

УДК 621.039.5

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВВЭР

Цыганов С.В., Шишков Л.К. (ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Одной из важных характеристик ядерного реактора является эффективность аварийной защиты — изменение эффективного коэффициента размножения, обусловленное введением в реактор органов регулирования СУЗ. Для ВВЭР измерение эффективности аварийной защиты является штатной операцией, выполняемой ежегодно при перегрузке ядерного топлива. Сопоставление данных этих измерений с расчетами показывает, что для некоторых загрузок между ними наблюдается значительное отличие.

В настоящей статье рассматривается причина различия расчетных и измеренных данных, обусловленная проявлением пространственных эффектов перераспределения плотности нейтронов, и даются рекомендации по уменьшению различий.

Эксперимент по измерению эффективности аварийной защиты выполняется на малом уровне мощности реактора, обычно до 15% номинальной. Перед его началом критические условия обеспечиваются при полностью извлеченных органах регулирования СУЗ (органы регулирования рабочей группы могут быть частично введены в активную зону). Затем все органы регулирования СУЗ, может быть, за исключением одного свободным падением перемещаются в крайнее нижнее положение. При этом в реакторе и окружающем его пространстве изменяется нейтронное поле. Поток нейтронов фиксируется с помощью одной или нескольких ионизационных камер, расположенных, как правило, вне реактора. Предполагается, что ток камеры изменяется адекватно (пропорционально) интегральному потоку нейтронов или мощности всего реактора. Реактивность $\rho = 1 - 1/K_{\text{эф}}$ определяется в предположении, что этот функционал удовлетворяет уравнению точечной кинетики

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} N + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i; \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\beta_i N}{\Lambda} - \lambda_i C_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6,$$

где β_i — эффективная доля запаздывающих нейтронов группы i ; $\sum_{i=1}^6 \beta_i = \beta$; Λ — время генерации мгновенных нейтронов; λ_i , C_i — постоянная распада и концентрация эмиттеров запаздывающих нейтронов группы i ; N — регистрируемая детектором (камерой) плотность потока нейтронов.

Если при $t = 0$ $C_i(0) = C_{i0}$, то решение уравнения (1) относительно ρ можно представить в виде

$$\rho = \beta + \frac{\partial N}{\partial t} \frac{\Lambda}{N} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^6 \lambda_i \beta_i \int_0^t N(t') \exp[-\lambda_i(t-t')] dt' - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^6 C_{i0} \Lambda \lambda_i \exp(-\lambda_i t). \quad (2)$$

Уравнение (1) следует из общего уравнения переноса нейтронов в предположении, что переменные, определяющие нейтронную плотность (n), разделяются

$$n(\mathbf{r}, E, t) = \Psi(\mathbf{r}, E)N(t), \quad (3)$$

где $\mathbf{r}$ — пространственная координата; E — энергия нейтрона; t — время.

Для широкого класса моделей ядерного реактора заведомо существует такое значение времени $t > t_1$, при котором условие (3) выполняется [1, 2], и реактивность может быть определена по уравнению (2). Однако при уменьшении потока нейтронов ниже определенного предела невозможен сам процесс измерения. В настоящей статье ставится задача измерить реактивность и в тех случаях, когда условие (3) не выполняется. Исключив тривиальный случай равномерных возмущений, отметим, что принципиальное значение имеет внесенная реактивность. Если $|\rho| < \beta_{эф}$, то асимптотическое условие (3) даже при внесении неравномерных возмущений наступает за время, допустимое в эксперименте, и с помощью уравнения (1) реактивность хорошо оценивается. В случае $|\rho| \gg \beta_{эф}$ ($|\rho| \approx 5-15\beta_{эф}$) асимптотическое условие (3) не выполняется во все время измерений, и формальное использование уравнений (1) может привести к значительным погрешностям. Например, в работе [3] отмечалось, что погрешность может достигать 100%.

