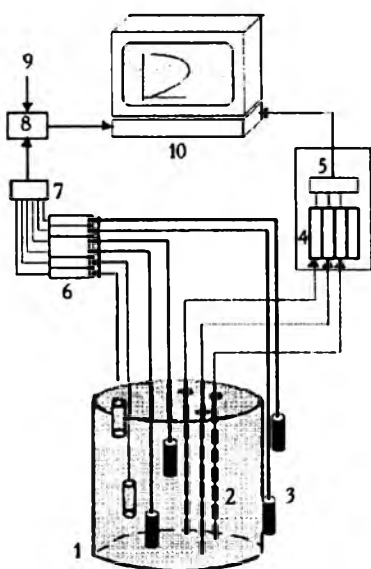
Структурная схема измерительной системы, установленной на 3-м блоке АЭС «Козлодуй», показана на рис. 1. В ее состав входят:

три нейтронных измерительных канала, которые имеют по семь распределенных по высоте активной зоны детекторов прямой зарядки (ДПЗ) и одному фоновому, размещенных в измерительных каналах системы «Волна» в кассетах с координатами 13-54, 10-47 и 09-60;

аналого-цифровые преобразователи сигналов ДПЗ в двоичный код и блок связи АЦП с персональным компьютером;

аппаратура коммутации измерения сигналов аппаратуры контроля нейтронного потока, в состав которой входят блок преобразования БПХ-19Р, предназначенный для гальванической развязки сигналов от датчиков «Иней», их преобразования в частоту следования импульсов с диапазоном изменения 0—50 кГц и передачи по длинной линии связи в устройства накопления и обработки, и устройство УНО-85Р1 для приема импульсной информации от аппаратуры контроля нейтронного потока или других источников сигналов, накопления информации в памяти и передачи этой информации в персональный компьютер для дальнейшей обработки;

персональный компьютер типа IBM PC/AT и линии связи.



Р и с. 1. Структурная схема измерительной системы: 1 — реактор; 2 — внутриреакторные ДПЗ; 3 — ионизационные камеры аппаратуры контроля нейтронного потока; 4 — АЦП; 5 — блок связи с персональным компьютером; 6 — каналы аппаратуры контроля нейтронного потока «Иней»; 7 — блок преобразования; 9 — информация о положении органов регулирования СУЗ; 10 — персональный компьютер

Таким образом, система включает 24 токовых канала от ДПЗ, шесть потенциальных каналов от аппаратуры контроля нейтронного потока «Иней» и три кодовых канала о положении приводов СУЗ. Измерительная система к аппаратуре «Иней» подключена через устройства гальванической развязки, исключающие возможность ложного срабатывания предупредительной и аварийной защиты.

По классификации методов измерений [3] в системе применен компараторный метод с измерительной системой в качестве прибора отклонения. Как всякий прибор отклонения описываемая система требует калибровки, поверки и при необходимости юстировки. Под калибровкой понимается операция определения и фиксации характеристик системы. Поверка — это совокупность операций, позволяющих проверить, что показания системы соответствуют установленной характеристике в пределах допустимой погрешности. Юстировка — это совокупность операций корректировки параметров системы, дающих возможность получить требуемую математическую модель измерительной системы. Калибровка и юстировка изменяют характеристики измерительной системы, поверка — контрольная процедура, квалифицирующая измерительную систему как годную или негодную. Все эти процедуры были применены к описываемой измерительной системе.

Система имеет два режима работы: рабочий, позволяющий собирать, накапливать, обрабатывать и отображать информацию, и режим проверки, обеспечивающий возможность контроля функций системы, реализуемых в рабочем режиме, на тестовых задачах.

