

М. В. Максимов¹, С. Н. Пелых¹,
Т. А. Цисельская¹, В. Е. Баскаков²

¹ Одесский национальный политехнический университет

² Запорожская АЭС

Способ стабилизации аксиального распределения нейтронного поля при маневрировании мощностью ВВЭР-1000

Рассмотрены принципы стабилизации аксиального распределения нейтронного поля при маневрировании мощностью ВВЭР-1000 путем использования физических свойств, внутренне присущих активной зоне реактора.

Ключевые слова: температурный режим теплоносителя, маневрирование мощностью реактора, стабильность аксиального офсета.

М. В. Максимов, С. М. Пелих, Т. О. Цисильска, В. Е. Баскаков

Спосіб стабілізації аксіального розподілу нейтронного поля під час маневрування потужністю ВВЕР-1000

Розглянуто принципи стабілізації аксіального розподілу нейтронного поля під час маневрування потужністю ВВЕР-1000 шляхом використання фізичних властивостей, внутрішньо притаманних активній зоні реактора.

Ключові слова: температурний режим теплоносія, маневрування потужністю реактора, стабільність аксіального офсету.

© М. В. Максимов, С. Н. Пелых, Т. А. Цисельская, В. Е. Баскаков, 2011

Испытания режима суточного маневрирования мощностью, проведенные в 1998 г. на энергоблоке № 5 Запорожской АЭС, продемонстрировали реальную возможность его работы в суточном графике нагрузки [1]. Развитие методов управления энерговыделением в активной зоне ВВЭР-1000 в нестационарных режимах работы включает разработку усовершенствованных алгоритмов управления для реактора ВВЭР-1000.

Одной из важнейших задач управления нейтронным полем реакторной установки (РУ) при маневрировании мощностью является предотвращение и подавление высотных ксеноновых колебаний энергораспределения в активной зоне (АКЗ), что сводится к управлению величиной аксиального офсета (АО) [1].

Известный метод регулирования мощности РУ с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре имеет такие важные преимущества, как наиболее благоприятные условия для работы оборудования первого контура, а также возможность регулирования реактора за счет температурного эффекта реактивности, что минимизирует необходимое для обеспечения стабильности поля энерговыделения воздействие на органы регулирования (ОР) системы управления и защиты (СУЗ).

Однако данный метод имеет такой существенный недостаток, как значительное повышение давления пара во втором контуре при снижении мощности энергоблока, что требует проектирования парогенераторов и главного парового коллектора (ГПК) для работы с давлением, превышающим номинальное.

Для действующих энергоблоков НАЭК «Энергоатом» с ВВЭР-1000 представляет интерес разработка усовершенствованных алгоритмов маневрирования мощностью РУ, которые обеспечивают одновременно: максимальную стабильность поля энерговыделения; максимально благоприятные условия для эксплуатации оборудования первого контура, включая твэлы; не требуют использования дополнительных регулирующих групп СУЗ реактора и существенного изменения регламента эксплуатации РУ [2].

Известно, что нестационарное отравление реактора вносит положительную обратную связь в любое отклонение нейтронного потока. Поскольку эффект реактивности по температуре теплоносителя относится к быстрым эффектам, а отравление — к медленным эффектам, совпадающим по знаку с изменением нейтронного потока за счет данного эффекта реактивности и усиливающим его за счет положительной обратной связи, можно выдвинуть предположение, что практически контроль энерговыделения в АКЗ при маневрировании мощностью РУ можно обеспечить выбором такого температурного режима теплоносителя, которому соответствует максимальная аксиальная стабильность поля энерговыделения.

Целью статьи является определение эффективности способа стабилизации аксиального распределения нейтронного поля при маневрировании мощностью ВВЭР-1000 за счет использования эффекта реактивности по температуре теплоносителя.