Разницу в поведении нейтронной плотности при малой и большой реактивности можно качественно объяснить следующим образом. Невыполнение условия (3) связано с отличием пространственного распределения эмиттеров запаздывающих нейтронов до внесения возмущения от распределения нейтронов после возмущения.

При $|\rho| < \beta_{эф}$ распределение источников слабо влияет на нейтронное поле, кроме того, за время измерений успевают образоваться новые эмиттеры, которые играют главную роль. При $|\rho| \gg \beta_{эф}$ влияние начального распределения источников запаздывающих нейтронов велико, новых эмиттеров почти не образуется. Таким образом, при измерении большой отрицательной реактивности, обусловленной неравномерным возмущением реактора, возникают значительные погрешности, вызванные пространственными эффектами. Наличие таких погрешностей и необходимость их учета отмечались и ранее, например, в работах [4—6].

При сохранении традиционной процедуры определения эффективности органов регулирования, включая измерение большой отрицательной реактивности, можно корректировать результаты с помощью поправки для учета пространственных эффектов. Остановимся на способе введения такой поправки. Будем исходить из того, что в каждый момент времени и в каждом состоянии перенос нейтронов в реакторе описывается с помощью уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} &= -\hat{L}n + (1 - \beta)\hat{Q}n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i; \\ \frac{\partial C_i}{\partial t} &= \beta_i \hat{Q}n - \lambda_i C_i, \quad i = 1, \dots, 6, \end{aligned} \quad (4)$$

где $n(\mathbf{r}, t)$ — плотность нейтронов; $\hat{Q}$ — оператор, описывающий генерацию мгновенных нейтронов; $\hat{L}$ — перенос нейтронов в пространстве (и, возможно, замедление).

Реактивность реактора в каждом состоянии может быть найдена по уравнению

$$\hat{L}\varphi - (1 - \rho)\hat{Q}\varphi = 0$$

или сопряженному уравнению

$$\hat{L}^+\varphi^+ - (1 - \rho)\hat{Q}^+\varphi^+ = 0. \quad (5)$$

Таким образом, если известно состояние реактора (размер, состав, температура), то известна и его реактивность, независимо от того, является ли это состояние стационарным, или это только стадия переходного процесса.

Рассмотрим типичную ситуацию, которая возникает при штатном измерении эффективности аварийной защиты на АЭС, когда после сброса органов регулирования СУЗ температурные и плотностные характеристики реактора не изменяются.

Для измерения реактивности переходный процесс организуется таким образом, чтобы его конечное состояние совпадало с тем, для которого требуется определить реактивность. Для описания переходного процесса, когда состояние активной зоны остается неизменным, совместно рассматриваются уравнения (4) и (5) (операторы $\hat{Q}$ и $\hat{L}$ в обоих уравнениях совпадают). Реализуются перекрестное умножение на решения этих уравнений, интегрирование по всему пространству аргументов и вычитание.

В результате получается система уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle n, \varphi^+ \rangle}{\partial t} &= \frac{(\rho - \beta) \langle n, \varphi^+ \rangle}{\Lambda} + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \langle \tilde{C}_i, \varphi^+ \rangle; \\ \frac{\partial \langle \tilde{C}_i, \varphi^+ \rangle}{\partial t} &= \beta_i \frac{\langle n, \varphi^+ \rangle}{\Lambda} - \lambda_i \langle \tilde{C}_i, \varphi^+ \rangle, \quad i = 1, 2, \dots, 6, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Lambda = \langle n, \varphi^+ \rangle / \nu \langle n, \tilde{Q}\varphi^+ \rangle$ — среднее время генерации мгновенных нейтронов; $\bar{\beta}_i = \langle \beta_i n, \tilde{Q}\varphi^+ \rangle / \langle n, \tilde{Q}\varphi^+ \rangle$; $\bar{\beta} = \sum_i \bar{\beta}_i$ — эффективная доля запаздывающих нейтронов; $\tilde{C}_i = \nu C_i$; $\tilde{Q} = \nu \hat{Q}$.

