

и BC — для отклонений, вызванных коррекциями. Тогда $\eta = \eta_B + \eta_g + \eta_{BC}$.

Орбиту η можно разложить в ряд Фурье, и первые N гармоники, связанные с возмущениями в магнитах и линзах, заменить коэффициентами Бесселя согласно (9). Тогда после некоторой группировки членов можно получить, что

$$\begin{aligned} \eta = & \left\{ \frac{U_0}{i^2} + \sum_{k=1}^{N-1} [(U_k + u_k^{BC}) \cos k\varphi + \right. \\ & + (V_k + v_k^{BC}) \sin k\varphi] + \frac{1}{\sqrt{2}} (U_N + u_N^{BC}) \cos N\varphi \Big\} + \\ & + \left\{ \left(\frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}} \right) u_N^{BC} \cos N\varphi + \right. \\ & + v_N^{BC} \sin N\varphi + \sum_{k=N+1}^{\infty} (u_k^{BC} \cos k\varphi + v_k^{BC} \sin k\varphi) \Big\} + \\ & + \left\{ \left(\frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}} \right) u_N^{(B+g)} \cos N\varphi + v_N^{(B+g)} \sin N\varphi + \right. \\ & + \sum_{k=N+1}^{\infty} (u_k^{(B+g)} \cos k\varphi + v_k^{(B+g)} \sin k\varphi) - \\ & - \sum_{j=1}^{\infty} u_{2Nj}^{(B+g)} - \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{\infty} (u_{2Nj-k}^{(B+g)} + u_{2Nj+k}^{(B+g)}) \cos k\varphi - \\ & - \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{\infty} (-v_{2Nj-k}^{(B+g)} + v_{2Nj+k}^{(B+g)}) \sin k\varphi - \\ & - \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{j=1}^{\infty} (u_{2Nj-N}^{(B+g)} + u_{2Nj+N}^{(B+g)}) \cos N\varphi \Big\} = \Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Суммы Σ_1 , Σ_2 , Σ_3 объединяют члены в соответствующих фигурных скобках. В Σ_1 объединены первые N гармоники орбиты, а в Σ_2 — высшие гармоники орбиты, связанные с действием корректирующих магнитов. В выражении (10) суммы Σ_1 и Σ_2 зависят от η_i и δ_i^{BC} , они известны. Сумма Σ_3 составлена из высших гармоник, связанных с возмущениями в магнитах и линзах, и одна величина

неизвестна, т. е. это тот остаток, который будет всегда присутствовать в скорректированной орбите.

Так как представлял интерес отклонение орбиты вообще, а не только в сигнальных электродах, вводим функционал

$$\Delta^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\Sigma_1 + \Sigma_2)^2 d\varphi. \quad (11)$$

Будем считать, что орбита скорректирована, если Δ^2 имеет минимум. Используя свойство ортогональности тригонометрических функций, можно показать что

$$\begin{aligned} 2\Delta^2 = & \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{2N} \eta_i^2 + \sum_{p,q=1}^{2N} A_{pq} \eta_p \delta_q^{BC} + \\ & + \sum_{p,q=1}^{2N} B_{pq} \delta_p^{BC} \delta_q^{BC}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} A_{pq} = & \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N-1} c_k \cos k(\varphi_p - \varphi_q) + \\ & + \frac{\sqrt{2}}{N} c_N \cos N\varphi_p \cos N\varphi_q; \end{aligned} \quad (13)$$

$$B_{pq} = \sum_{k=1}^{\infty} c_k^2 \cos k(\varphi_p - \varphi_q); \quad (14)$$

$$c_k = \frac{2Q \sin \pi Q}{\pi(Q^2 - k^2)}. \quad (15)$$

Это и есть искомое аналитическое выражение для функционала, минимизирующего отклонение орбиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брук Г. Циклические ускорители заряженных частиц. М., Атомиздат, 1970.
2. Averill R. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1965, v. NS-12, N 3, p. 899.
3. Bossart R., Bosser J. CERN 77-2, Geneva, 1977.
4. Bacconnier Y. CERN 65-35, Geneva, 1965.
5. Guignard G. CERN 70-2, Geneva, 1970.