Аксиальная стабильность поля энерговыделения описывается с помощью аксиального офсета АО [3]:

$$AO = \frac{N_B - N_H}{N_{AK3}}, \quad (1)$$

где N_B , N_H , N_{AK3} — соответственно мощность верхней, нижней половины АКЗ и мощность всей АКЗ.

Запишем переменные, входящие в (1), через достаточ- но малые отклонения от соответствующих стационарных значений:

$$\begin{aligned} AO &= AO_0 + \delta AO; \quad N_B = N_{B,0} + \delta N_B; \\ N_H &= N_{H,0} + \delta N_H; \quad N_{AK3} = N_{AK3,0} + \delta N_{AK3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $AO_0, N_{B,0}, N_{H,0}, N_{AK3,0}$ — стационарные значения соот- ветственно аксиального офсета, мощности верхней, ниж- ней половины АКЗ и мощности всей АКЗ; $\delta AO, \delta N_B, \delta N_H, \delta N_{AK3}$ — достаточно малые (для линеаризации вы- ражения, записанного в отклонениях) отклонения от ста- ционарных значений соответственно аксиального офсета, мощности верхней, нижней половины АКЗ и мощности всей АКЗ.

Для малых отклонений мощности верхней и нижней половины АКЗ при малом отклонении (в результате ма- невраживания мощностью РУ) средней температуры теп- лоносителя $\delta < T >$ в соответствующей половине АКЗ справедливы выражения

$$\delta N_B = \frac{\delta N}{\delta < T >} \cdot \delta < T_B >; \quad \delta N_H = \frac{\delta N}{\delta < T >} \cdot \delta < T_H >, \quad (3)$$

где $\delta < T_B >, \delta < T_H >$ — малое отклонение средней темпе- ратуры теплоносителя в верхней и нижней половине АКЗ, соответственно; $\delta N_B, \delta N_H$ — малое отклонение мощности верхней и нижней половины АКЗ при малом отклонении средней температуры теплоносителя $\delta < T_B >, \delta < T_H >$, соответственно;

$\frac{\delta N}{\delta < T >}$ — отношение отклонения мощ- ности РУ к отклонению средней температуры теплоноси- теля в АКЗ, определяемое как

$$\frac{\delta N}{\delta < T >} = \frac{\delta \rho / \delta < T >}{\delta \rho / \delta N} = \frac{k_T}{k_N}, \quad (4)$$

где k_T, k_N — температурный и мощностный коэффици- ент реактивности ρ , соответственно.

После подстановки выражений (2), (3) в (1) и линеари- зации получим выражение для малого отклонения акси- ального офсета при малом отклонении мощности РУ:

$$\delta AO = \frac{\delta N}{\delta < T >} \cdot N_{AK3,0}^{-1} \cdot [(1 - AO_0) \cdot \delta < T_B > - (1 + AO_0) \cdot \delta < T_H >]. \quad (5)$$

В случае справедливости допущения $AO_0 \ll 1$ (6)

выражение (5) упрощается:

$$\delta AO = \frac{\delta N}{\delta < T >} \cdot N_{AK3,0}^{-1} \cdot [\delta < T_B > - \delta < T_H >]. \quad (7)$$

Из (7) следует критерий эффективности температур- ного режима теплоносителя с точки зрения стабильности аксиального офсета в ходе маневрирования мощностью РУ по какой-либо программе регулирования (ПР):

$$\min \left| \sum_{i=1}^m (\delta < T_B > - \delta < T_H >) \right|, \quad (8)$$

где i — номер шага по мощности (малого изменения мощ- ности); m — количество шагов по мощности в каком-либо направлении при маневре мощностью РУ.

Использование критерия (8) позволяет обоснованно выбирать температурный режим теплоносителя, позволя- ющий обеспечить максимальную стабильность поля энер- говыделения при маневрировании мощностью РУ.