Следует еще раз отметить, что функция ценности φ^+ , используемая при получении уравнения (6), или ее приближенное значение φ должны соответствовать рассматриваемому состоянию реактора.

Очевидно, что уравнение (6) имеет вид, аналогичный выражению (1), но вместо нейтронного потока n в какой-либо точке присутствуют интегралы $\langle n, \varphi^+ \rangle$, $\langle \tilde{C}_i, \varphi^+ \rangle$. Технические возможности не позволяют измерить интегралы. В распоряжении экспериментатора есть лишь ионизационные камеры, показания которых пропорциональны нейтронному потоку в месте их расположения. В штатный реактиметр, соединенный с помещенной в точке r_k ионизационной камерой, предлагается направить ток $I(t, r_k)$, поправленный на коэффициент $f(r_k, t)$:

$$f(r_k, t) = \langle n(t, r), \varphi^+(r) \rangle / n(t, r_k), \quad (7)$$

где $n(t, r_k)$ — расчетный ток в точке r_k .

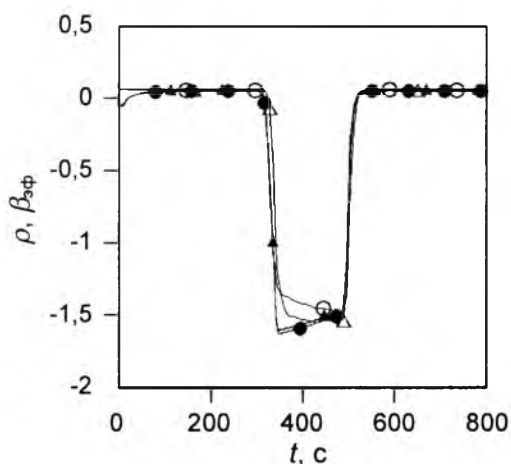
Качество динамических программ и программ, моделирующих ток камер, можно оценить путем сопоставления с измеренными показаниями камер в экспериментах с движением органов регулирования СУЗ на критических стендах и во время пуска энергетических реакторов.

Полученные при измерениях показания реактиметров, используемых в штатном режиме, сравнивали с имитацией этого процесса (без поправки (7)). В качестве трехмерной динамической модели активной зоны применяли аттестованную программу NOSTRA [7] с блоком имитации вне реакторных ионизационных камер.

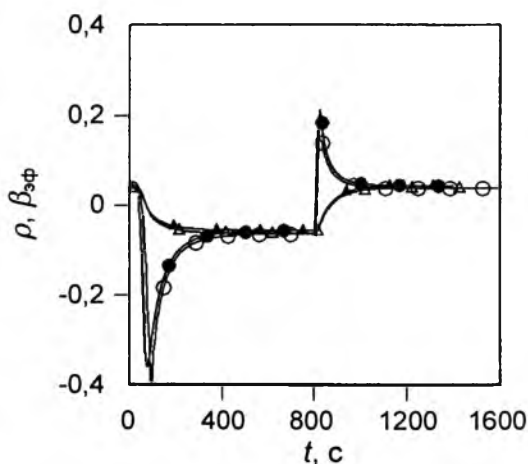
На критическом стенде в РНЦ «Курчатовский институт» была проведена серия экспериментов по определению нейтронно-физических характеристик первой топливной загрузки серийного ВВЭР-1000. В одном из экспериментов группу органов регулирования СУЗ перемещали из крайнего верхнего положения в нижнее, затем извлекали из активной зоны, в другом эксперименте перемещали одиночный орган регулирования СУЗ. Параметры динамики активной зоны измеряли с помощью вне реакторных ионизационных камер, расположенных в стальном экране-отражателе. Результаты экспериментов и их расчетного моделирования с помощью программы NOSTRA приведены на рис. 1, 2.

Имитировали результаты экспериментов по сбросу аварийной защиты при пуске ВВЭР-100 Волгодонской АЭС (рис. 3) и ВВЭР-440 первого блока АЭС «Моховце (Словакия)» (рис. 4).