Калибровка системы. Она заключается в определении для каждого вне реакторного детектора коэффициента C , характеризующего градиент зависимости показаний детектора от аксиального офсета при постоянстве всех прочих параметров состояния реактора. Как известно [4, 5], зависимость показаний D ионизационных камер энергетического диапазона, нормированных на тепловую мощность реактора, от аксиального офсета АО линейна:

$$D(t) = b_1 + b_2 \text{АО}(t). \quad (1)$$

Коэффициенты $b_{1,2}$ определяются в результате обработки экспериментальной информации, получаемой при проведении специальной программы испытаний. Так как невозможно обеспечить постоянство параметров состояния реактора при искусственном изменении аксиального офсета в случае перемещения управляющей группы СУЗ в ходе испытаний, то зависимость (1) рассматривается как регрессионная, коэффициенты $b_{1,2}$ определяются в результате регрессионного анализа данных испытаний. Аксиальный офсет при калибровке вычисляли по показаниям ДПЗ нейтронных измерительных каналов. Далее для каждой ионизационной камеры рассчитывали калибровочный коэффициент $C = b_1/b_2$.

В течение 13-й кампании было проведено несколько испытаний системы. В ходе каждого испытания перемещением управляющей группы СУЗ был реализован представительный набор состояний реактора, отличающихся распределением энерговыделения по высоте активной зоны. В каждом состоянии синхронно регистрировали сигналы ионизационных камер и ДПЗ, положение управляющей группы СУЗ, тепловую мощность. В табл. 1 приведены интервалы изменения во время испытаний основных параметров состояния реактора.

Полученные в результате регрессионного анализа экспериментальных данных калибровочные коэффициенты, а также расположение ионизационных камер (верхнее или нижнее) и их объединение в сборки приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 1. Характеристики испытаний

Параметр	Дата начала испытаний			
	15.01.95	21.01.95	20.04.95	11.11.95
Энерговыработка, эф.сут	10	15	95	256
Уровень тепловой мощности, %	75	100	100	100
Перемещение управляющей группы СУЗ, зона	КВ-5	КВ-8	9—6—8	9—6—8
АО, отн.ед.	0,1; -0,2	0,1; -0,1	0; -0,25	0,04; -0,21
Число зарегистрированных состояний	250	155	900	733

Т а б л и ц а 2. Результаты калибровки

Момент испытаний, эф.сут	Сборка 1		Сборка 2		Сборка 3	
	ИК1, C_n	ИК4, C_n	ИК2, C_n	ИК5, C_n	ИК3, C_n	ИК6, C_n
10-е	0,810	-1,28	0,841	-1,23	0,92	-1,24
15-е	0,953	-1,11	0,933	-1,10	1,07	-1,09
95-е	0,908	-1,21	0,906	-1,19	0,981	-1,16
256-е	0,836	-1,249	0,859	-1,191	0,908	-1,228

Калибровочные коэффициенты использовали для настройки системы, заключающейся в определении для каждой ионизационной камеры энергетического диапазона постоянного коэффициента, на который умножаются показания ионизационной камеры при работе системы в режиме контроля параметров:

$$k_n = [2 N(t)/D_n(t)] [1 + C_n AO(t)] / (1 - C_n/C_b);$$

$$k_b = [2 N(t)/D_b(t)] [1 + C_b AO(t)] / (1 - C_b/C_n),$$

где $D_n(t)$, $D_b(t)$ — показания нижней и верхней ионизационной камеры одной сборки.

Настройка системы проводится при стабильном состоянии реактора на мощности, близкой к номинальной, по известным значениям аксиального офсета и тепловой мощности $N(t)$. Рассчитанные для всех ионизационных камер коэффициенты настройки записываются на магнитный диск и используются в дальнейшем при работе системы в режиме контроля параметров реактора.

