

УДК 621.039.516

С.Н. Пельх, канд. техн. наук, Одес. нац. політехн. ун-т,
А.А. Назаренко, канд. физ.-мат. наук, Одес. нац. акад. зв'язи ім. А.С. Попова,
Т.А. Цисельская, магистр, Одес. нац. політехн. ун-т

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВВЭР-1000 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПРОГРАММАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

С.М. Пельх, О.А. Назаренко, Т.О. Цисельська. **Аналіз стійкості активної зони ядерного реактора ВВЕР-1000 при різних програмах регулювання реакторної установки.** Досліджується активна зона ядерного реактора ВВЕР-1000 у режимі змінного навантаження при різних програмах регулювання з точки зору аксіальної стабільності енерговиділення при технологічних параметрах, що змінюються. Визначено найбільш ефективну програму регулювання, що забезпечує прийнятну стабільність аксіального офсету при зміні потужності РУ від 80...100 %.

Ключові слова: ВВЕР-1000, активна зона (АКЗ), аксіальний офсет (АО), потужність.

С.Н. Пельх, А.А. Назаренко, Т.А. Цисельская. **Анализ устойчивости активной зоны ядерного реактора ВВЭР-1000 при различных программах регулирования реакторной установки.** Исследуется активная зона ядерного реактора ВВЭР-1000 в режиме переменного нагружения при различных программах регулирования с точки зрения аксиальной стабильности энерговыделения при изменяющихся технологических параметрах. Определена наиболее эффективная программа регулирования, обеспечивающая приемлемую стабильность аксиального офсета при изменении мощности ядерного реактора (ЯР) от 80...100 %.

Ключевые слова: ВВЭР-1000, активная зона (АКЗ), аксиальный офсет (АО), мощность.

S.N. Pelykh, A.A. Nazarenko, T.A. Tsiselskaya. **The analysis of WWER-1000 nuclear core stability at various programs of reactor plant regulation.** The nuclear core of WWER-1000 reactor in the varying-loading mode at different regulating programs is investigated in terms of axial stability of energy-release at changing technological parameters. The most effective program of regulation providing reasonable stability of axial offset in changing reactor power from 80...100 % is determined.

Keywords: WWER-1000, core, axial offset, power.

Все украинские АЭС с ВВЭР-1000 эксплуатируются в базовом режиме и, как следствие, не принимают участие в регулировании суточного графика электрической нагрузки.

В энергетической системе увеличение доли выработки электроэнергии на АЭС ограничено 50 % [1]. Если эта доля находится в пределах 25...50 %, а доля генерирующих установок, работающих в пиковом режиме, менее 13 %, то возникает несоответствие между выработкой и потреблением электроэнергии, которые усугубляется, если в энергосистеме доля выработки электроэнергии на АЭС превышает 50 %.

Следовательно, становится актуальной задача эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000 в переменной части графика электрической нагрузки энергосистемы, т.е. в маневренном режиме, с регламентной скоростью разгрузки 3 %/мин от номинальной мощности, нагрузки — 1 % /мин. Проект реакторной установки (РУ) предусматривает ее эксплуатацию в базовом режиме, хотя оборудование первого контура рассчитано на возможность эксплуатации в режиме регулирования ее мощности в энергосистеме в пределах 30...100 % от номинальной. За срок службы в пределах этого регулировочного диапазона допускается до 10 тыс. циклов изменения мощности [2].

Вообще говоря, при переходе с одного уровня мощности на другой технологические параметры РУ изменяются, что существенно влияет на ее экономичность, надежность и тепловую эффективность, а также на дальнейшую (после маневра) работу в номинальном режиме. Применяемые в эксплуатации программы регулирования характеризуют изменение технологических параметров РУ во время перехода с одного стационарного уровня мощности на другой [2].