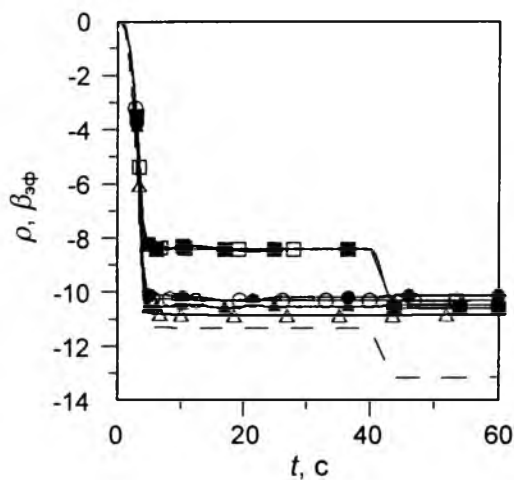
Приведенные результаты отражают общее состояние дел по имитации динамических процессов ВВЭР и свидетельствуют о том, что с помощью динамической модели можно достаточно точно описать поведение активной зоны и показания вне реакторных ионизационных камер во время переходных процессов. В ходе ис-



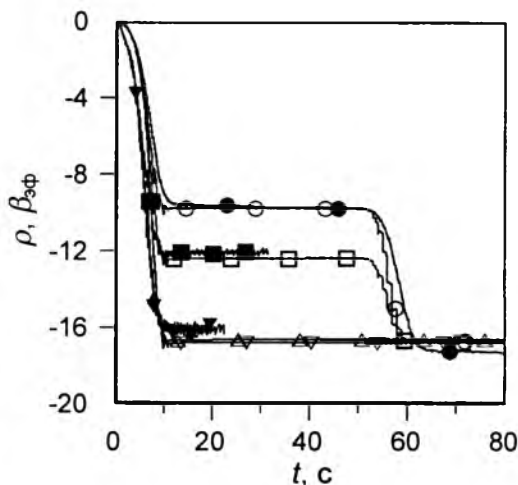
Р и с. 1. Экспериментальные (○ — ИК1, △ — ИК2) и расчетные показания (● — ИК1, ▲ — ИК2) реактиметров, работающих от вне реакторных ионизационных камер, при перемещении группы органов регулирования СУЗ на критическом стенде В-1000



Р и с. 2. То же, что на рис. 1, при перемещении одного органа регулирования СУЗ



Р и с. 3. Экспериментальные ($\blacktriangle$ — ИК25, $\bullet$ — ИК4, $\blacksquare$ — ИК14) и расчетные показания ($\triangle$ — ИК25, $\circ$ — ИК4, $\square$ — ИК14, - - - — $K_{эф}$) реактиметров, работающих от вне реакторных ионизационных камер, при сбросе аварийной защиты на первом блоке Волгодонской АЭС



Р и с. 4. Экспериментальные ($\bullet$ — ИК8, $\blacktriangle$ — ИК2, $\blacksquare$ — ИК10, $\blacktriangledown$ — ИК18) и расчетные показания ($\circ$ — ИК8, $\triangle$ — ИК2, $\square$ — ИК10, $\triangledown$ — ИК18) реактиметров, работающих от вне реакторных ионизационных камер, при сбросе аварийной защиты на первом блоке АЭС «Моховце»

следований результаты 79 измерений (45 на ВВЭР-1000 и 34 на ВВЭР-440) на Балаковской, Ростовской, Кольской АЭС и АЭС «Моховце» были сравнены с результатами квазикритических расчетов (табл. 1), погрешность использованных экспериментальных данных не превышала 10%. К результатам 22 измерений, содержащих необходимый для обработки набор исходных данных, была применена процедура коррекции (7) (табл. 2).