Из данных табл. 2 следует, что разность $C_n - C_b$ для ионизационных камер одной сборки в пределах погрешности, не превышающей 3%, не зависит от набора экспериментальных данных, описанных в табл. 1 и использованных при определении калибровочных коэффициентов. А так как аксиальный офсет, рассчитываемый по показаниям ионизационных камер одной сборки, как следует из формулы (1), задается выражением

$$AO_{ИК}(t) = -[D_b(t)/C_b + D_n(t)/C_n] / [D_b(t) + D_n(t)],$$

то истинный аксиальный офсет $AO(t)$ связан с $AO_{ИК}(t)$, как это можно показать, соотношением

$$AO_{ИК}(t) = AO(t) (C_{b,0} - C_{n,0}) / (C_b - C_n),$$

где $C_{b,0}$, $C_{n,0}$ — «истинные» калибровочные коэффициенты; C_b , C_n — коэффициенты, получаемые в результате регрессионного анализа экспериментальных данных и, следовательно, зависящие от выборки данных (предполагается, что настройка проводится при нулевом аксиальном офсете). Поскольку разность $C_n - C_b$ не зависит от момента

проведения калибровки, любой приведенный в табл. 2 набор калибровочных коэффициентов даст в пределах погрешности 3% одни и те же результаты при контроле вне-реакторной системой аксиального офсета. Выявленная закономерность фактически позволяет пренебречь погрешностью аксиального офсета, обусловленной особенностями калибровочного набора данных. Однако любой такой набор должен удовлетворять некоторым общим требованиям:

мощность реактора стабильна, не менее 50% номинальной и желательно близка к 100%;

в момент регистрации данных состояние реактора стабильно;

аксиальный офсет изменяется в широком диапазоне, не менее 15%, при этом желательно, чтобы интервал изменения аксиального офсета был симметричен относительно нуля;

если аксиальный офсет изменяется в процессе свободных ксеноновых колебаний, то все остальные параметры состояния реактора в процессе колебаний должны быть стабильны;

если аксиальный офсет изменяется в процессе перемещения управляющей группы СУЗ, то должны быть стабильны параметры состояния реактора, не связанные с воздействием перемещения управляющей группы СУЗ.

Алгоритмы обработки показаний ионизационных камер. Распределение энерговыделения по высоте активной зоны аппроксимировали рядом

$$F(z) = \sum_{n=1}^3 a_n f_n(z), \quad (2)$$

где $f_1(z) = \alpha_{11} \sin(z) + \alpha_{13} \sin(3z)$; $f_2(z) = \sin(2z)$; $f_3(z) = \alpha_{31} \sin(z) + \alpha_{33} \sin(3z)$ — набор базисных функций; α_{11} , α_{13} , α_{31} , α_{33} — набор априорно определяемых постоянных.

Для получения коэффициентов a_{1-3} — амплитуд гармоник высотного распределения энерговыделения по результатам настройки определяются показания верхнего и нижнего датчиков каждой сборки: $P_B = K_B D_B$; $P_H = K_H D_H$, где D_B , D_H — сигналы датчиков. Далее по показаниям датчиков оценивается аксиальный офсет:

$$AO_{ИК}(t) = -[P_B(t)/C_H + P_H(t)/C_B]/[P_B(t) + P_H(t)],$$

и тепловая мощность:

$$W(t) = P_B(t) + P_H(t),$$

после чего определяется коэффициент a_2 : $a_2(t) = AO_{ИК}(t) \pi / [h + h \cos(2\pi \Delta/h)]$, где $h = H + 2\Delta$; Δ — экстраполированная граница активной зоны; H — высота активной зоны. Затем по мощности $W(t)$ определяемому априорно коэффициенту $\alpha = a_3/a_1$ находят коэффициенты a_3 , a_1 — амплитуды 3-й и 1-й гармоник.

Результаты испытаний. В ходе испытаний (см. табл. 1) с помощью данной системы контролировали мощность, аксиальный офсет и среднее высотное распределение энерговыделения. В основе алгоритмов обработки показаний ионизационных камер использована математическая модель связи показаний вне реакторного детектора нейтронов с распределением энерговыделения в активной зоне [6], а также априорно определенные зависимости [5] (рис. 2). По такому формату выводятся в виде графиков и гистограмм положение управляющей группы СУЗ, восстановленное по показаниям

