

УДК 539.125.5.173.162.3:539.125.5.162.3

## Экспериментальное определение вероятности избежать резонансного захвата

КРОВА Л. Н., БУШУЕВ А. В., ДУВАНОВ В. М.

При рассмотрении нейтронного цикла в реакторе на тепловых нейтронах оценка вероятности избежать резонансного поглощения  $\Phi$  является одной из важнейших задач. В работах [1, 2] значение  $^{28}\Phi$  получали, комбинируя некоторые измеренные параметры и расчетные величины. Точность определения была невысокой и не удовлетворяла растущим требованиям, поэтому в дальнейшем стали использовать вместо  $\Phi$  непосредственно измеряемые параметры  $^{28}\rho$ ,  $^{28}\delta$ ,  $^{25}\delta$  и т. д.

В настоящее время в связи с развитием экспериментальных методик стало возможным достаточно точно определять  $\Phi$  на основании экспериментальных данных.

**Методика измерений.** Исходя из балансового соотношения вероятность резонансного поглощения нейтронов в топливе можно представить в виде

$$1 - \Phi = \frac{^{28}N}{^{25}N} \frac{\langle^{28}\sigma_c\rangle}{\langle^{25}\sigma_f\rangle} \frac{\exp(\kappa^2\bar{\tau})}{^{28}R_c^{25\nu} \left(1 + \frac{^{28\nu}-1}{^{25\nu}} 28\delta\right)} + \frac{(1 + ^{25}\alpha \text{eri}) \exp(\kappa^2\bar{\tau})}{^{25}R_f^{25\nu} \left(1 + \frac{^{28\nu}-1}{^{25\nu}} 28\delta\right)}, \quad (1)$$

где  $^{28}N/^{25}N$  — отношение концентраций  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  в топливе;  $^{28}R_c$ ,  $^{25}R_f$  — кадмиевые отношения для реакций  $^{238}\text{U}(n, \gamma)$  и  $^{235}\text{U}(n, f)$ ;  $^{28}\delta$  — отношение скоростей реакций деления  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  в топливе;  $^{25}\alpha \text{eri}$  — отношение скоростей реакций деления и поглощения  $^{235}\text{U}$  в топливе в надкадмиевой области энергий нейтронов;  $^{25\nu}$ ,  $^{28\nu}$  — средние числа нейтронов, испускаемых при делении ядер  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ ;  $\frac{\langle^{28}\sigma_c\rangle}{\langle^{25}\sigma_f\rangle}$  — отношение скоростей реакций захвата нейтронов  $^{238}\text{U}$  и деления  $^{235}\text{U}$  на одно ядро;  $\kappa^2$  — материалный параметр;  $\bar{\tau} = \frac{\sum_i \tau_i \Phi_i}{\sum_i \Phi_i}$ ;  $\tau_i$  — воз-

раст нейтронов с  $i$ -энергией  $i$ -резонанса;  $\Phi_i$  — вероятность избежать резонансного захвата при замедлении до энергии  $i$ -резонанса.

Очевидно, что члены в правой части выражения (1) представляют собой вероятность резонансного поглощения в  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$ , т. е.

$$1 - ^{28}\Phi = \frac{^{28}N}{^{25}N} \frac{\langle^{28}\sigma_c\rangle}{\langle^{25}\sigma_f\rangle} \frac{\exp(\kappa^2\bar{\tau})}{^{28}R_c^{25\nu} \left(1 + \frac{^{28\nu}-1}{^{25\nu}} 28\delta\right)}; \quad (2)$$

$$1 - ^{25}\Phi = \frac{(1 + ^{25}\alpha \text{eri}) \exp(\kappa^2\bar{\tau})}{^{25}R_f^{25\nu} \left(1 + \frac{^{28\nu}-1}{^{25\nu}} 28\delta\right)}. \quad (3)$$

Можно провести оценку достижимой точности определения  $^{28}\Phi$  при измерении функционалов методом  $\gamma$ -спектрометрии. Как было показано в работах [3, 4], этот метод обеспечивает высокую статистическую точность при минимальных систематических погрешностях. Измерения  $\frac{\langle^{28}\sigma_c\rangle}{\langle^{25}\sigma_f\rangle}$  и  $^{28}R_c$  проводятся на Ge(Li)-спектрометре,  $^{28}\delta$  — на сцинтилляционном. Отношение  $\frac{\langle^{28}\sigma_c\rangle}{\langle^{25}\sigma_f\rangle}$  определяется путем калибровки индикаторов в тепловой колонне, причем ско-