Поскольку Хмельницкая АЭС является базовой для исследования переменных режимов эксплуатации энер- гоблоков с ВВЭР-1000 НАЭК «Энергоатом», для примера рассмотрим маневрирование мощностью РУ с ВВЭР-1000 энергоблока № 2 этой станции, на котором используется усовершенствованный алгоритм управления мощностью АКЗ (У-алгоритм).

Рассмотрим три программы суточного маневра мощ- ностью ВВЭР-1000:

ПР № 1 — программа с постоянной входной темпера- турой теплоносителя;

ПР № 2 — программа с постоянной средней температу- рой теплоносителя;

ПР № 3 — программа, промежуточная между ПР № 1 и ПР № 2, при которой входная температура теплоноси- теля при снижении мощности РУ со 100 % до 80 % $N_{ном}$ увеличивается на 1 °С.

Поскольку ПР с постоянной средней температурой теплоносителя достаточно хорошо известна, ограничим- ся описанием ПР № 1. Пусть энергоблок работает на но- минальной мощности, ксеноновые колебания подавле- ны перемещением регулирующей (десятой) группы СУЗ. Исходное положение нижнего края поглощающей части регулирующей группы СУЗ перед снижением мощности реактора с $N_1 = 100$ % до $N_3 = 80$ % задавалось величиной $H_0 = 90$ % от низа АКЗ.

Первоначальное снижение (до 90 %) мощности РУ осуществляется вводом раствора борной кислоты и под- держкой при этом неизменной температуры теплоно- сителя на входе в реактор за счет повышения давления в ГПК. Вводом регулирующей группы поддерживается оптимальный мгновенный АО как гарантия невозникно- вения ксеноновых колебаний [4]. В дальнейшем снижение мощности происходит за счет отравления. Оптимальный мгновенный АО удерживается изменением положения ре- гулирующей группы. Приблизительно через два-три часа мощность реактора достигнет 80 % и стабилизируется вводом чистого дистиллята. После прохождения миниму- ма «йодной ямы» мощность РУ частично восстановится за счёт разотравления.

Для восстановления номинальной мощности РУ вводит- ся чистый дистиллят в контур с одновременным снижени- ем давления в ГПК, что позволяет сохранить постоянной температуру входа. Регулирующая группа СУЗ извлекает- ся 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.

ПР № 1, подразумевающая при суточном маневре мощ- ностью в пределах от 100 до 80 % номинала поддержание постоянной входной температуры теплоносителя $T_{вх}$ при изменении давления пара в ГПК в пределах 5,8–6,0 МПа, имеет преимущества ПР № 2 с постоянной средней тем- пературой теплоносителя в первом контуре $< T >$. При этом за счет поддержания давления пара в парогенераторе в регламентных пределах предлагаемый алгоритм лишен недостатков, присущих ПР с постоянной $< T >$.

Сравнение указанных трех ПР суточного маневра мощностью выполнялось с помощью программы ИР [5].

Распределение шлаков в АКЗ задавалось для момента начала 5-й кампании энергоблока № 2 Хмельницкой АЭС. На данный момент кампании (время начала маневра) рассчитывалось первое состояние реактора ВВЭР-1000 с равновесным распределением ксенона. Для последующих состояний с учетом выгорания топлива рассчитывалось неравновесное распределение ксенона и самария. Входное давление и расход теплоносителя задавались постоянными и равными 16 МПа и $84 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$, соответственно. Входная температура теплоносителя при изменении мощности РУ от 100 до 80 % по ПР № 1 задавалась равной $T_{\text{вх}} = 287 \text{ }^\circ\text{C}$. В случае использования ПР № 2 входная температура теплоносителя задавалась переменной в соответствии с данными табл. 1.

Таблица 1. Изменение входной температуры теплоносителя при $\langle T \rangle = \text{const}$

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

ПР № 2 рассматривалась в двух вариантах, отличающихся максимальной амплитудой ΔH перемещения ОР СУЗ в ходе маневра мощностью РУ:

- программа регулирования № 2а: $\Delta H = 4 \%$;
- программа регулирования № 2б: $\Delta H = 6 \%$.

