

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ
СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР**

**ВСЕОБЪЕДНЯЮЩИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ 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 институ-
том 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 институ-
та физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ)

Руководитель сектора И. И. Турунцов

Исполнитель И. Ш. Генфон

УТВЕРЖДЕНА научно-техническим советом Всесоюзного научно-ис-
следовательского института физико-технических и радиотехничес-
ких 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 [с⁻¹] представляет собой скорость i -й реакции и определяется, исходя из измеренной активности i -го детектора A_i [расп/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;
 λ_i [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	$T_{1/2}$ λ , с $^{-1}$	E_0 , эВ	Γ , эВ	Γ_γ , эВ	σ_0^c , барн
1	$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$				1/в-детектор		
2	$^{31}\text{P}(n, \gamma)^{32}\text{P}$		$14,223 \pm 0,015$ дней $5,639 \cdot 10^{-7}$		1/в-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 ± 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 ± 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 ± 12000
6	$^{186}\text{W}(n, \gamma)^{187}\text{W}$	$3,238 \cdot 10^{21}$	$24,04 \pm 0,09$ ч $8,007 \cdot 10^{-6}$	$18,84 \pm 0,02$	$0,369 \pm 0,007$	$0,052 \pm 0,006$	$118600 \pm 2900^*)$
7	$^{139}\text{La}(n, \gamma)^{140}\text{La}$	$4,333 \cdot 10^{21}$	$40,22 \pm 0,02$ ч $4,736 \cdot 10^{-6}$	$72,4 \pm 0,6$	$0,150 \pm 0,030$	$0,120 \pm 0,030$	3600 ± 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 ± 1	$5,57 \pm 0,10$	$0,450 \pm 0,050$	10190 ± 210
9	$^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$	$1,095 \cdot 10^{22}$	$2,576 \pm 0,002$ ч $7,472 \cdot 10^{-5}$	337 ± 1	$22,5 \pm 1,0$	$0,5 \pm 0,1$	3140 ± 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 ± 1	$1,41 \pm 0,05$	$0,550 \pm 0,070$	1718 ± 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 ± 50	424 ± 13	$0,35 \pm 0,04$	560 ± 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 ± 500	1600 ± 200	$2,9 \pm 0,9$	472 ± 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 ± 500	693 ± 41	25	37 ± 3

Продолжение

№ п/п	$^{10}\text{B}(\pi, \alpha)$		$^{31}\text{P}(\pi, \gamma)$		F_2	F_3^{11}	$\Theta, \%$
	F_1	$\Theta F_1, \%$	F_1	$\Theta F_1, \%$			
1							
2					1,00		
3	$3,940 \cdot 10^{-2}$ ¹⁾	1,0	756 ¹⁾	10	0,749 ¹⁾	0,975	7,5
4	$2,568 \cdot 10^{-2}$	0,4	493	10	1,00	0,9642	7,2
5	$5,63 \cdot 10^{-2}$	2,8	1080	10	1,00	0,985	18
6	$9,12 \cdot 10^{-2}$	5,7	175	13	1,00	0,9711	14
7	$2,14 \cdot 10^{-2}$	9,8	41,0	14	1,00	0,95	38
8	²⁾	2,7	³⁾	10	²⁾	0,9965	15
9	$3,439 \cdot 10^{-2}$	0,8	66,0	10	1,00	0,841	27
10	$1,172 \cdot 10^{-2}$	2,2	22,5	10	1,00	0,869	20
11	$1,39 \cdot 10^{-2}$ ¹⁾	1,4	2,64 ¹⁾	10	1,00 ¹⁾	0,9518	33
12	$4,43 \cdot 10^{-2}$	8,3	85	13	1,00	0,933	²⁾
13	$1,46 \cdot 10^{-2}$ ¹⁾	21	2,80 ¹⁾	24	1,00 ¹⁾	0,66	²⁾

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).

2.

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

где t_0 и t_n 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 σ_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 Θ^{93} следует рассчитывать для конкретных условий эксперимента.

2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СПЕКТРА НАДТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

2.1. Под дифференциальным энергетическим спектром нейтронов $\varphi(E)$ [нейтр./см² · с · МэВ] понимается зависимость дифференциальной плотности потока нейтронов от энергии нейтронов.

2.2. Рассматриваемый метод основывается на следующих предположениях.

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 кадмиевом экране следующим соотношением

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

где E_{ca} — энергия кадмиевой паницы;

$R_i^{1/v}$ и R_i' — 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 $R_i' = R_i - R_i^{1/v}$.

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

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

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

Γ_{yi} [МэВ] — радиационная ширина основного резонанса i -й реакции;

σ_{oi}^c [см²] — сечение образования составного ядра при энергии нейтронов E_{oi} ;

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 σ_{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

$$F_{1i} = \frac{\sigma_{thi} \cdot F_{2thi}}{\sigma_{th1/v}}, \quad (5)$$

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

σ_{thi} и $\sigma_{th1/v}$ — 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⁻¹] — 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 [мг/см²] — толщина детектора по i -му изотопу.

Значения N_{mi} и σ_{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

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

где j — порядковый номер побочного резонанса;
 $E_{0j}^{(j)}$, $\Gamma_{0j}^{(j)}$ — энергия и радиационная ширина j -го побочного резонанса;
 $\sigma_{0j}^{(j)}$ — сечение образования составного ядра при энергии $E_{0j}^{(j)}$;
 $F_{2j}^{(j)}$ — доля захватов нейтронов с энергией $E_{0j}^{(j)}$, приводящая к рассматриваемой активности.

Значения $F_{2j}^{(j)}$ 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 над-тепловых 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

$$\varphi(E_0) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\Gamma_{\gamma} \cdot \sigma_0^c} \cdot R_r \cdot \frac{1}{F_2} \cdot \frac{1}{F_3}, \quad (4')$$

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 $\Theta(\Gamma_{\gamma})$, $\Theta(\sigma_0^c)$, $\Theta(F_2)$, $\Theta(F_3)$.

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 $\varphi(E_0)$.

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

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 $\phi(E_0)$ в 95% доверительном интервале рассчитывалась по формуле

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

Результаты расчета Θ^{95} помещены в таблице.

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

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

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

МЕТОДИКА

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

Редактор В. П. Огурцов

Технический редактор В. Н. Солдатова

Корректор Э. В. Митяй

Г-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. Миндауго, 12/14. Зак. 1468