

ПРИМЕНЕНИЕ РЕАКТИМЕТРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЙ ЗОНЫ

В. И. Борисенко, Н. М. Сидорук, С. П. Сиренко

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Приведены результаты экспериментального определения нейтронно-физических характеристик (НФХ) активной зоны реактора ВВЭР-1000, полученные в ходе проведения физических экспериментов после перегрузки топлива в планово-предупредительные ремонты (ППР) на Хмельницкой АЭС. Представлено описание моделей реактиметров, применяемых на АЭС для определения НФХ.

В настоящей статье приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований НФХ активной зоны реактора блока № 1 Хмельницкой АЭС в начале шестнадцатого и семнадцатого топливных циклов.

Выполнен сопоставительный анализ экспериментальных значений НФХ с соответствующими расчетными значениями.

Для проведения регламентных экспериментальных исследований НФХ активной зоны в соответствии с требованиями ПНАЭ Г (ПБЯ РУ АЭС-89), Технологического регламента безопасной эксплуатации (ТРБЭ № 1.ТО.0122.ИЭ-94) и "Номенклатуры и порядка согласования расчетов для выбора топливных загрузок ..." по экспериментальному определению основных НФХ активной зоны ВВЭР после перегрузки топлива применяются широкодиапазонные вычислители реактивности.

В соответствии с правилами и требованиями к перечню и объему работ, выполняемых на реакторной установке в начале новой топливной кампании после выхода реактора на минимально контролируемый уровень (МКУ) мощности, проводятся физические эксперименты. В ходе физических экспериментов определяются значения важнейших НФХ активной зоны для новой топливной кампании:

температурный коэффициент реактивности (на МКУ и на энергетическом уровне мощности);

барометрический коэффициент реактивности (на МКУ и на энергетическом уровне мощности);

мощностной коэффициент реактивности (на энергетическом уровне мощности);

дифференциальная и интегральная эффективность групп органа регулирования (ОР) системы управления и защиты (СУЗ) на МКУ и рабочей группы ОР СУЗ на энергетическом уровне мощности;

эффективность аварийной защиты (в том числе и в случае несрабатывания наиболее эффективного ОР СУЗ);

коэффициент реактивности по концентрации борной кислоты в теплоносителе (на МКУ и на энергетическом уровне мощности).

На Хмельницкой АЭС в течение 2000 - 2004 гг. для выполнения измерений применяются как штатные средства измерений системы внутриреакторного контроля (СВРК), так и специализированные средства измерений - реактиметры. В качестве реактиметров на Хмельницкой АЭС применялись:

аналоговый измеритель мощности и реактивности - АИМР-8-2М;

лабораторный образец цифрового вычислителя мощности и реактивности - ЦВМР-1.

Оба реактиметра разработаны авторами работы в разные годы. Реактиметр АИМР-8-2М используется, наряду с другими приборами, для проведения физических измерений во время физического пуска новых энергоблоков, а также во время физических измерений после перегрузки топлива на Ровенской, Запорожской и Хмельницкой АЭС.

Применение ЦВМР-1 показало ряд преимуществ:

1. Технические характеристики ЦВМР-1 выше, чем у аналогового реактиметра АИМР-8-2М, за счет применения современной элементной базы и средств цифровой вычислительной техники.

2. Применение ЦВМР-1 позволяет улучшить качество и оптимизировать сроки проведения физических измерений, что, в конечном итоге, положительно отразится на безопасности и эффективности проведения этапа выхода реактора на мощность после ППР.

Методика обработки данных

Измерение интегральной характеристики 10-й группы ОР СУЗ на МКУ мощности проводилось в процессе ее извлечения из активной зоны от H_n до H_k (высота в % от низа активной зоны, табл. 1). Значение интегральной эффективности 10-й группы при положении H_n от низа активной зоны и эффект реактивности, вводимый в активную зону при погружении 10-й группы от концевиков верхних (КВ) до H_k , получены из интегральной характеристики, восстановленной по вычисленным экспериментальным значениям дифференциальной эффективности группы на интервале перемещения от H_n до H_k при условии ее равенства нулю на концевике нижнем (КН) и при условии обращения в нуль потока нейтронов в верхнем отражателе на расстоянии от верха активной зоны, равном удвоенной расчетной длине линейной экстраполяции.