Поступило в Редакцию 26.06.79

УДК 621.039.517

Изменение чувствительности термонеutronных датчиков в интенсивных полях ионизирующего излучения

УВАРОВ В. И., АФАНАСЬЕВ П. Г., ЗЛОКАЗОВ С. Б., ПАЛИВАЕВ В. И., ПАМПУРА В. Б., САФИН Ю. А.

Для контроля энерговыделения в активных зонах ядерных реакторов термонеutronные датчики (ТНД) применяются с начала развития реакторостроения [1]. Впоследствии из-за несовершенства технологии изготовления чувствительного элемента, довольно больших габаритов и инерционности как внутризонные датчики в системах контроля энерговыделения, управления и защиты в активных зонах больших энергетических реакторов они уступили место малогабаритным камерам деления [2]. Однако в последнее время с появлением новых технологий и материалов интерес к ТНД вновь возрос [3—6].

В настоящей работе приведены результаты исследований изменения чувствительности ТНД в процессе ресурс-

ных испытаний в активной зоне исследовательского реактора ИВВ-2М [7]. Экспериментальный канал с 20 термонеutronными датчиками (см. таблицу) находился в ячейке активной зоны [плотность потока тепловых и быстрых ($E \geq 1,15$ МэВ) нейтронов $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и $4,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, мощность дозы γ -излучения $2,1 \cdot 10^2 \text{ А/кг}$].

Исследуемый датчик — это герметичный цилиндрический корпус из стали марки 12Х18Н10Т, в котором размещена хромель-алюмелевая термопара. «Горячий» спай термопары находится в тепловом контакте с чувствительным к тепловым нейтронам элементом, изготовленным из металлического сплава урана, «холодный» спай, расположенный на расстоянии 12 мм от горячего, служит для авто-

Основные характеристики исследуемых ТНД

Параметр	Тип датчика						
	1	2	3	4	5	6	7
Диаметр корпуса, мм	1,45	1,45	2,0	2,0	2,0	2,0	3,6
Длина корпуса, мм	60	60	60	60	60	60	100
Длина чувствительного элемента, мм	0,8	0,7	1,1	0,8	0,5	0,7	0,8
Масса чувствительного элемента, мг	2,5	1,0	3,5	2,5	1,5	1,0	2,5
Обогащение по ^{235}U , %	36	90	36	36	36	90	36
Изоляционный материал	BeO	BeO	BeO	BeO	BeO	BeO	Al_2O_3 ; ZrO
Начальная чувствительность, $10^{16} \text{ В} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}$	$0,66 \pm 0,03$	$0,74 \pm 0,03$	$1,37 \pm 0,02$	$1,01 \pm 0,02$	$0,57 \pm 0,03$	$0,86 \pm 0,02$	$0,92 \pm 0,04$

матической компенсации температуры окружающей среды. Электроизоляция термоэлектродов друг от друга и от корпуса ТНД выполнена из спеченной окиси алюминия, циркония или бериллия. В качестве линии связи использован высокотемпературный термонарный кабель типа КТМС-2АА.

В процессе ресурсных испытаний определялись следующие характеристики датчиков: чувствительность к плотности потока тепловых нейтронов, разброс чувствительности датчиков одного типа в партии, зависимость чувствительности от типа датчика и содержания чувствительного к тепловым нейтронам материала, зависимость чувствительности ТНД разных типов от флюенса тепловых нейтронов.

Чувствительность ТНД к тепловым нейтронам определялась путем периодического проведения их абсолютной градуировки методом активации кобальтовых детекторов на различных уровнях мощности реактора по общепринятой методике. Отличие чувствительности ТНД одного типа в партии не превышает 5%. В таблице приведены значения начальной чувствительности исследуемых ТНД, усредненные по партии каждого типа. Видно, что зависимость чувствительности датчиков с одинаковым диаметром корпуса и составом чувствительного элемента от изменения массы последнего в диапазоне от 1 до 4 мг близка к линейной.

