

Измерение потоков быстрых нейтронов в реакторах Ново-Воронежской АЭС

С. С. ЛОМАКИН, А. Г. МОРОЗОВ, В. И. ПЕТРОВ, П. С. САМОЙЛОВ,
Л. И. ГОЛУБЕВ, В. П. КРУГЛОВ, В. А. ВИКИН

УДК 621.039.512.45

Спектры нейтронов в реакторах первого и второго блоков Ново-Воронежской АЭС были определены методом пороговых детекторов, которые применялись в основном в виде металлических фольг. В детекторах из цинка, никеля и железа были использованы обогащенные изотопы, что позволило упростить измерения наведенной активности. Ввиду высоких температур внутри корпуса реактора детекторы из индия и магния применялись в виде керамических таблеток.

В табл. 1 приведены использованные характеристики пороговые реакции и их основные характеристики.

Облучение пороговых детекторов производилось в измерительных каналах реакторов (рис. 1): в центре активной зоны, за тепловым экраном и за корпусом реактора.

Детекторы размещались в кадмиевых ампулах диаметром 5—8 мм с толщиной стенки 0,5 мм. Размеры детекторов варьировались в зависимости от внутреннего диаметра ампул в пределах 3—5 мм по диаметру при толщине, обеспечивающей достаточную чувствительность детекторов к нейтронам. Ампула с детекторами на 0,5—5 ч вводилась в канал для облучения. Время выдержки для каждого детектора выбиралось с учетом оптимальных условий измерения активности

изотопов, образующихся в результате приведенных выше пороговых реакций.

Наведенную активность детекторов измеряли на гамма-спектрометрической установке. В качестве блока детектирования использовали ФЭУ-13 со спинтиляционным кристаллом размером 30×3 мм для измерения x -излучения Rh^{10} и кристалл размером 40×40 мм для измерения γ -излучения остальных детекторов. Сигнал с ФЭУ поступал на дифференциальный дискриминатор, ширина окна которого выбиралась таким образом, чтобы в нем полностью располагались пики поглощения, характерные для изотопов, образующихся в пороговых реакциях. Для каждого детектора аналогичные измерения проводились с калиброванным гамма-источником (см. табл. 1), испускающим γ -кванты с энергией, близкой к энергии γ -квантов измеряемого детектора.

При сравнении активностей детектора и источника коэффициенты умножения ФЭУ подбирались таким образом, чтобы амплитудные значения пиков полного поглощения совпадали. Это приводило к уменьшению ошибок из-за различной формы фотопиков. В измерениях использовался набор калиброванных гамма-источников МАГАТЭ. Соответствующие значения выхо-

Характеристики пороговых детекторов и гамма-источников

Таблица 1

Пороговая реакция	Период полураспада	Энергия измеряемой γ -линии детектора E_{γ} , Мэв	Выход γ -квантов на распад	Количество изотопа в детекторе, %	Калиброванный гамма-источник	Энергия γ -линии источника E_{γ} , Мэв	Период полураспада источника	Выход γ -квантов на распад	Эффективность регистрации γ -квантов
$Rh^{103}(n, n')Rh^{103m}$	57,5 мин	0,020	0,077	100	Am^{241}	0,018— —0,060	432,9 года	0,761	0,025
$In^{115}(n, n')In^{115m}$	4,5 ч	0,335	0,50	95,72	Hg^{203}	0,279	465,7 дней	0,814	0,0251
$Ni^{58}(n, p)Co^{58}$	71,2 дня	0,805	1,01	95,9	Mn^{54}	0,835	312,6 дня	1,00	0,033
$Fe^{54}(n, p)Mn^{54}$	312,6 дня	0,835	1,00	90	Mn^{54}	0,835	312,6 дня	1,00	0,033
$Zn^{64}(n, p)Cu^{64}$	12,88 ч	0,511	0,38	91,6	Na^{22}	0,511	2,6 года	1,797	0,0129
$Mg^{24}(n, p)Na^{24}$	15,0 ч	1,37	1,0	100	Na^{22}	1,27	2,6 года	0,9995	0,0041
$Fe^{56}(n, p)Mn^{56}$	2,58 ч	0,845	0,99	95	Mn^{54}	0,835	312,6 дня	1,00	0,0082
$Al^{27}(n, d)Na^{24}$	15,0 ч	1,37	1,0	100	Na^{22}	1,27	2,6 года	0,9995	0,0041