В основу программ регулирования мощности, используемых на АЭС с ВВЭР-1000, положено поддержание постоянного начального давления пара во втором контуре P_{II} , поддержание постоянной средней температуры теплоносителя в первом контуре T_1^{cp} (рис. 1, а, б, соответственно) и поддержание постоянной температуры теплоносителя на входе в активную зону ядерного реактора (АКЗ ЯР) T_1^{bx} [1].

Допускается использование различных комбинаций программ регулирования. Например, комбинированная программа регулирования сочетает обе программы регулирования мощности, в компромиссно-комбинированной применяется комбинация программ регулирования с поддержанием постоянного начального давления пара во втором контуре P_{II} и с поддержанием постоянной температуры теплоносителя на входе в АКЗ реактора T_1^{bx} [1] (рис. 1, в, г, соответственно).

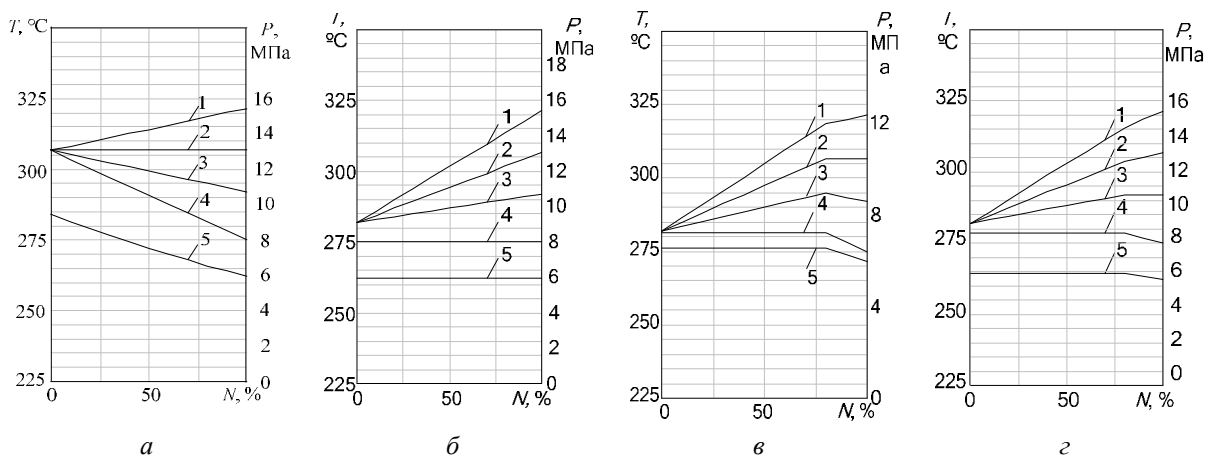


Рис. 1. Характеристики РУ с ВВЭР-1000 при различных программах регулирования, 1 — температура теплоносителя на выходе из АКЗ, $T_1^{вых}$; 2 — средняя температура теплоносителя в АКЗ, T_1^{cp} ; 3 — температура теплоносителя на входе в АКЗ, T_1^{bx} ; 4 — температура насыщенного пара во втором контуре, T_S^{II} ; 5 — постоянное начальное давление пара во втором контуре, P_{II}

Приведенные программы регулирования РУ с ВВЭР-1000 рассматриваются в виде изменения характеристик технологических параметров T_1^{bx} , T_1^{cp} , $T_1^{вых}$, P_{II} в зависимости от ее энергетической мощности N , но как эти изменения влияют на устойчивость поля энерговыделения, рассмотрено не было.

Целесообразно определить, как изменение технологических параметров T_1^{bx} , T_1^{cp} , $T_1^{вых}$, P_{II} при изменении мощности N влияет на устойчивость поля энерговыделения, а именно на стабильность аксиального офсета (АО) в различных программах регулирования.

Предлагается исследование диапазона устойчивости АКЗ ЯР ВВЭР-1000 при различных программах регулирования и обоснование наиболее эффективной с точки зрения неперевышения регламентных значений АО [4].