Изменение мощности реактора в зависимости от времени задавалось для всех ПР (№№ 1, 2а, 2б, 3) по одному временному графику (рис. 1).

Для всех ПР принималось, что при снижении мощности с $N_1 = 100 \%$ до $N_2 = 90 \%$ в течение 0,5 ч мощность изменяется по линейному закону со скоростью $dN_{1-2}/d\tau = -2 \%/6 \text{ мин}$ за счет ввода борной кислоты (параметр критичности — концентрация борной кислоты в теплоносителе). Кроме того, для всех ПР полагалось, что при снижении мощности с $N_2 = 90 \%$ до $N_3 = 80 \%$ в течение 2,5 ч мощность изменяется по линейному закону со скоростью $dN_{2-3}/d\tau = -0,4 \%/6 \text{ мин}$ за счет отравления реактора (параметр критичности не задается); при выдержке РУ на уровне мощности $N_3 = 80 \%$ в течение 4 ч параметр критичности — концентрация борной кислоты в теплоносителе; при увеличении мощности с $N_3 = 80 \%$ до $N_1 = 100 \%$ в течение 2 ч мощность изменяется по линейному закону со скоростью $dN_{3-1}/d\tau = 1,0 \%/6 \text{ мин}$ за

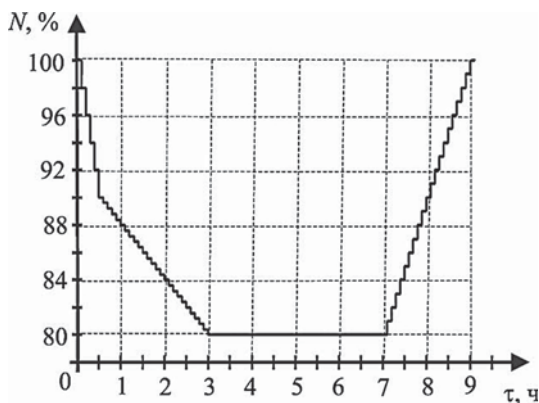


Рис. 1. Изменение мощности реактора в зависимости от времени

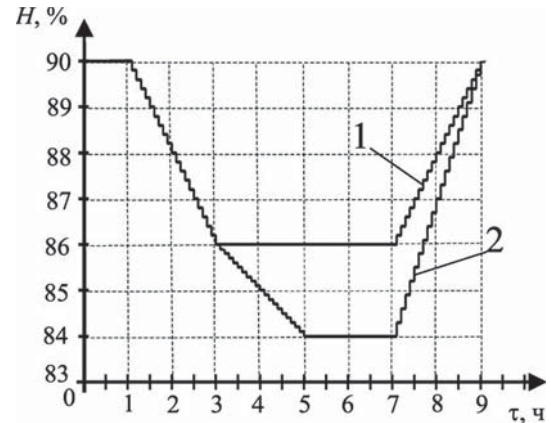


Рис. 2. Изменение положения регулирующей группы СУЗ в зависимости от времени: 1 — для ПР № 1, № 2а, № 3; 2 — для ПР № 2б

счет ввода чистого дистиллята при одновременном возврате регулирующей группы СУЗ в регламентное положение (параметр критичности — концентрация борной кислоты в теплоносителе).

При подъеме мощности с $N_3 = 80 \%$ до $N_1 = 100 \%$ изменение положения регулирующей группы СУЗ реактора в зависимости от времени задавалось для ПР №№ 1, 2а, 3 с учетом амплитуды перемещения ОР $\Delta H^{\text{max}} = 4 \%$, а для ПР № 2б — с учетом $\Delta H^{\text{max}} = 6 \%$ (рис. 2).

Таким образом, моделирование управления реактором в неравновесном состоянии выполнялось путем задания следующих управляющих параметров: параметра критичности; $T_{\text{вх},0}$; $dT_{\text{вх}}/dN$; N_1 ; N_2 ; N_3 ; H_0 ; ΔH^{max} ; $dN/d\tau$.