Сигнал ТНД с абсолютной чувствительностью $1 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}$ пропорционален плотности потока тепловых нейтронов в диапазоне от 10^{11} до $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, для ТНД с чувствительностью $0,5 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}$ верхний пре-

дел этого диапазона увеличивается до $7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Ресурсные радиационные испытания подтвердили длительную работоспособность ТНД до флюенса тепловых нейтронов $2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$. Изменение чувствительности (η) ТНД разных типов в зависимости от флюенса тепловых нейтронов показано на рисунке. Здесь же приведена кривая, рассчитанная по формуле

$$\eta = \eta_0 \exp(-\langle \sigma_a \rangle F_T),$$

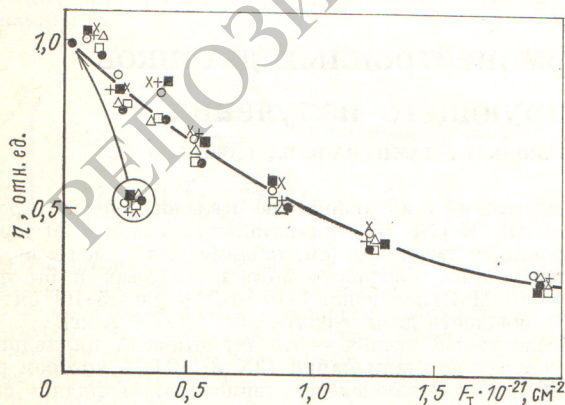
где η_0 — начальная чувствительность; F_T — флюенс тепловых нейтронов; $\langle \sigma_a \rangle$ — микроскопическое сечение поглощения ^{235}U , усредненное по расчетному спектру тепловых нейтронов, характерному для ячейки активной зоны, где проводились ресурсные испытания; в условиях нашего эксперимента $\langle \sigma_a \rangle = 635 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$. Выполненный методом наименьших квадратов подбор экспоненциальной зависимости к экспериментальным данным дает в показателе экспоненты значение $\langle \sigma_a \rangle$, равное $623 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$. Видно, что расчетное значение $\langle \sigma_a \rangle$ согласуется со значением, полученным из экспериментальных данных. Таким образом, зная спектр тепловых нейтронов в месте размещения ТНД и флюенс тепловых нейтронов для данного ТНД, можно учесть изменение его чувствительности.

Для определения чувствительности ТНД к γ -излучению были проведены измерения сигнала ТНД в активной зоне реактора, а также на радиационном γ -контуре исследовательского реактора ИРТ-2000 Института физики АН ЛатвССР, которые показали, что ТНД данного типа нечувствительны к γ -излучению до мощности дозы $\sim 2,1 \cdot 10^2 \text{ А} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Таким образом, установлено, что исследуемые ТНД по своим характеристикам находятся на уровне зарубежных образцов и пригодны для локального контроля плотности потока нейтронов в активной зоне энергонапряженного реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубовский Б. Г. и др. В кн.: Физика и теплотехника реакторов. М., Атомиздат, 1958, с. 128.
2. Емельянов И. Я. и др. Атомная энергия, 1971, т. 30, вып. 3, с. 275.
3. Сафин Ю. А. и др. Там же, 1979, т. 46, вып. 2, с. 114.
4. Bock H. Atomic Energy Rev., 1976, v. 14, N 1, p. 87.
5. Eichholz G. Nucl. Instrum. Methods, 1971, N 94, p. 131.
6. Cervellati R. e.a. Ibid., 1966, N 45, p. 221.
7. Батуров Б. Б. и др. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. 1978, вып. 1 (21), ч. 2, с. 9.



Зависимость чувствительности ТНД от флюенса тепловых нейтронов: — — расчет; Δ , $+$, $\circ$, $\square$, $\bullet$, $\times$, $\blacksquare$ — типы ТНД 1–7 соответственно (эксперимент)

Поступило в Редакцию 27.02.79