Измеренные активности детекторов A_i (распад/сек·ядро) и интегральные спектры быстрых нейтронов F_i (нейтр/см²·сек) в реакторах Ново-Воронежской АЭС

Таблица 2

Пороговая реакция	$E_{эфф},$ Мэв	$\sigma_{эфф},$ мбарт	Первый блок		Второй блок					
			центр активной зоны		центр активной зоны		за тепловым экраном		за корпусом реактора	
			A_i	F_i	A_i	F_i	A_i	F_i	A_i	F_i
Rh ¹⁰³ (n, n')Rh ^{103m}	1,01	1052	—	—	—	—	1,54 × 10 ⁻¹³	1,46 × 10 ⁻¹¹	4,42 × 10 ⁻¹⁴	4,2 × 10 ⁻¹⁰
In ¹¹⁵ (nn')In ^{115m}	1,36	327	12,53 × 10 ⁻¹¹	3,78 × 10 ⁻¹³	6,49 × 10 ⁻¹²	1,98 × 10 ⁻¹³	3,05 × 10 ⁻¹⁴	9,33 × 10 ⁻¹¹	4,41 × 10 ⁻¹⁵	1,35 × 10 ⁻¹⁰
Fe ⁵⁴ (np)Mn ⁵⁴	2,97	442	—	—	3,41 × 10 ⁻¹²	7,7 × 10 ⁻¹²	1,52 × 10 ⁻¹⁴	3,44 × 10 ⁻¹⁰	—	—
Ni ⁵⁸ (np)Co ⁵⁸	2,98	466	6,3 × 10 ⁻¹²	1,35 × 10 ⁻¹³	3,27 × 10 ⁻¹²	7,03 × 10 ⁻¹²	1,71 × 10 ⁻¹⁴	3,68 × 10 ⁻¹⁰	1,21 × 10 ⁻¹⁵	2,6 × 10 ⁻⁹
Zn ⁶⁴ (np)Cu ⁶⁴	3,11	161	2,22 × 10 ⁻¹²	1,38 × 10 ⁻¹³	1,19 × 10 ⁻¹²	7,4 × 10 ⁻¹²	5,6 × 10 ⁻¹⁵	3,58 × 10 ⁻¹⁰	5,67 × 10 ⁻¹⁶	3,52 × 10 ⁻⁹
Fe ⁵⁶ (np)Mn ⁵⁶	6,38	56,7	—	—	3,44 × 10 ⁻¹³	6,05 × 10 ⁻¹¹	2,87 × 10 ⁻¹⁶	4,80 × 10 ⁻⁹	3,06 × 10 ⁻¹⁷	5,40 × 10 ⁻⁸
Mg ²⁴ (np)Na ²⁴	7,11	130	—	—	3,49 × 10 ⁻¹⁴	2,68 × 10 ⁻¹¹	4,17 × 10 ⁻¹⁶	3,20 × 10 ⁻⁹	3,65 × 10 ⁻¹⁷	2,81 × 10 ⁻⁸
Al ²⁷ (nα)Na ²⁴	7,40	76	5,2 × 10 ⁻¹⁴	6,85 × 10 ⁻¹¹	1,96 × 10 ⁻¹⁴	2,57 × 10 ⁻¹⁰	2,01 × 10 ⁻¹⁶	2,64 × 10 ⁻⁹	1,85 × 10 ⁻¹⁷	2,44 × 10 ⁻⁸

дов γ -квантов, периодов полураспада и интенсивностей брались из паспортов этих источников.

