

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ  
СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ФИЗИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ  
[ВНИИФТРИ]

**МЕТОДИКА  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРА НАДТЕПЛОВЫХ  
НЕЙТРОНОВ МЕТОДОМ ВЫЧИТАНИЯ ВКЛАДА  $1/v$   
МИ 71—75**

ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ  
Москва — 1976

**РАЗРАБОТАНА** Всесоюзным научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений  
**[ВНИИФТРИ]**

Директор В. К. Коробов

Руководитель темы Е. И. Григорьев

Исполнители: Р. Д. Васильев, Г. Б. Тарновский, В. П. Ярына

**ПОДГОТОВЛЕНА К УТВЕРЖДЕНИЮ** сектором госиспытаний и стандартизации Всесоюзного научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ)

Руководитель сектора И. И. Турунцов

Исполнитель И. Ш. Генфон

**УТВЕРЖДЕНА** научно-техническим советом Всесоюзного научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ)  
от 31 октября 1973 г. (протокол № 12)

## МЕТОДИКА

ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРА НАДТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ  
МЕТОДОМ ВЫЧИТАНИЯ ВКЛАДА  $1/v$ 

МИ 71—75

Настоящая методика предназначена для использования при измерении спектра надтепловых нейтронов активационным методом.

Методика устанавливает:

- 1) рекомендуемые к использованию резонансные реакции активации и значения характеризующих их ядернофизических констант;
- 2) методику восстановления дифференциального спектра нейтронов в интервале энергии нейтронов от 0,5 до 26000 эВ.

Методика подлежит дополнению и уточнению по мере расширения номенклатуры рекомендуемых к использованию реакций и уточнения значений ядернофизических констант.

## 1. НОМЕНКЛАТУРА РЕАКЦИЙ АКТИВАЦИИ И ИСХОДНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

1.1. Перечень рекомендуемых к использованию реакций с сечением активации, имеющим четко выраженный резонанс, и реакций с сечением активации, пропорциональным  $1/v$  ( $v$  — скорость нейтрона), а также значения ядернофизических констант, характеризующих эти реакции, приведены в таблице.

1.2. Исходными величинами для восстановления спектра являются ядернофизические константы реакций активации и активационные интегралы  $R_i$ . Активационный интеграл  $R_i$  [ $\text{с}^{-1}$ ] представляет собой скорость  $i$ -й реакции и определяется, исходя из измеренной активности  $i$ -го детектора  $A_i$  [рад/с], по следующей формуле

$$R_i = \frac{1}{N_i (1 - e^{-\lambda_i t_0}) e^{-\lambda_i t_b}}, \quad (1)$$

где  $N_i$  — число ядер  $i$ -го изотопа в детекторе;

$\lambda_i$  [ $\text{с}^{-1}$ ] — постоянная распада радиоактивного продукта реакции;

$t_0$  [с] — продолжительность облучения детектора;

$t_b$  [с] — промежуток времени от конца облучения детектора до начала измерения его активности.