Для оценки стабильности поля энерговыделения в АКЗ принимается двухточечная модель АКЗ ЯР [5]. Поэтому имеет смысл исследовать задачу управления нейтронным полем реактора

при маневрировании мощностью, состоящую в предотвращении и подавлении ксеноновых колебаний энерговыделения в АКЗ, сводимую к управлению величиной АО.

Нестационарное отравление реактора ксеноном относится к медленным эффектам и усиливает любое отклонение нейтронного потока за счет эффекта реактивности, относящегося к быстрым эффектам. В связи с этим можно выдвинуть предположение, что контроль энерговыделения в АКЗ при изменении мощности сводится к выбору температурного режима теплоносителя, при котором стабильность аксиального офсета была бы максимальной.

Значение аксиального офсета определяется как [3]

$$AO = \frac{N_{\text{ВЫХ}} - N_{\text{ВХ}}}{N}, \quad (1)$$

где $N_{\text{ВЫХ}}$, $N_{\text{ВХ}}$, N — соответственно мощность верхней, нижней половины АКЗ и мощность всей АКЗ.

Если записать параметры, входящие в (1), через достаточно малые отклонения от соответствующих стационарных значений, они примут вид:

$$\begin{aligned} AO &= AO_0 + \delta AO; \\ N_{\text{ВЫХ}} &= N_{\text{ВЫХ.0}} + \delta N_{\text{ВЫХ}}; \\ N_{\text{ВХ}} &= N_{\text{ВХ.0}} + \delta N_{\text{ВХ}}; \\ N &= N_0 + \delta N, \end{aligned} \quad (2)$$

где AO_0 , $N_{\text{ВЫХ.0}}$, $N_{\text{ВХ.0}}$, N_0 — стационарные значения параметров РУ;

δAO , $\delta N_{\text{ВЫХ}}$, $\delta N_{\text{ВХ}}$, δN — достаточно малые отклонения от стационарных значений параметров.

Соответственно, при малом отклонении средней температуры теплоносителя δT_1^{CP} от соответствующих стационарных значений параметров в результате изменения мощности РУ для малых отклонений мощности верхней и нижней половины АКЗ справедливы соответствующие выражения

$$\begin{aligned} \delta N_{\text{ВЫХ}} &= \frac{\delta N}{\delta T_1^{\text{CP}}} \delta T_1^{\text{ВЫХ}}; \\ \delta N_{\text{ВХ}} &= \frac{\delta N}{\delta T_1^{\text{CP}}} \delta T_1^{\text{ВХ}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\delta T_1^{\text{ВЫХ}}$, $\delta T_1^{\text{ВХ}}$ — достаточно малое отклонение средней температуры теплоносителя в верхней и нижней половине АКЗ, соответственно;

δN — достаточно малое отклонение мощности РУ.

Подставив выражения (2), (3) в (1), можно получить выражение для малого отклонения аксиального офсета при малом отклонении мощности РУ

$$\delta AO = \frac{\delta N}{\delta T_1^{\text{CP}}} N_0^{-1} [(1 - AO_0) \delta T_1^{\text{ВЫХ}} - (1 + AO_0) \delta T_1^{\text{ВХ}}]. \quad (4)$$

Если допустить, что [6]

$$AO_0 \ll 1, \quad (5)$$

то выражение (4) преобразуется к виду

$$\delta AO = \frac{\delta N}{\delta T_1^{\text{CP}}} N_0^{-1} [\delta T_1^{\text{ВЫХ}} - \delta T_1^{\text{ВХ}}]. \quad (6)$$

Таким образом, с точки зрения стабильности аксиального офсета при изменении мощности РУ по любой программе, из (6) можно получить критерий эффективности температурного режима теплоносителя

$$J = \min \left| \sum_{i=1}^n (\delta T_1^{\text{ВВХ}} - \delta T_1^{\text{ВХ}}) \right|, \quad (7)$$

где i, n — номер шага и количество шагов малого изменения мощности РУ в каком-либо направлении.