Погрешность  $\langle^{28}\sigma_c\rangle/\langle^{25}\sigma_f\rangle$ ,  $^{28}R_c$ ,  $^{28}\delta$  и неопределенность ядерных данных Таблица 1

Параметр	Неопределенность, %	Литература
$^{28}N/^{25}N^*$	0,4	[7]
$\langle^{28}\sigma_c\rangle/\langle^{25}\sigma_f\rangle$	1,5	[3]
$^{28}R_c$	1,5	[5]
$^{28}\delta$	2—3	[6]
$^{25\nu}$	0,3	[8]
$^{28\nu}$	0,7	[9]

\* Для природного урана.



рость реакций  $^{238}\text{U}(n, \gamma)$  и  $^{235}\text{U}(n, f)$  оценивается по интенсивности излучений  $^{239}\text{Np}$  и  $^{143}\text{Ce}$  с энергией 278 и 293 кэВ соответственно.  $^{28}R$  измеряется с помощью Cd-экрана. Значение  $^{28}\delta$  определяется методом двух фольг, регистрируя излучение продукта деления  $^{140}\text{La}$  с энергией 1,6 МэВ.

В табл. 1 приведены погрешность определения этих функционалов и неопределенность используемых в формуле (2) ядерных данных, согласно которым погрешность определения  $^{28}\phi$  составляет  $\sim 0,5\%$ , если  $^{28}\phi \approx 0,85$ .

**Измерения и результаты.** Измерения  $\frac{\langle^{28}\sigma_c\rangle}{\langle^{25}\sigma_f\rangle}$ ,  $^{28}R_c$  и  $^{28}\delta$  проводились в уран-графитовой подкритической системе [4], смонтированной на преобразователе горизонтального нейтронного пучка реактора ИРТ-2000. Структура ячейки и композиция материалов в ней описаны в работе [10]. Измерения выполнены в системах с различным отношением графита и урана ( $\frac{V_c}{V_U} = 38, 76, 152$ ) и при разной толщине водяного зазора вокруг блоков урана (0–6 мм).

Отношение  $V_c/V_U$  варьировалось изменением шага решетки. В измерениях  $\frac{\langle^{28}\sigma_c\rangle}{\langle^{25}\sigma_f\rangle}$  и  $^{28}R_c$  использовались металлические фольги из природного урана.  $^{28}\delta$  определялось с помощью металлических фольг из природного и обедненного в 11 раз урана по  $^{235}\text{U}$ . Топливные каналы экспериментальной системы содержали отдельные блочки, что приводило к неоднородностям аксиального распределения реакций  $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ ,  $^{235}\text{U}(n, f)$  и влияло на средние величины  $\frac{\langle^{28}\sigma_c\rangle}{\langle^{25}\sigma_f\rangle}$  и  $^{28}R_c$ . Соответствующие поправки определялись экспериментально и использовались при вычислении функционалов.

Значение  $^{28}\delta$  измерялось в «сухой» решетке с  $V_c/V_U = 38$  и использовалось при вычислении  $\phi$  для всех рассматриваемых решеток. Предположение о неизменности  $^{28}\delta$  основано на следующих фактах:

1. Полученная в решетке величина  $^{28}\delta$  совпадает в пределах ошибок измерений с соот-

Зависимость  $^{28}\phi$  от толщины водяного зазора

Таблица 2

Зазор, мм	$\phi_i/\phi_0$	$\Delta(\phi_i/\phi_0)$	Зазор, мм	$\phi_i/\phi_0$	$\Delta(\phi_i/\phi_0)$
0	1,000	—	4	1,037	0,007
2	1,030	0,006	6	1,055	0,007

Зависимость  $^{28}\phi$  от шага решетки

Таблица 3

$V_c/V_U$	$\phi_i/\phi_0$	$\Delta(\phi_i/\phi_0)$
38	1,000	—
76	1,092	$\pm 0,006$
152	1,142	$\pm 0,006$

ветствующим значением для одиночного стержня в графитовом замедлителе [6].

2. Величина  $^{28}\delta$  слабо меняется при окружении топливного блока слоями различных материалов [6].