Пусть $k_q(j)$ — относительная мощность j -й ТВС. Тогда тепловая мощность j -й ТВС Q_j находится как

$$Q_j = k_q(j) \cdot \langle Q_{\text{ТВС}} \rangle, \quad (9)$$

где $\langle Q_{\text{ТВС}} \rangle$ — средняя мощность ТВС по АКЗ.

Средняя линейная мощность j -й ТВС

$$\langle q_{l,j} \rangle = \frac{Q_j}{n_{\text{ТВ}} \cdot l_{\text{ТВ}}}, \quad (10)$$

где $n_{\text{ТВ}} = 312$ — количество ТВЭлов в ТВС; $l_{\text{ТВ}} = 3,5 \text{ м}$ — длина ТВЭла.

Средняя линейная мощность по АКЗ

$$\langle q_l \rangle = \frac{\langle Q_{\text{ТВС}} \rangle}{n_{\text{ТВ}} \cdot l_{\text{ТВ}}}. \quad (11)$$

Полагая, что количество ТВС в АКЗ составляет 163, при мощности РУ $N = 100 \%$ (тепловой мощности АКЗ 3000 МВт) имеем $\langle Q_{\text{ТВС}} \rangle = 18,405 \text{ МВт}$, $\langle q_l \rangle = 168,5 \text{ Вт/см}$. При $N = 80 \%$ получаем $\langle Q_{\text{ТВС}} \rangle = 14,724 \text{ МВт}$, $\langle q_l \rangle = 134,8 \text{ Вт/см}$.

В программе ИР [5] высота ТВЭла условно делится на m аксиальных слоев. Обозначив тепловую мощность i -го (нумерация от низа АКЗ) аксиального слоя j -й ТВС, т. е. расчетной ячейки (i, j) , через $Q_{i,j}$, запишем выражение для тепловой мощности j -й ТВС:

$$Q_j = \sum_{i=1}^m \frac{k_{v,i,j}}{m} \langle Q_{\text{ТВС}} \rangle, \quad (12)$$

где $k_{v,i,j}$ — относительная мощность расчетной ячейки (i, j) :

$$k_{v,i,j} = Q_{i,j} / \langle Q_{\text{сл}} \rangle, \quad (13)$$

где $\langle Q_{\text{ТВС}} \rangle / m \langle Q_{\text{сл}} \rangle$ — средняя мощность аксиального слоя; m — количество расчетных аксиальных слоев в ТВС; $\langle Q_{\text{сл}} \rangle = 1,150$ МВт при $N = 100 \%$, $\langle Q_{\text{сл}} \rangle = 0,920$ МВт при $N = 80 \%$.

Из выражений (11)—(13) следует соотношение для средней линейной мощности в i -м аксиальном слое j -й ТВС

$$\langle q_{l,i,j} \rangle = k_{v,i,j} \cdot \langle q_l \rangle. \quad (14)$$

Из (14) получаем выражение для средней линейной мощности в i -м аксиальном слое АКЗ:

$$\langle q_{l,i} \rangle = k_{v,i} \cdot \langle q_l \rangle. \quad (15)$$

Для расчета распределения температуры теплоносителя по аксиальным сегментам при использовании различных ПР представим $\langle q_{l,i} \rangle$ через максимальную по всем аксиальным сегментам линейную мощность $q_{l,\text{max}}$ в следующем виде:

$$\langle q_{l,i} \rangle = k_i \cdot q_{l,\text{max}}, \quad (16)$$

где k_i — коэффициент линейной мощности для i -го сегмента.

Задавая режимные характеристики РУ ВВЭР-1000 в соответствии с [6], с помощью программы ИР для рассматриваемых ПР рассчитано изменение распределения линейной мощности по восьми аксиальным слоям АКЗ при изменении мощности ВВЭР-1000 от 100 % до 80 % $N_{\text{ном}}$, после чего с помощью соотношения (16) получены значения k_i (табл. 2).

