ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ
СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ 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

gost.e-ecolog.ru

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. Турунцова
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)

УДК 539.165.8;621.039.57;621.348.6

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

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

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;

$t_в$ [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	$^{10}B(n, \alpha)^{7}Li$				1/v-детектор		
2	$^{31}P\ (n, \gamma)^{32}P$		14,223±0,015 дней 5,639 · 10^{-7}		1/v-детектор		
3	$^{115}In(n, \gamma)^{116m}In$	5,237 · 10^{21}	54,0±0,5 мин 2,139 · 10^{-4}	1,456±0,002	0,075±0,002	0,072±0,002	39800±1300
4	$^{197}Au(n, \gamma)^{198}Au$	3,057 · 10^{21}	2,695±0,002 дней 2,976 · 10^{-6}	4,906±0,010	0,140±0,003	0,124±0,003	36900±1200
5	$^{152}Sm(n, \gamma)^{153}Sm$	3,963 · 10^{21}	47,1±0,1 ч 4,087 · 10^{-6}	8,03±0,01	0,201±0,008	0,071±0,010	209000±12000
6	$^{186}W(n,\gamma)^{187}W$	3,238 · 10^{21}	24,04±0,09 ч 8,007 · 10^{-6}	18,84±0,02	0,369±0,007	0,052±0,006	118600±2900[4]
7	$^{139}La(n, \gamma)^{140}La$	4,333 · 10^{21}	40,22±0,02 ч 4,736 · 10^{-6}	72,4±0,6	0,150±0,030	0,120±0,030	3600±800
8	$^{59}Co(n, \gamma)^{60g}Co$	1,021 · 10^{22}	5,28±0,01 лет 4,175 · 10^{-9}	132±1	5,57±0,10	0,450±0,050	10190±210
9	$^{55}Mn(n, \gamma)^{56}Mn$	1,095 · 10^{22}	2,576±0,002 ч 7,472 · 10^{-5}	337±1	22,5±1,0	0,5±0,1	3140±200
10	$^{63}Cu(n, \gamma)^{64}Cu$	9,560 · 10^{21}	12,88±0,08 ч 1,495 · 10^{-5}	577±1	1,41±0,05	0,550±0,070	1718±86
11	$^{23}Na(n, \gamma)^{24g}Na$	2,619 · 10^{22}	15,05±0,05 ч 1,279 · 10^{-5}	2900±50	424±13	0,35±0,04	560±27
12	$^{50}Cr(n, \gamma)^{51}Cr$	1,205 · 10^{22}	27,8±0,1 дней 2,885 · 10^{-7}	5500±500	1600±200	2,9±0,9	472±94
13	$^{37}Cl(n, \gamma)^{38g}Cl$	1,628 · 10^{22}	37,29±0,04 мин 3,097 · 10^{-4}	25500±500	693±41	25	37±3

Продолжение

№ п/п	$^{10}B(n, \alpha)$		$^{31}P(n, \gamma)$		F_2	F_3^{11}	$\Theta_{,\%}^{95}$
	F_1	ΘF_1, %	F_1	ΘF_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	$9{,}12 \cdot 10^{-3}$	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	[3]	2,7	[3]	10	[2]	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	$1{,}39 \cdot 10^{-4}$ [1]	1,4	2,64 [1]	10	1,00 [1]	0,9518	33
12	$4{,}43 \cdot 10^{-3}$	8,3	85	13	1,00	0,933	[5]
13	$1{,}46 \cdot 10^{-4}$ [1]	21	2,80 [1]	24	1,00 [1]	0,66	[5]

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

где t_o и $t_в$ выражены в минутах.

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

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

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

4. При облучении под кадмием вместо указанного значения σ_o^c следует использовать значение $0{,}75\,\sigma_o^c$.

5. Для реакций $^{50}Cr(n, \gamma)$ и $^{37}Cl(n, \gamma)$ 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^{95} следует рассчитывать для конкретных условий эксперимента.

2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СПЕКТРА НАДТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

2.1. Под дифференциальным энергетическим спектром нейтронов $\varphi(E)$ [нейтр./см^2 · 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

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

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

$\sigma_i^{r(l)}(E)$ — 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

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

где E_{Cd} — энергия кадмиевой границы;

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

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

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

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

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

σ_{oi}^{c} [см^2] — 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_{0i}^{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

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

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

σ_{thi} и $\sigma_{th\,1/v}$ — 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

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

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

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

где N_{mi} [мг$^{-1}$] — число ядер в 1 мг изотопа;

$\sigma_{oi}=\Gamma_{\gamma i}\,\sigma_{0i}^{c}/\Gamma_i$ — сечение реакции захвата при энергии E_{oi};

d_i [мг/см^2] — толщина детектора по i-му изотопу.

Значения N_{mi} и σ_{0i}^{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

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

где j — порядковый номер побочного резонанса;

$E_{0i}^{(j)}$, $\Gamma_{\gamma i}^{(j)}$ — энергия и радиационная ширина j-го побочного резонанса;

$\sigma_{0i}^{c(j)}$ — сечение образования составного ядра при энергии $E_{0i}^{(j)}$;

$F_{2i}^{(j)}$ — доля захватов нейтронов с энергией $E_{0i}^{(j)}$, приводящая к рассматриваемой активности.

Значения $F_{3i}^{''}$ 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

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

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 $\varphi(E_0)$.

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

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

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

Результаты расчета Θ^{95} помещены в таблице.

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

$$\delta\varphi(E_0)=\sigma^{95}_{\varphi(E_0)}+\Theta^{95}_{\varphi(E_0)}, \quad (12)$$

где $\Theta^{95}_{\varphi(E_0)}$ 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*

сб. 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

gost.e-ecolog.ru