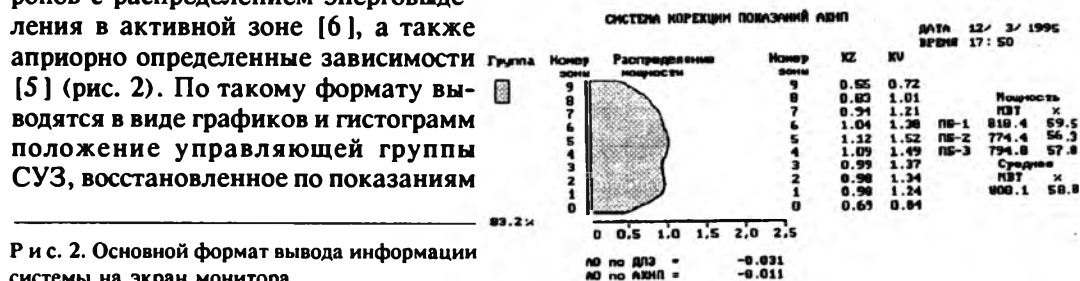


Рис. 2. Основной формат вывода информации системы на экран монитора

ионизационных камер среднее распределение энерговыделения (мощности) по высоте активной зоны и аналогичное распределение по показаниям внутриреакторных ДПЗ, в численном виде — аксиальный офсет, коэффициенты высотной и объемной неравномерности распределения энерговыделения по 10 слоям активной зоны, мощность реактора по трем каналам системы и ее среднее значение, а также дата и время.

Основные результаты испытаний в виде статистических оценок погрешности контроля аксиального офсета и коэффициента высотной неравномерности распределения энерговыделения, полученных путем сравнения с результатами внутриреакторных измерений, приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Результаты испытаний системы

Энерговыработка, эф.сут	Способ настройки	α	Максимальная оценка					
			$\Delta\alpha$	$\delta\alpha$, %	$\delta\sigma$, %	δAO , %	δk	
							расчет	эксперимент
10-е	10-10 (130)	0,39	0,06	3,6	1,1	0,6	3,8	1,9
15-е	10-10 (130)	0,39	0,07	4,3	1,5	1,4	4,8	2,3
95-е	10-10 (130)	0,21	0,06	4,0	2,7	7,1	8,6	4,9
256-е	10-10 (130)	0,06	0,04	2,5	5,0	15,4	16,4	10,2
95-е	10-95 (1)	0,21	0,06	4,0	2,7	1,3	5,0	3,2
256-е	10-256 (52)	0,06	0,04	2,5	5,0	0,9	5,7	5,1
10-е	95-10 (130)	0,39	0,06	3,6	1,1	0,9	3,9	1,9

Энерговыработка определяет испытания, данные которых обрабатывали для получения статистических оценок погрешностей контроля, способ настройки — данные, использованные при настройке системы. Например, запись 10-95(1) означает, что вне-реакторная система использует калибровочные коэффициенты, рассчитанные по испытаниям, проведенным на момент энерговыработки 10 эф.сут, настройка системы выполнена по первой записи (состоянию) испытаний при 95 эф.сут. Графа α — отношение амплитуды третьей базисной функции к амплитуде первой базисной функции (2), т.е. $\alpha = a_3/a_1$; $\Delta\alpha$ — модуль максимального абсолютного отклонения реальных значений α по измерениям с помощью ДПЗ от использованного вне-реакторной системой в период испытаний; $\delta\alpha$ — оценка сверху относительной погрешности определения коэффициента высотной неравномерности энерговыделения из-за отклонения в период испытаний реальных α от использованного вне-реакторной системой: $\max(\delta\alpha) = 0,7 \max(\Delta\alpha)/(1 + \alpha)^2$. Графа $\delta\sigma$ дает оценку сверху с 95%-ной доверительной вероятностью относительной погрешности коэффициента высотной неравномерности энерговыделения, обусловленной выбором вида аппроксимации (2) высотного энерговыделения: $\max(\delta\sigma) = (\langle\sigma\rangle + 2\sigma_\sigma) 100\%$, где $\langle\sigma\rangle$ — среднее по всем состояниям $\delta\sigma$; σ_σ — стандартное отклонение $\delta\sigma$ от средней $\langle\sigma\rangle$. Графа δAO дает оценку с 95%-ной доверительной вероятностью относительной погрешности коэффициента высотной неравномерности энерговыделения из-за неточности определения вне-реакторной системой аксиального офсета: $\max(\delta AO) = (\pi/2) (\Delta AO + 2\sigma_{AO}) 100\%$, где ΔAO , σ_{AO} — среднее и стандартное отклонение погрешности определения вне-реакторной системой аксиального офсета на выборке состояний реактора, зарегистрированных при испытании. В последних двух графах табл. 3 приведена расчетная оценка относительной погрешности коэффициента высотной неравномерности энерговыделения, рассчитанной по формуле