№ п/п	Реакция	$N_m$ ядер/г	$T_{1/2}$ $\lambda$ , с <sup>-1</sup>	$E_0$ , эВ	$\Gamma$ , эВ	$\Gamma_\gamma$ , эВ	$\sigma^e$ , барн
1	$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$					1/0-детектор	
2	$^{31}\text{P}(n, \gamma)^{32}\text{P}$		$14,223 \pm 0,015$ дней $5,639 \cdot 10^{-7}$			1/0-детектор	
3	$^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116m}\text{In}$	$5,237 \cdot 10^{21}$	$54,0 \pm 0,5$ мин $2,139 \cdot 10^{-4}$	$1,456 \pm 0,002$	$0,075 \pm 0,002$	$0,072 \pm 0,002$	$39800 \pm 1300$
4	$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	$3,057 \cdot 10^{21}$	$2,695 \pm 0,002$ дней $2,976 \cdot 10^{-6}$	$4,906 \pm 0,010$	$0,140 \pm 0,003$	$0,124 \pm 0,003$	$36900 \pm 1200$
5	$^{152}\text{Sm}(n, \gamma)^{153}\text{Sm}$	$3,963 \cdot 10^{21}$	$47,1 \pm 0,1$ ч $4,087 \cdot 10^{-6}$	$8,03 \pm 0,01$	$0,201 \pm 0,008$	$0,071 \pm 0,010$	$209000 \pm 12000$
6	$^{186}\text{W}(n, \gamma)^{187}\text{W}$	$3,238 \cdot 10^{21}$	$24,04 \pm 0,09$ ч $8,007 \cdot 10^{-6}$	$18,84 \pm 0,02$	$0,369 \pm 0,007$	$0,052 \pm 0,006$	$118600 \pm 29000$
7	$^{138}\text{La}(n, \gamma)^{140}\text{La}$	$4,333 \cdot 10^{21}$	$40,22 \pm 0,02$ ч $4,786 \cdot 10^{-6}$	$72,4 \pm 0,6$	$0,150 \pm 0,030$	$0,120 \pm 0,030$	$3600 \pm 800$
8	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$	$1,021 \cdot 10^{22}$	$5,28 \pm 0,01$ лет $4,175 \cdot 10^{-9}$	$132 \pm 1$	$5,57 \pm 0,10$	$0,450 \pm 0,050$	$10190 \pm 210$
9	$^{58}\text{Mn}(n, \gamma)^{59}\text{Mn}$	$1,095 \cdot 10^{22}$	$2,576 \pm 0,002$ ч $7,472 \cdot 10^{-5}$	$337 \pm 1$	$22,5 \pm 1,0$	$0,5 \pm 0,1$	$3140 \pm 200$
10	$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$	$9,560 \cdot 10^{21}$	$12,88 \pm 0,08$ ч $1,495 \cdot 10^{-5}$	$577 \pm 1$	$1,41 \pm 0,05$	$0,550 \pm 0,070$	$1718 \pm 86$
11	$^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$	$2,619 \cdot 10^{22}$	$15,05 \pm 0,05$ ч $1,279 \cdot 10^{-5}$	$2900 \pm 50$	$424 \pm 13$	$0,35 \pm 0,04$	$560 \pm 27$
12	$^{50}\text{Cr}(n, \gamma)^{51}\text{Cr}$	$1,205 \cdot 10^{22}$	$27,8 \pm 0,1$ дней $2,885 \cdot 10^{-7}$	$5500 \pm 500$	$1600 \pm 200$	$2,9 \pm 0,9$	$472 \pm 94$
13	$^{37}\text{Cl}(n, \gamma)^{38}\text{Cl}$	$1,628 \cdot 10^{22}$	$37,29 \pm 0,04$ мин $3,097 \cdot 10^{-4}$	$25500 \pm 500$	$693 \pm 41$	25	$37 \pm 3$

Продолжение

№ п/п	$^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$		$^{21}\text{P}(\text{n}, \gamma)$		$F_2$	$F_3^{11}$	$\Theta_{\gamma}^{95}$
	$F_1$	$\Theta F_1, \%$	$F_1$	$\Theta F_1, \%$			
1							
2					1,00		
3	$3,940 \cdot 10^{-2}$ <sup>1)</sup>	1,0	750 <sup>1)</sup>	10	0,749 <sup>1)</sup>	0,975	7,5
4	$2,568 \cdot 10^{-2}$	0,4	493	10	1,00	0,9642	7,2
5	$5,63 \cdot 10^{-3}$	2,8	1080	10	1,00	0,985	18
6	$9,12 \cdot 10^{-3}$	5,7	175	13	1,00	0,9711	14
7	$2,14 \cdot 10^{-3}$	9,8	41,0	14	1,00	0,95	38
8	<sup>3)</sup>	2,7	<sup>3)</sup>	10	<sup>2)</sup>	0,9965	15
9	$3,439 \cdot 10^{-3}$	0,8	66,0	10	1,00	0,841	27
10	$1,172 \cdot 10^{-3}$	2,2	22,5	10	1,00	0,869	20
11	$1,39 \cdot 10^{-4}$ <sup>3)</sup>	1,4	2,64 <sup>1)</sup>	10	1,00 <sup>1)</sup>	0,9518	33
12	$4,43 \cdot 10^{-3}$	8,3	85	13	1,00	0,933	<sup>3)</sup>
13	$1,46 \cdot 10^{-4}$ <sup>3)</sup>	21	2,80 <sup>1)</sup>	24	1,00 <sup>1)</sup>	0,66	<sup>3)</sup>

Примечания к таблице.