Используя критерий (7), можно обоснованно выбирать температурный режим теплоносителя, который позволяет обеспечить максимальную стабильность аксиального офсета при изменении мощности РУ.

Исследованы программы регулирования при изменении мощности в диапазоне от 100 ... 80% $N_{\text{ном}}$. с точки зрения стабильности АО. В некоторых программах регулирования в выбранном диапазоне графики основных характеристик РУ с ВВЭР-1000 совпадают, например, в программе регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре и комбинированной, поэтому имело смысл рассматривать только три программы:

“РІ” — с постоянной входной температурой теплоносителя $T_1^{\text{ВХ}}$ (см. рисунок 1, z);

“РІІ” — с постоянной средней температурой теплоносителя $T_1^{\text{СР}}$ (см. рисунок 1, a или $в$);

“РІІІ” — программа регулирования, в которой входная температура теплоносителя $T_1^{\text{ВХ}}$ при снижении мощности РУ от 100...80 % увеличивается на 1 °С.

Анализ указанных программ при изменении мощности РУ в заданном диапазоне выполнялся с помощью программы ИР [7]. Задавались постоянными: давление пара во втором контуре $P_{\text{II}} = 16$ МПа и массовый расход теплоносителя в первом контуре $G = 84 \cdot 10^3$ м³/ч, входная температура теплоносителя при изменении мощности РУ по “РІ” $T_1^{\text{ВХ}} = 287$ °С, а по “РІІ” $T_1^{\text{ВХ}}$ задавалась переменной (табл. 1).

Таблица 1

Значения параметров АКЗ при $T_1^{\text{СР}} = \text{const}$

$N, \%$	$T_1^{\text{ВХ}}, \text{°C}$	$T_1^{\text{ВВХ}}, \text{°C}$	$T_1^{\text{СР}}, \text{°C}$
100	287	317	302
90	288	316	302
80	290	314	302

Данные взяты с энергоблока № 2 Хмельницкой АЭС для момента начала 5-й кампании [2], рассчитывалось первое состояние реактора ВВЭР-1000 с равновесным распределением ксенона, а для последующих состояний с учетом выгорания топлива рассчитывалось неравновесное

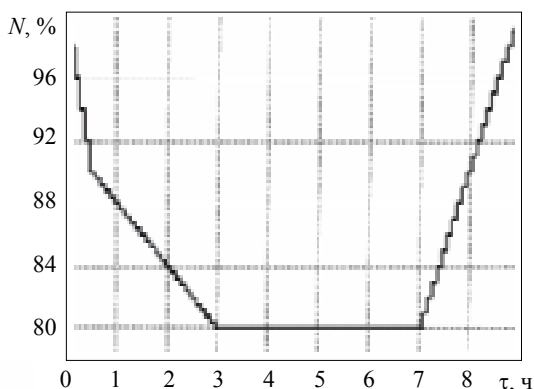


Рис. 2. Изменение мощности реактора в зависимости от времени для программ “РІ”, “РІІ” и “РІІІ”

распределение ксенона и самария. Для рассматриваемых программ изменение мощности N реактора в зависимости от времени задавалось по одному временному графику (рис. 2). Принималось, что снижение мощности с $N_1=100$ до $N_2=90$ % (в течение 0,5 ч мощность изменяется по линейному закону со скоростью $dN_{1-2} / d\tau = -2 \% / 6$ мин) происходит за счет введения в теплоноситель жидкого поглотителя (борной кислоты). Снижение мощности с $N_2=90$ до $N_3=80$ % (в течение 2,5 ч мощность изменяется по линейному закону со скоростью $dN_{2-3} / d\tau = -0,4 \% / 6$ мин) осуществлялось за счет отравления реактора; выдержка РУ в течение 4 ч на уровне мощности $N_3=80$ % осу-

ществлялась за счет введения в теплоноситель борной кислоты, а рабочая группа органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) использовалась для стабилизации АО. Увеличение мощности с $N_3=80$ до $N_1=100$ % в течение 2 ч, по линейному закону со скоростью $dN_{3-1} / dt = 1,0$ % / 6 мин осуществлялось за счет ввода чистого дистиллята при одновременном возврате регулирующей группы СУЗ в регламентное положение, при этом амплитуда перемещения ОР задавалась $\Delta H^{\max} = 4$ %.