$$\max(\delta k) = [\max^2(\delta\alpha) + \max^2(\delta\sigma) + \max^2(\delta AO)]^{1/2},$$

и экспериментальная погрешность, дающая оценку сверху с 95%-ной доверительной вероятностью относительной погрешности коэффициента высотной неравномерности энерговыделения. Эта оценка получена в результате непосредственного сравнения высотного распределения энерговыделения, восстановленного по показаниям вне реакторных ионизационных камер энергетического диапазона и внутриреакторных ДПЗ: $\max(\delta k) = \langle \delta k \rangle + 2\sigma_k$, где $\langle \delta k \rangle$, σ_k — среднее и стандартное отклонение δk от среднего $\langle \delta k \rangle$ на выборке из зарегистрированных в ходе испытаний состояний реактора.

Результаты испытаний на 10, 15, 95, 256-е эф.сут 13-й кампании 3-го блока АЭС «Козлодуй» в случае всего одной настройки вне реакторной системы в начале кампании на 10-е эф.сут, когда определили калибровочные коэффициенты и затем для состояния 130 с АО = 0 настроили систему, приведены в 1, 2, 3, 4-й строках табл. 3. Из параметров, используемых вне реакторной системой, менялось только α . Значения параметра α , являющегося медленно меняющейся функцией энерговыработки, были предварительно затабулированы по результатам прогнозных расчетов по программе БИПР-7 и затем использованы в системе для восстановления среднего высотного распределения энерговыделения.

Результаты этой группы испытаний показывают, что даже при одной настройке вне реакторной системы в начале кампании и последующей эксплуатации в течение всей кампании абсолютная погрешность аксиального офсета не превышает 0,05, относительная погрешность коэффициента высотной неравномерности не превышает 5%.

Результаты испытаний на 95-е эф.сут при тех же калибровочных коэффициентах, но с дополнительной настройкой в начале испытаний (5-я строка) приводят к уменьшению верхней границы абсолютной погрешности определения аксиального офсета до 0,008 и границы относительной погрешности коэффициента высотной неравномерности энерговыделения k_z до 3,2%. Аналогичные результаты приведены и в последних двух строках, что в целом подтверждает сделанный ранее вывод о независимости результатов вне реакторной системы от набора данных, по которым рассчитаны калибровочные коэффициенты.

Заключение. В результате проделанной работы определена структура и состав технических средств вне реакторной системы измерения неравномерности энерговыделения в активной зоне ВВЭР-440, позволившие решить поставленную задачу с максимальным использованием средств штатных систем без побочного воздействия на последние.

Анализ погрешности измерения среднего аксиального распределения энерговыделения показал, что система вне реакторного измерения неравномерности энерговыделения удовлетворяет предъявляемым к ней техническим требованиям. В дальнейшем ее калибровка может выполняться не только по данным нейтронно-измерительных каналов, но и по нейтронно-физическим расчетам, моделирующим калибровочные испытания. Первый головной образец вне реакторной системы измерения установлен на 3-м блоке АЭС «Козлодуй». Результаты испытания системы в течение 13-й кампании подтвердили работоспособность метода измерения, алгоритмического и программного обеспечения, а также надежность аппаратных средств. В настоящее время аналогичная система установлена и на 2-м блоке АЭС «Козлодуй», планируется ее установка на 1-м и 4-м блоках. Доработанное программное обеспечение системы позволило включить ее в состав общеблочной компьютерной сети и выводить результаты измерений по запросу оператора на монитор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камышан А.Н., Лужнов А.М., Морозов В.В. и др. Вне реакторный контроль энергораспределения в реакторах PWR. — Атомная техника за рубежом, 1986, № 9, с. 3—8.