3. Можно показать, что коэффициент чувствительности  $\phi$  по отношению к  $^{28}\delta$  мал ( $< 0,02$ ).

Усредненные по объему блочки функционалы  $\frac{\langle^{28}\sigma_c\rangle}{\langle^{25}\sigma_f\rangle}$ ,  $^{28}R_c$  и параметр  $^{28}\delta$ , а также ядерные данные ( $^{25}\nu = 2,448 \pm 0,008$  [8],  $^{28}\nu = 2,82 \pm 0,2$  [9]) использовались для определения  $^{28}\phi$  по формуле (2). Полученные результаты представлены в табл. 2, 3. Они нормированы на величину  $^{28}\phi$  в «сухой» решетке при  $V_c/V_U = 38$ .

В некоторых работах отмечалось, что использование Cd-экрана в топливе приводит к некоторому завышению  $^{28}R_f$ . В работе [5] показано, что значение  $^{28}R_c$ , полученное с помощью Cd-экрана и методом вычитания подкадмиевой активации  $^{238}\text{U}$  с помощью индикатора  $1/\nu$  совпадают в пределах ошибок измерений ( $\sim 2\%$ ). Видимо, величина эффекта Cd-экрана ( $\Delta^{28}R_c / ^{28}R_c$ )\* при измерениях  $^{28}R_c$  в решетке исследуемого типа не превышает 2%. Можно показать, что она связана с соответствующим значением ( $\Delta^{28} / ^{28}\phi$ )\* соотношением

$$\left(\frac{\Delta^{28}\phi}{^{28}\phi}\right)^* = \frac{1 - ^{28}\phi}{^{28}\phi} \left(\frac{\Delta^{28}R_c}{^{28}R_c}\right)^* \quad (4)$$

Таким образом, ( $\Delta^{28}\phi / ^{28}\phi$ )\* меньше ( $\Delta^{28}R_c / ^{28}R_c$ )\* в 4–5 раз.

**Определение  $^{28}I_{\text{эф}}$ .** Значение  $^{28}I_{\text{эф}}$  определялось с использованием ядерных данных [8] по следующей формуле:

$$^{28}I_{\text{эф}} = - \frac{\sum_i \xi_i \sum_s^i V_i}{^{28}N V_U} \ln ^{28}\phi \quad (5)$$

При определении объема воды и урана учитывалась блочковая структура топливного канала. Погрешность определения  $\sim 2,5\%$ . В табл. 4 представлены относительные величины  $^{28}I_{\text{эф}}$  при разной толщине водяного зазора вокруг топливных блоков. Сравнение этих данных показывает, что при толщине водяной пленки до 2 мм между ними наблюдается хорошее согласие. Однако при толщине 4 и 6 мм данные,



Зависимость  $^{28}I_{эф}$  от толщины водяного зазора

Таблица 4

Зазор, мм	$^{28}I_{эф}$ , б (метод стандарта [4])	$^{28}I_{эф}$ , б (по формуле (5))	$^{28}I_{эф}$ , б (по формуле (5) с учетом анизотропии)
0	$10,6 \pm 0,3$	$10,57 \pm 0,24$	$10,57 \pm 0,24$
2	$10,6 \pm 0,3$	$10,55 \pm 0,23$	$10,17 \pm 0,23$
4	$10,3 \pm 0,4$	$11,36 \pm 0,33$	$10,52 \pm 0,33$
6	$10,4 \pm 0,4$	$11,35 \pm 0,32$	$10,17 \pm 0,32$

Зависимость  $^{28}I_{эф}$  от отношения  $V_C/V_U$

Таблица 5

$V_C/V_U$	$^{28}I_{эф}$ , б (метод стандарта)	$^{28}I_{эф}$ , б (по формуле (5))
38	$10,6 \pm 0,3$	$10,57 \pm 0,24$
76	$11,9 \pm 0,4$	$11,18 \pm 0,34$
152	$13,9 \pm 0,5$	$13,66 \pm 0,44$

Зависимость  $^{25}\phi$  от толщины водяного зазора

Таблица 6

Зазор, мм	$\phi_i/\phi_0$	$\Delta(\phi_i/\phi_0)$	Зазор, мм	$\phi_i/\phi_0$	$\Delta(\phi_i/\phi_0)$
0	1,000	—	4	1,006	0,002
2	1,006	0,002	6	1,008	0,002