1. Коэффициент имеет указанное значение при  $t_0 > 3$  мин. При меньших значениях  $t_0$  следует проводить точный учет влияния метастабильных уровней. (Васильев Р. Д. и др. в сб. Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М. Издательство стандартов, 1972, т. 2, с. 97).

5:

2. Коэффициент  $F_2$  следует рассчитывать по формуле  $F_2 = 0,54 \left\{ 1,85 + 3,78 \cdot 10^{-6} \left[ 1 - \frac{(1 - e^{-0,0662 \cdot t_0}) e^{-0,0662 \cdot t_1}}{1 - e^{-0,250 \cdot 10^{-6} \cdot t_0}} \right] \right\}$ ,

где  $t_0$  и  $t_1$  выражены в минутах.

3. Коэффициент  $F_1$  следует рассчитывать по формуле (5), в которой  $F_{2\ thi} = F_2$  из примечания 2.

Для реакции  $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  
$$\frac{\sigma_{thi}}{\sigma_{th\ 1/v}} = 9,66 \cdot 10^{-3}$$

Для реакции  $^{31}\text{P}(n, \gamma)$  
$$\frac{\sigma_{thi}}{\sigma_{th\ 1/v}} = 185,5$$

4. При облучении под кадмием вместо указанного значения  $\sigma_0^c$  следует использовать значение  $0,75 \sigma_0^c$ .

5. Для реакций  $^{50}\text{Cr}(n, \gamma)$  и  $^{37}\text{Cl}(n, \gamma)$  определение составляющей активационного интеграла, соответствующей резонансам, с погрешностью менее 100% возможно только при облучении указанных детекторов совместно с  $1/v$ -детектором в борном экране с целью снижения вклада в активность  $1/v$ -части сечения. При этом погрешность  $\Theta^{95}$  следует рассчитывать для конкретных условий эксперимента.

## 2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СПЕКТРА НАДТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

2.1. Под дифференциальным энергетическим спектром нейтронов  $\varphi(E)$  [нейтр./см<sup>2</sup> · с · МэВ] понимается зависимость дифференциальной плотности потока нейтронов от энергии нейтронов.

2.2. Рассматриваемый метод основывается на следующих предпосылках.

2.2.1. Энергетическая зависимость сечения реакции активации представляется в виде

$$\sigma_i(E) = \sigma_i^{1/v}(E) + \sum_l \sigma_i^{(l)}(E), \quad (2)$$

где  $\sigma_i^{1/v}(E)$  — энергетическая зависимость составляющей сечения реакции, пропорциональной  $1/v$ ;

$\sigma_i^{(l)}(E)$  — энергетическая зависимость составляющей сечения, обусловленной  $l$ -м резонансом реакции.

2.2.2. Энергетическая зависимость сечения реакции в области резонансов описывается формулой Брейта-Вигнера для изолированного резонанса.

2.3. Активационные интегралы  $R_i$  связаны с дифференциальным спектром нейтронов при облучении детектора в кадмневом экране следующим соотношением

$$R_i = \int_{E_{Cd}}^{\infty} \sigma_i(E) \varphi(E) \cdot dE = R_i^{1/v} + R_i^l, \quad (3)$$

где  $E_{Cd}$  — энергия кадмневой границы;

$R_i^{1/v}$  и  $R_i^l$  — составляющие активационного интеграла, обусловленные  $1/v$ -частью сечения реакции и всеми резонансами соответственно.

2.4. Использование  $1/v$ -детектора совместно с резонансным детектором позволяет выделить резонансную часть активационного интеграла  $R_i^l = R_i - R_i^{1/v}$ .

2.5. Резонансная часть активационного интеграла связана с дифференциальной плотностью потока нейтронов  $\varphi(E_{0i})$  ( $E_{0i}$  — энергия основного резонанса  $i$ -й реакции) соотношением

$$\varphi(E_{0i}) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\Gamma_{1/v} \cdot \sigma_{0i}^c} \cdot (R_i - F_{1i} \cdot R_i^{1/v}) \cdot \frac{1}{F_{2i}} \cdot \frac{1}{F_{3i}}, \quad (4)$$

где  $R_i^{1/v}$  — активационный интеграл  $1/v$ -детектора;

$\Gamma_{1/v}$  [МэВ] — радиационная ширина основного резонанса  $i$ -й реакции;

$\sigma_{0i}^c$  [см<sup>2</sup>] — сечение образования составного ядра при энергии нейтронов  $E_{0i}$ ;

$F_{1i}$ ,  $F_{2i}$ ,  $F_{3i}$  — поправочные коэффициенты, физический смысл и способы вычисления которых даны в пп. 2.5.1—2.5.3.