С помощью программы FEMAXI [7] рассчитаны значения средней температуры теплоносителя в верхней и нижней половинах АКЗ с временным шагом 0,5 ч, а также рассчитаны $\delta T_1^{\text{ВЫХ}}$ и $\delta T_1^{\text{ВХ}}$. Это дало возможность найти $\left| \sum_{i=1}^6 \Delta \delta T \right|$ (табл. 2), где $\Delta \delta T \equiv \delta T_1^{\text{ВЫХ}} - \delta T_1^{\text{ВХ}}$.

Таблица 2

Значения средней температуры теплоносителя в верхней и нижней половинах АКЗ

Программа регулирования	τ , ч	N , %	$T_1^{\text{ВЫХ}}$	$T_1^{\text{ВХ}}$	$\delta T_1^{\text{ВЫХ}}$	$\delta T_1^{\text{ВХ}}$	$\Delta \delta T$	$\left \sum_{i=1}^6 \Delta \delta T \right $
			°C					
“РГ”	0,1	100	318,3	296,8	0	0	0	2,65
	0,6	90	317,9	296,8	-0,33	-0,25	-0,075	
	1,1	88	316,3	296	-1,6	-0,58	-1,025	
	1,6	86	315,7	295,7	-0,65	-0,28	-0,375	
	2,1	84	315,1	295,5	-0,63	-0,2	-0,425	
	2,6	82	314,5	295,3	-0,6	-0,23	-0,375	
	3,1	80	313,9	295,1	-0,6	-0,23	0,375	
“РП”	0,1	100	318,3	296,8	0	0	0	2,85
	0,6	90	319,3	298	0,95	1,2	-0,25	
	1,1	88	317,9	297,6	-1,38	-0,45	-0,925	
	1,6	86	317,5	297,6	-0,43	0	-0,425	
	2,1	84	316,9	297,6	-0,53	0	-0,525	
	2,6	82	316,7	297,6	-0,28	0,05	-0,325	
	3,1	80	316,4	297,7	-0,3	0,1	-0,4	
“РПШ”	0,1	100	318,3	296,8	0	0	0	2,70
	0,6	90	318,4	297,1	0,1	0,25	-0,15	
	1,1	88	316,9	296,6	-1,5	-0,53	-0,975	
	1,6	86	316,4	296,4	-0,55	-0,15	-0,4	
	2,1	84	315,7	296,2	-0,65	-0,2	-0,45	
	2,6	82	315,2	296,1	-0,48	-0,08	-0,4	
	3,1	80	314,8	296	-0,45	-0,13	-0,325	

Согласно критерию (7) и данным, полученным в результате исследования (см. таблицу 2), с точки зрения стабильности аксиального офсета температурный режим программы “РГ” наилучший, а температурный режим программы “РП” наихудший.

Аксиальное распределение энерговыделения в АКЗ ВВЭР-1000 при маневрировании мощностью РУ можно значительно стабилизировать путем выбора наилучшего температурного режима теплоносителя.