Значения k_i для ПР № 26 в табл. 2 не приводятся, поскольку сравнивать эффективность различных ПР с помощью критерия (8) имеет смысл только для ПР с одинаковой амплитудой перемещения ОР СУЗ.

Введем для краткости обозначение

$$\Delta \delta T \equiv \delta \langle T_{\text{в}} \rangle - \delta \langle T_{\text{н}} \rangle. \quad (17)$$

Приняв в качестве исходных данных полученные для ПР №№ 1, 2а, 3 распределения средней линейной

Таблица 2. Распределение коэффициентов линейной мощности k_i по аксиальным слоям АКЗ для ПР №№ 1, 2а, 3

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

Примечание. При $\tau = 0,1$ ч (время начала маневра мощностью РУ) коэффициенты k_i имеют одинаковые значения для всех трех программ регулирования.

мощности по аксиальным слоям АКЗ, с помощью программы FEMAXI [7] найдены значения средней температуры теплоносителя в верхней и нижней половине АКЗ с временным шагом 0,5 ч. Далее по имеющимся значениям $\langle T_{\text{в}} \rangle$ и $\langle T_{\text{н}} \rangle$ рассчитаны $\delta \langle T_{\text{в}} \rangle$ и $\delta \langle T_{\text{н}} \rangle$ при снижении мощности РУ от 100 до 80 % $N_{\text{НОМ}}$, что дало возможность найти

число $\left| \sum_{i=1}^6 \Delta \delta T \right|$ для трех указанных ПР (табл. 3).

Используя критерий (8), на основании данных, приведенных в табл. 3, можно сделать вывод, что, с точки зрения стабильности АО, температурный режим ПР № 1 лучше, чем № 2а и № 3, а температурный режим ПР № 2а — наихудший.

Для проверки вывода, полученного на основании критерия (8), целесообразно сравнить легкость стабилизации АО при маневрировании мощностью РУ ВВЭР-1000 по указанным ПР с помощью расчета расходимости графиков мгновенного и равновесного офсетов в ходе маневра [1] (рис. 3).

Амплитуда перемещения регулирующей группы СУЗ в ходе маневра по программам регулирования с $T_{\text{вх}} = \text{const}$, $\langle T \rangle = \text{const}$ и программе с увеличением $T_{\text{вх}}$ на 1 °С в ходе снижения мощности РУ от 100 до 80 % $N_{\text{НОМ}}$ одинакова (4 %), но максимальное расхождение графиков мгновенного и равновесного офсетов по программе с $T_{\text{вх}} = \text{const}$ (приблизительно 1,9 %) меньше, чем по программе с $\langle T \rangle = \text{const}$ (приблизительно 3 %) и по программе с увеличением $T_{\text{вх}}$ на 1 °С (приблизительно 2,3 %).

Этот результат подтверждает полученный ранее с помощью критерия (8) вывод о том, что, с точки зрения

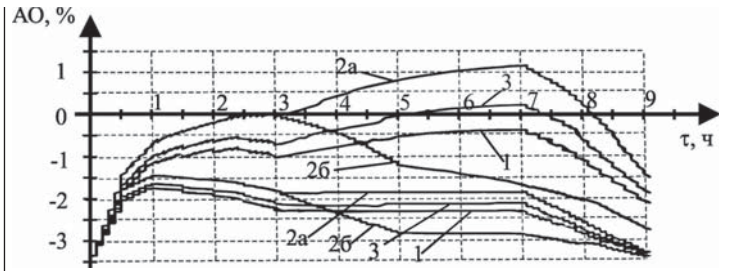


Рис. 3. Изменение аксиального офсета в зависимости от времени для ПР №№ 1, 2а, 2б, 3 (нижние линии — равновесный АО, верхние — мгновенный АО)

стабильности аксиального распределения энерговыделения в АКЗ при изменении мощности РУ от 100 до 80 % $N_{\text{НОМ}}$, при прочих равных условиях, программа регулирования с $T_{\text{вх}} = \text{const}$ эффективнее программы с $\langle T \rangle = \text{const}$ и программы с увеличением $T_{\text{вх}}$ на 1 °С (см. табл. 3).