Значения  $\Gamma_{\gamma i}$  и  $\sigma_{oi}^c$  приводятся в таблице.

Формула (4) является основным расчетным соотношением рассматриваемого метода.

2.5.1. Поправочный коэффициент  $F_{1i}$  учитывает различие между значениями сечений поглощения тепловых нейтронов  $i$ -м резонансным и  $1/v$ -детектором. Значения  $F_{1i}$  приведены в таблице и рассчитывались по формуле

$$F_{1i} = \frac{\sigma_{thi} \cdot F_{2thi}}{\sigma_{th} \cdot F_{1/v}}, \quad (5)$$

где  $F_{2thi}$  — доля захватов нейтронов с энергией 0,0253 эВ, приводящая к рассматриваемой активности  $i$ -го резонансного детектора;

$\sigma_{thi}$  и  $\sigma_{th} \cdot F_{1/v}$  — сечения рассматриваемых реакций при энергии нейтронов 0,0253 эВ  $i$ -го резонансного и  $1/v$ -детектора соответственно.

2.5.2. Поправочный коэффициент  $F_{2i}$  определяет долю захватов нейтронов с энергией  $E_{oi}$   $i$ -м детектором, приводящую к рассматриваемой активности.

Значения  $F_{2i}$  приведены в таблице.

2.5.3. Поправочный коэффициент  $F_{3i}$  учитывает эффект самоэкранирования и вклад основного резонанса в резонансную составляющую активационного интеграла  $i$ -го детектора.  $F_{3i}$  следует рассчитывать по формуле

$$F_{3i} = F_{3i}' + \frac{1}{F_{3i}''} - 1. \quad (6)$$

Коэффициент  $F_{3i}'$  учитывает эффект самоэкранирования основного резонанса  $i$ -й реакции и вычисляется по формуле

$$F_{3i}' = \frac{1}{\sqrt{1+2N_{mi}\sigma_{oi} d_i}}, \quad (7)$$

где  $N_{mi}$  [МГ<sup>-1</sup>] — число ядер в 1 мг изотопа;

$\sigma_{oi} = \Gamma_{\gamma i} \sigma_{oi}^c / \Gamma_i$  — сечение реакции захвата при энергии  $E_{oi}$ ;

$d_i$  [мт/см<sup>2</sup>] — толщина детектора по  $i$ -му изотопу.

Значения  $N_{mi}$  и  $\sigma_{oi}^c$  приведены в таблице.

Коэффициент  $F_{3i}''$  определяет относительный вклад основного резонанса в резонансную составляющую активационного интеграла  $i$ -го детектора.  $F_{3i}''$  рассчитывается для спектра, пропорционального  $1/E$ , по формуле

$$F_{3i}'' = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^n \frac{E_{oi}}{E_{\gamma j}^{(j)}} \cdot \frac{F_{2j}^{(j)}}{F_{3i}^{(j)}} \cdot \frac{\sigma_{oi}^{(j)}}{\sigma_{oi}^c} \cdot \frac{\Gamma_{\gamma j}^{(j)}}{\Gamma_{\gamma i}}}, \quad (8)$$

где  $j$  — порядковый номер побочного резонанса;  
 $E_{\alpha}^{(j)}$ ,  $\Gamma_{\gamma}^{(j)}$  — энергия и радиационная ширина  $j$ -го побочного резонанса;  
 $\sigma_{\alpha}^{(j)}$  — сечение образования составного ядра при энергии  $E_{\alpha}^{(j)}$ ;  
 $F_{2i}^{(j)}$  — доля захватов нейтронов с энергией  $E_{\alpha}^{(j)}$ , приводящая к рассматриваемой активности.

Значения  $F_{2i}^{(j)}$  приведены в таблице.