Таблица 1. Начальные условия проведения экспериментов

№ топливной кампании	H_n , %	H_k , %	Фоновые токи ионизационных камер		
			№ 4	№ 14	№ 25
16	19 %	86,5%	$2,2 \cdot 10^{-11}$ А	$9 \cdot 10^{-12}$ А	$7 \cdot 10^{-11}$ А
17	27 %	83 %	$1,69 \cdot 10^{-10}$ А	$9 \cdot 10^{-11}$ А	$1,5 \cdot 10^{-10}$ А

При сбросе аварийной защиты (АЗ) имитировалось застревание в крайнем верхнем положении одного ОР 9-й группы ОР СУЗ с координатами 11-38, расположенного вблизи ИК № 14. Доброс ОР 11-38 был осуществлен: для 16-й топливной загрузки на 6 с; для 17-й топливной загрузки на 25 с после начала падения АЗ. Время падения АЗ составило 2,6 - 2,8 с. (рис.1 и 2).

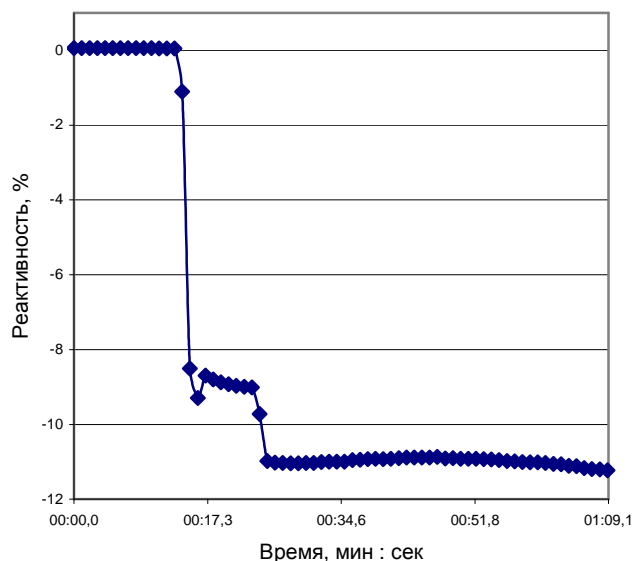


Рис. 1. Изменение реактивности при сбросе АЗ для 16-й топливной загрузки.

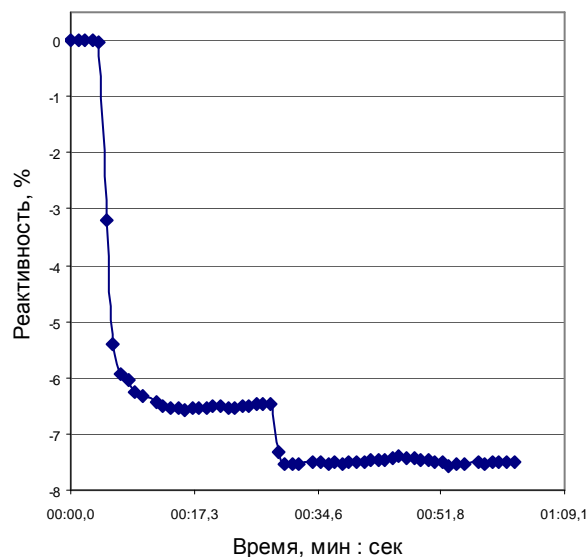


Рис. 2. Изменение реактивности при сбросе АЗ для 17-й топливной загрузки.

Измерительная аппаратура и методика проведения эксперимента

Перед проведением экспериментов с целью определения значений dp/dT , определяются минимально ($I_{ик\ мин}$) и максимально допустимые ($I_{ик\ макс}$) значения входного тока реактиметра. Минимальный допустимый ток должен быть не менее чем на порядок больше фонового тока. Фоновый ток ионизационных камер ($I_{ик\ фон}$) определяется по показаниям реактиметра непосредственно перед выводом реактора в критическое состояние ($N_{АКНП} = 10^{-6} - 10^{-5} N_{ном}$) и $T_{аз} = 270 - 285\ ^\circ\text{C}$.