Если для программы регулирования с $\langle T \rangle = \text{const}$ амплитуда перемещения ΔH^{max} регулирующей группы СУЗ в ходе маневра увеличена с 4 до 6 %, то максимальное расхождение графиков мгновенного и равновесного офсетов уменьшается от 3 до 1,9 % (см. рис. 3).

Следовательно, при использовании программы регулирования с $\langle T \rangle = \text{const}$ в режиме суточного маневра мощностью ВВЭР-1000 для достижения стабильности аксиального распределения энерговыделения в АКЗ необходимо перемещение ОР СУЗ с большей максимальной амплитудой, чем при использовании программы с $T_{\text{вх}} = \text{const}$, при прочих равных условиях.

Таблица 3. Средняя температура теплоносителя в верхней и нижней половинах АКЗ для ПР №№ 1, 2а, 3

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

Выводы

1. Аксиальное распределение нейтронного поля в активной зоне реактора ВВЭР-1000 при маневрировании мощностью РУ можно значительно стабилизировать путем выбора наилучшего температурного режима теплоносителя. Амплитуда необходимого для стабилизации аксиального офсета перемещения регулирующей группы СУЗ при маневрировании мощностью РУ по программе регулирования с постоянной входной температурой теплоносителя и максимальном расхождении графиков мгновенного и равновесного офсетов 1,9 % составляет 4 %, тогда как при маневрировании мощностью по программе с постоянной средней температурой теплоносителя, при прочих равных условиях, амплитуда требуемого перемещения регулирующей группы составляет 6 %.

2. Использование критерия эффективности температурного режима теплоносителя позволяет обоснованно определить наилучший температурный режим теплоносителя с точки зрения обеспечения максимальной стабильности поля энерговыделения при маневрировании мощностью РУ.

3. Поскольку при маневрировании мощностью ВВЭР-1000 по программе регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя амплитуда необходимого перемещения ОР СУЗ, при прочих равных условиях, на 50 % больше, чем по программе регулирования с постоянной входной температурой теплоносителя, происходит увеличение амплитуды скачка линейной мощности твэлов при каждом маневрировании, особенно вблизи концевиков ОР, что при большом числе суточных циклов нагружения РУ (порядка 1000) будет существенно уменьшать долговечность оболочек твэлов в переменном режиме нагружения РУ по сравнению с маневрированием мощностью РУ по программе регулирования с постоянной входной температурой теплоносителя [8].

Список литературы

1. 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 Междунар. науч.-техн. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». — М.: РНЦ «Курчатовский ин-т», 2001. — С. 271–276.
2. 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, No. 12. — P. 3021–3026.
3. Филипчук Е. В. Управление нейтронным полем ядерного реактора / Е. В. Филипчук, П. Т. Потапенко, В. В. Постников. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 280 с.
4. 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, вып. 4. — С. 183–190.
5. 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, вып. 6. — С. 560–563.
6. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций / [Шмелев В. Д., Драгунов Ю. Г., Денисов В. П., Васильченко И. Н.]. — М.: Академкнига, 2004. — 220 с.
7. Сузуки М. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения / Пер. с англ. С. Н. Пельх; под ред. М. В. Максимова. — Одесса: Астропринт, 2010. — 248 с.
8. Метод оценки эксплуатационного ресурса оболочки твэла легководного реактора в различных режимах нагружения / М. В. Максимов, С. Н. Пельх, О. В. Маслов, В. Е. Баскаков // Атомная энергия. — 2010. — Т. 108, вып. 5. — С. 294–299.

Надійшла до редакції 11.11.2010.