Т а б л и ц а 1. Распределение расчетно-экспериментального отклонения при определении эффективности аварийной защиты без одного и двух органов регулирования СУЗ, $\beta_{эф}$

Отклонение (расчет — эксперимент)	ВВЭР-440	ВВЭР-1000
Среднее	-1,03	0,31
Среднеквадратичное от среднего	1,62	1,13
Максимальное	1,79	2,32
Минимальное	-9,27	-1,41

Т а б л и ц а 2. Эффект от применения поправки (7) при экспериментальном определении эффективности аварийной защиты без одного и двух органов регулирования СУЗ, $\beta_{эф}$

Отклонение (расчет — эксперимент)	ВВЭР-440		ВВЭР-1000	
	без поправки	с поправкой (7)	без поправки	с поправкой (7)
Среднее	-4,25	-0,8	-0,02	0,01
Среднеквадратичное от среднего	3,68	0,67	1,18	0,2
Максимальное	0,3	0,6	2,32	0,34
Минимальное	-9,27	-2,1	-1,16	-0,37

В целом можно утверждать, что в большинстве рассмотренных примеров учет пространственных эффектов с помощью поправочного коэффициента (7) приводит к значительному сокращению расчетно-экспериментальных отклонений. Отсутствие полного совпадения, вероятно, можно объяснить погрешностями как самих измерений, так и расчетной модели. Следует отметить, что при измерении большой отрицательной реактивности для оценки поправочного коэффициента $f(r_k, t)$ допустимо использование только стационарных расчетов. При этом должна решаться неоднородная задача с распределенным источником запаздывающих нейтронов.

Авторы признательны В.Г. Дементьеву, М.П. Лизоркину, А.Н. Новикову, А.Н. Камышану и Д.Л. Шишкову за полезные обсуждения проблемы, рассмотренной в этой статье, Ю.А. Крайнову за предоставленные экспериментальные данные, а также основным разработчикам кода NOSTRA К.Д. Никитину, А.А. Пинегину и Б.Е. Шумскому.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шихов С.Б., Троянский В.Б. Теория ядерных реакторов. Т. 2. Газокинетическая теория. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Нечепуренко Ю.М., Шишков Л.К. Об определении реактивности на основе обобщенного уравнения точечной кинетики. — Журнал выч. мат. и мат. физики, 2002, т. 42, № 9, с. 1394—1398.
3. Krell J. Analysis of rod drop measurements at VVER-440 reactor. — In: Proc. of Annual Meeting on Nuclear Technology. Koln, Germany, 24—27 May 1993.
4. Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Экспериментальные методы физики реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Siltanen P., Ionov V.S., Shishkov L.K. e.a. Reactivity evaluation, high subcriticality. — In: Proc. of the Ninth Symp. of AER. Demanovska Dolina, Slovakia, 1999, p. 413—499.
6. Терешенок В.А., Поваров В.П. Влияние положения ионизационных камер относительно отдельных органов регулирования ВВЭР-1000 на показания измерителей реактивности. — Теплоэнергетика, 2003, № 5, с. 22—25.
7. Nikitin K.L., Pinegin A.A., Shumski B.E. Verification of the three-dimensional dynamic code NOSTRA. Problems of nuclear power installation safety. These of Papers Presented to the IX Seminar on Reactor Physics Problems. M., MEPhI, 1995, p. 136—154.

Поступила в Редакцию 10.11.03

УДК 621.039:620.193/197

СНИЖЕНИЕ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ В ВОДНОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ — ОСНОВНОЙ ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЯЭУ

Прозоров В.В. (Сосновоборский гос. проектно-изыскательский ин-т ВНИПИЭТ)

Хранение и переработка радиоактивных отходов имеют большое экономическое и социальное значение и влияют на реализацию ядерной энергетической программы в целом. Поэтому разработки в области дезактивации направлены на повышение ее эффективности и сокращение объемов образующихся отходов [1]. Однако дезактивирующая обработка для улучшения радиационной обстановки в большинстве случаев является следствием неправильно организованных мероприя-