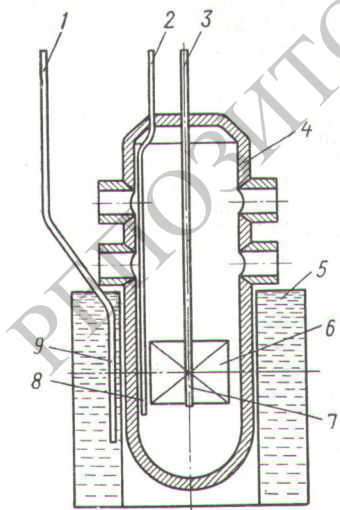
Активность детектора определялась по формуле:

$$A = \frac{n^D(t)}{W^D} f_{\phi}^D f_{\text{сз}}^D \varepsilon_{\phi}^{D0} \frac{A^0 W^O}{f_{\phi}^O f_{\text{сз}}^O n^O(t)} \times \left(\frac{e^{\lambda t_{\text{выд}}}}{1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}}} \frac{\lambda t_{\text{изм}}}{1 - e^{-\lambda t_{\text{изм}}}} \right)$$

где $n^D(t)$ и $n^O(t)$ — средняя за время измерения скорость счета γ -квантов детектора и калиброванного

Рис. 1. Расположение пороговых детекторов при измерениях на Ново-Воронежской АЭС:

1 — канал за корпусом реактора; 2 — канал за тепловым экраном; 3 — центральный канал активной зоны; 4 — корпус реактора; 5 — бак водяной защиты; 6 — активная зона; 7-9 — места расположения ампул с детекторами.



$F(E)$, нейтр/см²·сек

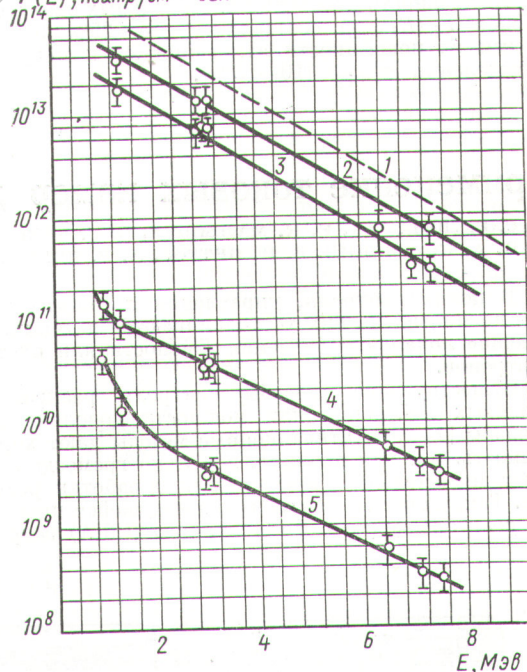


Рис. 2. Интегральные спектры быстрых нейтронов $F(E)$ в реакторах Ново-Воронежской АЭС:

1 — спектр деления; 2 — в центре активной зоны реактора первого блока; 3 — в центре активной зоны реактора второго блока; 4 — за тепловым экраном реактора второго блока; 5 — за корпусом реактора второго блока.

источника соответственно; λ — постоянная распада; A^O — активность источника; $t_{\text{выд}}$, $t_{\text{обл}}$, $t_{\text{изм}}$ — время выдержки, облучения и измерения детектора соответственно; W^D , W^O — выход γ -квантов соответствующей энергии для детектора и источника; f_{Φ}^D , f_{Φ}^O — коэффициенты, учитывающие вклад импульсов от характерных γ -квантов в общее число импульсов с амплитудой выше пороговой и зарегистрированной в «окне»; $f_{\text{св}}^D$, $f_{\text{св}}^O$ — коэффициенты самоэкранирования и рассеяния γ -квантов в детекторе и источнике соответственно; ε_{Φ}^{DO} — отношение фотоэффективности регистрации γ -квантов детектора и источника.

Измеренные активности A_i пороговых детекторов приведены в табл. 2.

Общая погрешность измерений абсолютной активности детекторов A_i составляет $\pm 4-6\%$, а для родиевых детекторов — $\pm 10\%$.

На основании измеренных значений активационных интегралов методом эффективных пороговых сечений в местах измерений были определены интегральные спектры нейтронов (рис. 2):

$$F_i(E_{i \text{эфф}}) = \int_{E_{i \text{эфф}}}^{\infty} \Phi(E) dE = \frac{A_i}{\sigma_{i \text{эфф}}}$$

Использованные при этом значения $\sigma_{i \text{эфф}}$ и $E_{i \text{эфф}}$ приведены в табл. 2. Соответствующие величины $\sigma_i(E)$ взяты из работ [1-7].