Максимально допустимый ток определяется с целью обеспечения условий «нулевой» мощности реактора при проведении измерений на МКУ. Это такой ток, при котором можно пренебречь разогревом теплоносителя первого контура теплом, выделяемым активной зоной. По величине максимально допустимый входной ток реактиметра должен быть не менее чем на порядок меньше тока, при котором введенная в активную зону перемещением регулирующей группы ОР СУЗ вверх положительная реактивность ($\rho = 0.04...0.05\beta\text{эф}$) начинает уменьшаться вследствие отрицательной обратной связи по мощности (появляется разогрев теплоносителя активной зоной).

Входной ток реактиметра непосредственно перед сбросом АЗ должен превышать фоновый ток ионизационной камеры на 3 - 4 порядка.

Схема расположения каналов ионизационных камер аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП), резервных каналов и ОР СУЗ относительно осей реактора приведена на рис. 3.

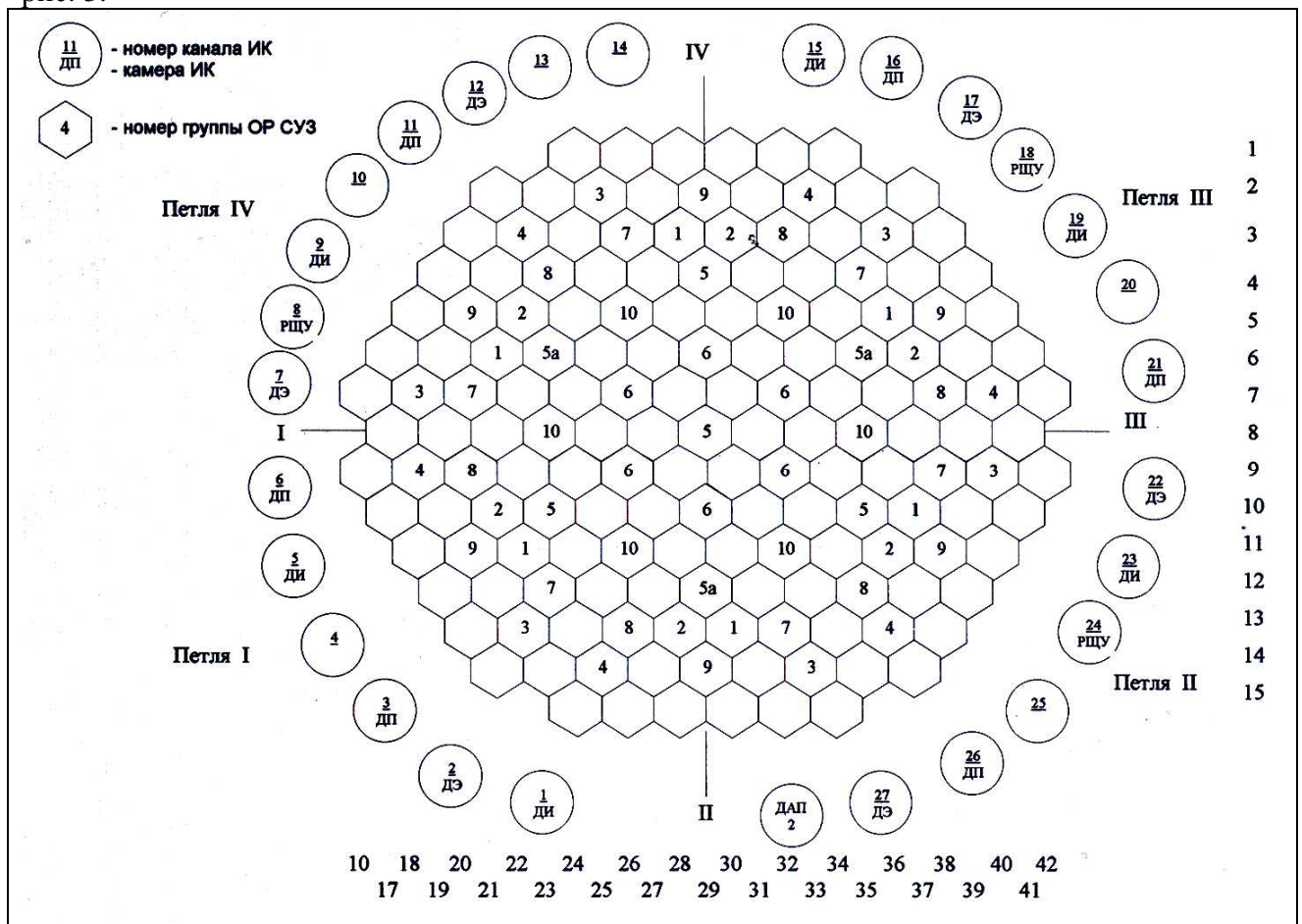


Рис.3. Схема расположения каналов ИК и ОР СУЗ.