Литература

1. 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. — Одесса, 2007. — Вып. 2(28). — С. 56 — 59.
2. Иванов, В.А. Эксплуатация АЭС / В.А. Иванов. — СПб.: Энергоатомиздат, 1994. — 379 с.
3. Филипчук, Е.В. Управление нейтронным полем ядерного реактора / Е.В. Филипчук, П.Т. Потапенко, В.В. Постников. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 280 с.
4. Типовой технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 (В-230): ТРВ-1000-3. — М., 1988. — 350 с.
5. Управление аксиальным распределением поля энерговыделения в активной зоне реактора ВВЭР-1000 при переходных процессах / А.А. Коренной, С.Н. Титов, О.В. Неделин, В.А. Литус // Атом. энергия. — 2000. — Т. 88. — Вып. 4. — С. 252 — 257.
6. Эксплуатационные режимы АЭС с ВВЭР-1000 / Ф.Я. Овчинников, В.А. Вознесенский, В.В. Семенов и др. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 416 с.
7. Филимонов, П.Е. Программа “Имитатор реактора” для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000 / П.Е. Филимонов, В.В. Мамичев, С.П. Аверьянова // Атом. энергия. — 1998. — Т. 84, № 6. — С. 560 — 563.
8. Сузуки, М. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения: [моногр.] / М. Сузуки; автор пер. с англ. яз. С.Н. Пельх; под науч. ред. М.В. Максимова. — Одесса, 2010. — 248 с.

References

1. Baskakov, V.E., Algoritm ekspluatatsii energobloka s VVER v podderzhanii sutochnogo balansa moshchnosti energosistemy [Operation algorith of a WWER power-generating unit in diurnal energosystem power balance maintenance] / V.E. Baskakov, M.V. Maksimov, O.V. Maslov // Tr. Odes. politekhn. un-ta [Proceedings of Odes. polytechn. univ.] — Odessa, 2007. — Issue 2(28). — pp. 56 — 59.
9. Ivanov, V.A. Ekspluatatsiya AES [Operation of NPP] / V.A. Ivanov. — St.Petersburg, 1994. — 379 p.
10. Filipchuk, E.V. Upravlenie neytronnym polem yadernogo reaktora [Nuclear reactor neutron field control] / E.V. Filipchuk, P.T. Potapenko, V.V. Postnikov. — Moscow, 1981. — 280 p.
11. Tipovoy tekhnologicheskii reglament bezopasnoy ekspluatatsii energobloka AES s reaktorom VVER-1000 (V-230): TRV-1000-3. [Standard operating regulations for safe operation of NPP power unit with WWER-1000 (V-230): TRV-1000-3 reactor] — Moscow, 1988. — 350 p.
12. Upravlenie aksial'nym raspredeleniem polya energovydeleniya v aktivnoy zone reaktora VVER-1000 pri perekhodnykh protsessakh [Axial energy release field distribution control in the WWER-1000 reactor core in transient processes] / A.A. Korennoy, S.N. Titov, O.V. Nedelin, V.A. Litus // Atom. energiya [Atomic energy] — 2000. — Vol. 88. — Issue 4. — PP. 252 — 257.
13. Ekspluatatsionnye rezhimy AES s VVER-1000 [Operation conditions of NPP with WWER-1000] / F.Ya. Ovchinnikov, V.A. Voznesenskiy, V.V. Semenov etc. — Moscow, 1992. — 416 p.
14. Filimonov, P.E. Programma “Imitator reaktora” dlya modelirovaniya manevrennykh rezhimov raboty VVER-1000 [“Reactor simulator” program for modeling manoeuvre modes of WWER-1000 operation] / P.E. Filimonov, V.V. Mamichev, S.P. Aver'yanova // Atom. energiya [Atomic energy] — 1998. — Vol. 84, # 6. — PP. 560 — 563.
15. Suzuki, M. Modelirovanie povedeniya tvela legkovodnogo reaktora v razlichnykh rezhimakh nagruzheniya: [monogr.] [Modeling the behaviour of the light-water reactor fuel element in various loading conditions: [monogr.]] / M. Suzuki; transl. from English by S.N. Pelykh; edited by M.V. Maksimov. — Odessa, 2010. — 248 p.

Рецензент д-р техн. наук, доц. Одес. нац. политехн. ун-та Маслов О.В.

Поступила в редакцию 25 февраля 2011 г.