2.6. При использовании  $n$  резонансных детекторов и одного  $1/v$ -детектора для  $n$  значений энергии в интервале 0,5—26000 эВ определяется  $n$  значений дифференциальной плотности потока надтепловых нейтронов. По этим данным строится дифференциальный спектр  $\varphi(E)$ . Для наглядности графическое построение рекомендуется выполнять в координатах  $E \cdot \varphi(E) - \lg E$ .

### 3. ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ

Для анализа погрешности измерения  $\varphi(E_0)$  используется представление формулы (4) в виде

$$\varphi(E_0) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\Gamma_{\gamma} \cdot \sigma_{\alpha}^{(j)} \cdot R_r \cdot F_2 \cdot F_3}, \quad (4')$$

где  $R_r = R - F_1 \cdot R_{1/v}$ .

Используемые в (4') константы и поправочные коэффициенты заданы с погрешностями, представляющими собой максимальную оценку систематической погрешности  $\Theta(\Gamma_{\gamma})$ ,  $\Theta(\sigma_{\alpha}^{(j)})$ ,  $\Theta(F_2)$ ,  $\Theta(F_3)$ .

Измеряемая величина  $R_r$  характеризуется случайной и систематической составляющими погрешности. Случайная составляющая может быть определена из ряда измерений  $R_r$  как среднее квадратическое отклонение  $S(R_r)$ . С учетом  $t$  (коэффициента Стьюдента для 95% доверительной вероятности) можно определить случайную погрешность  $R_r$  для 95% доверительной вероятности, которая будет характеризовать случайную составляющую погрешности определения  $\varphi(E_0)$ .

$$\sigma_{\varphi}^{(95)}(E_0) \equiv \sigma^{95}(R_r) = tS(R_r). \quad (9)$$

Систематическая составляющая погрешности  $R_r$  включает систематические погрешности  $R$ ,  $F_1$  и  $R_{1/v}$ . Для расчета максимальной оценки границы систематической погрешности  $R_r$  использовались следующие предположения:

составляющие систематической погрешности подчинены закону равновероятного распределения;

максимальные оценки границ систематических погрешностей составляют  $\Theta(R) = 5\%$ ,  $\Theta(R_{1/v}) = 5\%$ ,  $\Theta(F_1)$  — указано в таблице.

Такие значения удовлетворяют в среднем практическим возможностям экспериментального определения активационных интегралов.

В этом случае максимальная оценка границы составляющей систематической погрешности  $R_r$  определялась по формуле

$$\Theta(R_r) = \frac{1}{R_r} \sqrt{[R\Theta(R)]^2 + [R_{1/v}F_1\Theta(F_1)]^2 + [F_1R_{1/v}\Theta(R_{1/v})]^2}. \quad (10)$$

При определении конкретных значений  $\Theta(R_r)$  использовались данные о вкладе  $1/v$ -части в резонансный интеграл для  $1/E$  спектра.

Систематическая составляющая погрешности  $\varphi(E_0)$  в 95% доверительном интервале рассчитывалась по формуле

$$\Theta_{\varphi(E_0)}^{95} = 1,17 \sqrt{[\Theta(\Gamma_\gamma)]^2 + [\Theta(\sigma_0^c)]^2 + [\Theta(F_2)]^2 + [\Theta(F_3)]^2 + [\Theta(R_r)]^2}. \quad (11)$$

Результаты расчета  $\Theta^{95}$  помещены в таблице.

Общая погрешность  $\varphi(E_0)$  в 95% доверительном интервале должна определяться по формуле

$$\delta\varphi(E_0) = \sigma_{\varphi(E_0)}^{95} + \Theta_{\varphi(E_0)}^{95}, \quad (12)$$

где  $\Theta_{\varphi(E_0)}^{95}$  либо берется из таблицы, либо рассчитывается по формулам настоящего раздела.

## МЕТОДИКА

восстановления спектра над тепловых нейтронов методом вычитания  
вклада  $1/v$   
МИ 71—75

Редактор *В. П. Огурцов*

Технический редактор *В. Н. Солдатова*

Корректор *Э. В. Митяй*

Т-16373. Сдано в наб. 19.03.76. Подп. в печ. 06.10.76. 0,625 п. л. 0,47 уч.-изд. л. Т. 3000. Ц. 3 к.

Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, Москва. Д-557. Новопресненский пер., д. 3.  
Вильнюсская типография Издательства стандартов, ул. Миндаугас, 12/14. Зак. 1468