На этом же рисунке показана схема расположения органов регулирования и их распределение по группам. В резервных каналах № 4, 14 и 25 установлены экспериментальные камеры (типа КНК-4), сигналы от которых обычно подаются на входы реактиметров. Ионизационные камеры находились по высоте напротив центра активной зоны.

На ленте самопишущего прибора и в журнале контролирующего физика (КФ) периодически фиксировались:

текущее время;

положение ОР СУЗ по точной индикации на блочном щите управления (БЩУ);

концентрация борной кислоты в реакторе по данным лабораторного химанализа, а также по данным нейтронного анализатора раствора бора (НАР-Б) (показания дисплея СВРК и стрелочного прибора на БЩУ);

температура теплоносителя на входе в реактор, подогрев теплоносителя в реакторе, давление над активной зоной и тепловая мощность реакторной установки (РУ) по показаниям дисплея СВРК;

мощность реактора по показаниям АКНП.

В табл. 2 - 6 приведены экспериментальные и расчетные значения некоторых нейтронно-физических характеристик активной зоны для 16-й и 17-й топливных загрузок.

Таблица 2. Параметры критических состояний активной зоны
($T_{эф} = 0_{эф.сут.}$, МКУ, отравление ^{135}Xe отсутствует)

№ топливной кампании	$H_{гр}, \%$	$T_{аз}, ^\circ\text{C}$	Р, кгс/см	$\text{Cн}_3\text{во}_3, \text{ г/кг}$		Примечание
				Экспер.	Расчет	
16	23	278.0	161	9,00	8,80	Расчет $\text{Cн}_3\text{во}_3$, произведен для положения $H_X = 30 \%$ $T_{аз} = 279 ^\circ\text{C}$
17	27	279.1	161	9,77	9,57	Расчет $\text{Cн}_3\text{во}_3$, произведен для положения $H_X = 30 \%$ $T_{аз} = 279 ^\circ\text{C}$

Таблица 3. Температурный коэффициент реактивности
($T_{эф} = 0_{эф.сут.}$, МКУ, отравление ^{135}Xe отсутствует, $\beta_{эф.} = 0,0064$)

№ топливной кампании	$H_{гр}, \%$	$T_{аз}, ^\circ\text{C}$	Р, кгс/см	$dp/dT, 10^{-3} \%/^\circ\text{C}$	
				Эксперимент	Расчет (при $T_{аз} = 279 ^\circ\text{C}$, $P = 160 \text{ кгс/см}^2$, $H_X = 30 \%$)
16	23	276 - 278	159 - 161	-10,37	-8,47
	72	275 - 278	159 - 161	-8,54	-5,56
17	27	276 - 280	159 - 161	-11,0	-8,07
	80	273 - 280	159 - 161	-6,5	-4,93

Таблица 4. Интегральная и дифференциальная характеристики X группы ОР СУЗ
(топливная загрузка № 16)

$T_{эф} = 0_{эф.сут.}$, МКУ, отравление ^{135}Xe отсутствует, $T_{аз} = 278,3 - 279,0 ^\circ\text{C}$,
 $P_1 = 159,5 \text{ кгс/см}^2$, $\text{Cн}_3\text{во}_3 = 8,80 - 9,3 \text{ г/кг}$, 1 - 9 группы на КВ, $\beta_{эф.} = 0,0064$