Погрешность измерения интегральных спектров нейтронов $F_i(E_{i \text{эфф}})$ составляет $\pm 15-25\%$ и складывается из погрешности измерения A_i и погрешности определения $\sigma_{i \text{эфф}}$ (10-15%).

Измеренный спектр быстрых нейтронов в активных зонах реакторов первого и второго блоков Ново-Воронежской АЭС практически совпадает со спектром деления (см. рис. 2). За тепловым экраном и корпусом реактора спектр нейтронов жестче, чем спектр деления.

Измерения, проведенные на номинальной мощности каждого реактора, показали, что использование калиброванных с высокой точностью источников МАГАТЭ увеличивает надежность результатов. Применение родия в качестве детектора значительно расширяет исследуемый интервал в наиболее интересной мягкой области энергий. Используемая методика измерения с детекторами и калиброванными источниками с близкими к детекторам характеристиками γ -излучения обеспечивает измерения абсолютной активности с ошибкой, не превышающей для отдельных детекторов $\pm 4\%$.

Поступило в Редакцию 10/VII 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Batler, D. Santri. Neutron Cross Section, 11, 803 (1968).
2. H. Menlove et al. Phys. Rev., 163, 1308 (1967); 165, No. 4, 1298 (1968).
3. J. Tompson et al. Neutron Cross Section, 1, 206 (1968).
4. J. Batler, D. Santri. Canad. J. Phys., 41, 352 (1963).
5. J. Batler, D. Santri. Canad. J. Phys., 42, 1030 (1964).
6. I. Kando, Nakasimo. Neutron Cross Section, 1, 193 (1968).
7. А. А. Лапенасидр. «Изв. АН Латв. ССР», № 4, 32 (1968).

Применение токовых камер деления в реакторах ВВЭР

С. С. ЛОМАКИН, Е. К. МАЛЫШЕВ, В. Г. БЕЛОЗЕРОВ, Л. И. ГОЛУБЕВ, В. П. КРУГЛОВ,
В. А. КОСТЮШИН, В. И. ПЕТРОВ, А. В. ШЕЛЕНИН

УДК 621.039.512.45

В целях контроля, управления и защиты реакторов во многих из них устанавливаются датчики, измеряющие локальные значения мощности или плотности нейтронов.

Существующие способы контроля распределения тепловых нейтронов или мощности довольно разнообразны [1-3]. Активационные методы дают хорошую точность, но, как правило, довольно громоздки и требуют значительного времени для обработки результатов. Так, в системе контроля с движущейся проволокой на реакторе фирмы «Янки атомик» (США) затрачива-

лось несколько часов на получение распределений тепловых нейтронов и коэффициентов неравномерности. В то же время современные пневматические системы позволяют снимать распределение нейтронов в активной зоне за несколько минут.

Маловыгорающие электронноэмиссионные датчики (датчики прямой зарядки) легки, просты по конструкции и могут иметь практически любые размеры. Детекторы с родиевым эмиттером имеют некоторую инерционность, их показания устанавливаются через 5-6 мин. С другой стороны датчики этого типа с эмит-

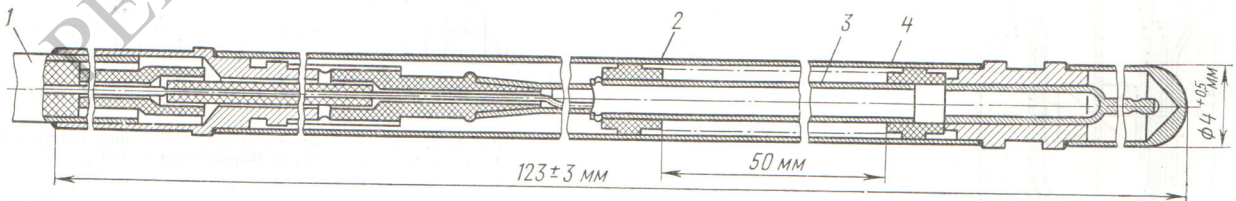


Рис. 1. Малогабаритная камера деления с U^{235} :

1 — кабель диаметром 3 мм; 2 — корпус диаметром 4 мм; 3 — электрод; 4 — радиатор активной длиной 50 мм.