полученные по формуле (5), на 10% выше соответствующих значений, определенных методом стандарта. Это различие, по-видимому, связано с известным эффектом анизотропии рассеяния на ядрах водорода, который не учтен в формуле (5). Анизотропия рассеяния приводит к уменьшению среднего числа столкновений и средней потери энергии в водяной пленке, т. е. водяная пленка вокруг топливных блоков замедляет менее эффективно, чем в случае однородного распределения ядер воды в замедлителе. Согласие между значениями  $^{28}I_{эф}$ , полученными методом стандарта и вычисленными по формуле (5), можно улучшить, введя поправку на эффект анизотропии.

В табл. 5 приведены значения  $^{28}I_{эф}$ , полученные обоими методами в решетках с различным отношением  $V_C/V_U$ . Они подтверждают зависимость  $^{28}I_{эф}$  от  $V_C/V_U$ , что объясняется отклонением спектра надкадмиевых нейтронов в уран-графитовых решетках от распределения Ферми.

Следует отметить, что при измерении  $^{28}V_{эф}$  в работе [4] использовались те же кадмиевые экраны, что и в экспериментах по измерению  $^{28}R_c$  для определения  $^{28}\phi$ . Можно показать, что систематическая ошибка ( $\Delta^{28}I_{эф}/^{28}I_{эф}$ ), обусловленная влиянием кадмиевого экрана при определении  $^{28}I_{эф}$  методом стандарта равна  $\Delta^{28}R_c/^{28}R_c$ . При определении  $^{28}I_{эф}$  через  $\ln^{28}\phi$  погрешность ( $\Delta^{28}I_{эф}/^{28}I_{эф}$ )\*\* связана с ( $\Delta^{82}R_c/^{28}R_c$ )\* следующим соотношением:

$$\left(\frac{\Delta^{28}I_{эф}}{^{28}I_{эф}}\right)^{**} = \frac{1 - ^{28}\phi}{^{28}\phi \ln ^{28}\phi} \left(\frac{\Delta^{28}R_c}{^{28}R_c}\right)^* \approx \left(\frac{\Delta^{28}R_c}{^{28}R_c}\right)^* \quad (6)$$

Таким образом, возмущение поля нейтронов в топливе кадмиевым экраном оказывает одинаковое влияние на измерения  $^{28}I_{эф}$  обоими методами.

Определение  $^{25}\phi$  проводилось по формуле (3). Значение  $^{25}\alpha_{epi}$ , равное  $0,514 \pm 0,016$  [11],

слабо зависит от типа системы (особенно при использовании слабообогатленного или природного урана), так как определяется в основном спектром Ферми. Значение  $^{25}R_f$  измерено активационным методом с помощью кадмиевого экрана путем регистрации  $\gamma$ -излучения продукта деления  $^{143}Ce$  с энергией 293 кэВ в разбавленных алюминием фольгах из урана 90%-ного обогащения. Результаты представлены в табл. 6.

Авторы выражают признательность В. И. Наумову за полезные замечания при обсуждении результатов.

Поступила в Редакцию 31/III 1975 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Егизаров М. Б. и др. В сб.: Труды конф. АН СССР по мирному использованию атомной энергии. М., Атомиздат, 1955, с. 53.
- Громова З. И. и др. «Атомная энергия», 1957, т. 2, вып. 5, с. 411.
- Юрова Л. Н. и др. «Атомная энергия», 1972, т. 32, вып. 5, с. 412.
- Юрова Л. Н. и др. «Атомная энергия», 1975, т. 38, вып. 2, с. 95; вып. 4, с. 245.
- Бушуев А. В., Юрова Л. Н. «Атомная энергия», 1969, т. 27, вып. 4, с. 334.
- Bigham C. CRRF-1220, 1965.
- Мальшев В. И. и др. В сб.: Радиоактивные элементы в горных породах. Ч. II. Новосибирск, 1972, с. 147.
- Neutron Cross Sections. BNL-325, 1973.
- Fleishman M. «Nucl. Sci. and Engng», 1960, v. 7, p. 217.
- Голашвили Т. В. и др. «Атомная энергия», 1962, т. 13, вып. 5, с. 435.
- Eilang H. e.a. «Nucl. Sci. and Engng», 1971, v. 44, p. 188.