Интегральная эффективность, %				Дифференциальная эффективность, $10^{-3} \%/см$			
$H_{10}, \%$	Расчет	$H_{10}, \%$	Эксперимент	$H_{10}, \%$	Расчет	$H_{10}, \%$	Эксперимент
0,0	0	29,2	0,05	0,0	0,0005	23,6	0,0054
10,0	0,01	36,1	0,11	10,0	0,0008	32,1	0,0075
20,0	0,02	46,4	0,20	20,0	0,0022	40,6	0,0095
30,0	0,05	56,7	0,30	30,0	0,0043	50,7	0,0101
40,0	0,11	67,6	0,41	40,0	0,0067	61,1	0,0097
50,0	0,19	70,8	0,45	50,0	0,0091	68,0	0,0126
60,0	0,29	71,9	0,46	60,0	0,0112	70,1	0,0130
70,0	0,41	75,9	0,52	70,0	0,0125	72,7	0,0148
80,0	0,53	78,8	0,56	80,0	0,0129	76,0	0,0148
90,0	0,67	80,2	0,58	90,0	0,0120	78,2	0,0140
100,0	0,77	86,5	0,65	100,0	0,0093	81,9	0,0110

Таблица 5. Интегральная и дифференциальная характеристики X группы ОР СУЗ

(топливная загрузка № 17)

**$T_{эф} = 0_{эф.сут.}$, МКУ, отравление ^{135}Xe отсутствует, $T_{аз} = 274 - 280$ °С,
 $P_1 = 159,5$ кгс/см², $\text{Сн}_3\text{во}_3 = 9,77 - 10,3$ г/кг, 1 - 9 группы на КВ, $\beta_{эф} = 0,0064$**

Интегральная эффективность, %					Дифференциальная эффективность, 10 ⁻³ %/см				
Н ₁₀ , %	Расчет	Н ₁₀ , %	Эксперимент		Н ₁₀ , %	Расчет	Н ₁₀ , %	Эксперимент	
			АИМР	ЦВМР				АИМР	ЦВМР
0,0	0				0	0			
10,0	0,01				10,0	0,07			
20,0	0,02				20,0	0,28			
30,0	0,04	27	0,037	0,037	30,0	0,65			
40,0	0,08				40,0	1,24	36,5	2,44	2,31
50,0	0,15	46	0,164	0,193	50,0	1,91	51,5	2,70	3,17
60,0	0,24	57	0,269	0,316	60,0	2,44	63,5	1,96	2,26
70,0	0,34	70	0,359	0,420	70,0	2,82	76,5	1,46	1,56
80,0	0,45	83	0,426	0,492	80,0	3,23			
90,0	0,58				90,0	3,62			
100,0	0,66				100,0	2,33			

Таблица 6. Параметры реакторной установки перед сбросами аварийной защиты и результаты измерений эффективности АЗ

($T_{эф} = 0_{эф.сут.}$, отравление ^{135}Xe практически отсутствует, $\beta_{эф} = 0,0064$)

№ топливной кампании	$T_{аз}$, °С	P_1 , кгс/см ²	N_T МВт	$\text{Сн}_3\text{во}_3$, г/кг	N_X , %	Эффективность (реактивность) АЗ и доброса "застрявшего" ОР СУЗ, %	
16	279	159	60	9,30	86,5	-6,74 = -6,0 + (-0,74)	Эксперимент ИК № 4
	279	160	0	9,15	80	-7,09 = -6,50 + (-0,50)	Расчет
17	279	159	60	9,375	94	-7,76 = -6,68 + (-1,08)	Эксперимент ИК № 25
	279	160	0	9,88	80	-7,442 = -6,88 + (-0,562)	Расчет

Поступила в редакцию 04.07.06

**25 ЗАСТОСУВАННЯ РЕАКТИМЕТРІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НЕЙТРОННО-ФІЗИЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЇ ЗОНИ**

В. І. Борисенко, М. М. Сидорук, С. П. Сиренко

Представлено результати експериментального визначення нейтронно-фізичних характеристик (НФХ) активної зони реактора ВВЕР-1000, отримані при проведенні фізичних експериментів після перевантаження палива під час планово попереджувальних ремонтів на Хмельницькій АЕС. Описано моделі реактиметрів, що використовувались для визначення НФХ.

**25 APPLICATION OF REACTIMETERS FOR DETERMINATION OF NEUTRON-PHYSICAL
PERFORMANCES OF A CORE**

V. I. Borysenko, N. M. Sidoruk, S. P. Sirenko

The outcomes of experimental determination of neutron-physical performances (NPhP) of a core of the reactor VVER-1000, obtained in a during of physical experiments after refueling in scheduled preventive maintenance (outage) on Khmelnitskiy NPP are indicated. The description of models of reactimeters, used on NPP for determination of NPhP is represented.