2. Жернов В.С., Звездочкина В.Б., Каленский М.С. и др. Испытание прототипа системы вне реакторного контроля мощности реактора и ее распределения по объему активной зоны. — Атомная энергия, 1988, т. 64, вып. 3, с. 174—180.
3. Пиотровский Я. Теория измерений для инженеров. Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
4. Камышан А.Н., Крайнов Ю.А., Лужнов А.М. и др. Исследование влияния неравномерности энерго-распределения на показания вне реакторных ионизационных камер. — Атомная энергия, 1985, т. 58, вып. 2, с. 91—93.
5. Костицин А.Р., Лужнов А.М., Филимонов В.А. и др. Повышение точности контроля тепловой мощности ВВЭР-1000. — Там же, 1991, т. 71, вып. 5, с. 379—386.
6. Жернов В.С., Звездочкина В.Б., Камышан А.Н. и др. Математическая модель связи показаний уставовленного вне реактора нейтронного детектора с распределением мощности в активной зоне. — Там же, 1988, т. 64, вып. 3, с. 180—188.

Поступила в Редакцию 17.12.97

УДК 621.039.51

ОПТИМАЛЬНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕАКТОРА В РЕЖИМЕ ПРОДЛЕНИЯ КАМПАНИИ ЗА СЧЕТ ПОДАВЛЕНИЯ ОТРАВЛЕНИЯ КСЕНОНОМ

Виногоров Н.А. (НИТИ им. А.П. Александрова)

Под режимом продления кампании понимается этап эксплуатации реактора, следующий за моментом исчерпания запаса реактивности на выгорание. Продление кампании реакторов водо-водяного типа обеспечивается обычно (смотри, к примеру, работы [1—3]) за счет отрицательного мощностного и температурного эффектов реактивности. Снижение параметров первого контура относительно номинальных значений позволяет высвободить дополнительный запас реактивности.

Принципиально иначе режим продления кампании проводится при циклическом изменении мощности реактора и подавлении отравления ^{135}Xe [4], когда каждый цикл содержит последовательные временные интервалы, на которых мощность соответственно понижается, поддерживается на пониженном уровне, повышается, поддерживается на повышенном уровне. На первом интервале за счет мощностного эффекта высвобождается запас реактивности, который частично расходуется на втором интервале при отравлении реактора. К концу второго интервала запас должен быть достаточным для увеличения мощности. При повышении мощности на третьем интервале выжигается избыточный ксенон, что позволяет вывести реактор на высокий (в частности, номинальный) уровень мощности и поддерживать этот уровень в течение последнего интервала. Дальнейшая работа реактора требует повторения цикла.

Циклический режим продления кампании в сравнении с режимом со снижением параметров теплоносителя имеет преимущества: энергетическое оборудование эксплуатируется в штатных режимах, нет существенного снижения к.п.д. энергоблока, режим не требует специальной подготовки оборудования, что может быть особенно важным, если необходимость продления кампании возникает экстренно из-за дефицита электроэнергии в энергосистеме, при продолжительности цикла, равной 24 ч, режим может соответствовать режиму следования за нагрузкой, что облегчает регулирование точной нагрузки в энергосистеме.

Экономическая эффективность циклического режима требует достижения максимально возможной энерговыработки в каждом цикле. Следовательно, может быть поставлена задача нахождения оптимального управления, обеспечивающего максимум энерговыработки в режиме. Задача относится к классу ксеноновых оптимизационных задач. Ее постановка и решение, что и является целью настоящей статьи, проводятся с использованием формализма принципа максимума [5] в точечной модели кинетики подобно [6], где этот класс задач подробно рассмотрен.