

## Определение нейтронных сечений изотопов ванадия для тепловых и эпитепловых нейтронов

В. П. ВЕРТЕБНЫЙ, М. Ф. ВЛАСОВ, Н. Л. ГНИДАК, Р. А. ЗАЦЕРКОВСКИЙ, А. И. ИГНАТЕНКО;  
А. Л. КИРИЛЮК, Е. А. ПАВЛЕНКО, Н. А. ТРОФИМОВА, А. Ф. ФЕДОРОВА

УДК 539.172.4.162.2

Интерес к определению нейтронных сечений изотопов ванадия связан с рядом причин. Определение сечений поглощения и рассеяния нейтронов в тепловой области позволяет оценить радиационные ширины, которые в области средних массовых чисел мало известны.

Кроме того, природный ванадий часто используется в качестве эталонного образца при изучении неупругого и упругого рассеяния нейтронов в веществе, так как он является един-

### Измерение энергетической зависимости полных нейтронных сечений природного ванадия и $V^{50}$

Все измерения были выполнены методом времени пролета на реакторе ВВР-М ИЯИ АН УССР. Для измерений использовался нейтронный спектрометр с механическим прерывателем нейтронов [5]. Энергетические интервалы, разрешение по энергии и некоторые параметры используемых образцов приведены в табл. 1.

Значения нейтронных сечений для изотопов ванадия при  $v = 2200$  м/сек

Таблица 1

Образец	Энергетический интервал, эв	Разрешение, мксек/м	Сечения, барн		
			$\sigma_{tot}$	$\sigma_{tot}(E \rightarrow \infty) = \sigma_s$	$\sigma_a$
$V_{(I)}$	110—0,1	0,5	—	4,7±0,1	5,5±0,6
$V_{(II)}$	4—0,03	1,8	—	4,70±0,03	5,31±0,05
$V_{(III)}$	1,7±0,007	3,5	10,06±0,05	4,6±0,1	5,4±0,1
$V_{(IV)}$	1,7—0,007	3,5	10,11±0,06	4,79±0,06	5,37±0,09
$V_{(V)}$	1,7—0,007	3,5	10,00±0,05	4,8±0,1	5,28±0,15
$V_{(VI)}$	1,7—0,007	3,5	10,12±0,08	4,75±0,03	5,17±0,05
$V_2^{50}O_5$	1,7—0,007	3,5	48,3±0,5	4,1±1	44±2

ственным металлом, на котором рассеяние практически полностью некогерентно. Несмотря на это, энергетическая зависимость нейтронных сечений в тепловой и эпитепловой области для изотопов ванадия и природного ванадия все же измерена с недостаточной точностью. Значения сечений рассеяния для природного ванадия, по данным различных авторов [1—4], находятся в пределах 4,7—5,13 барн, причем этот разброс часто превышает объявленную точность. Эти рассуждения побудили нас не только измерить энергетическую зависимость полного сечения природного ванадия, но и сравнить сечения рассеяния ванадия в эпитепловой области с сечениями рассеяния тех ядер, для которых они известны с высокой точностью (С, Вi).

Для  $V^{50}$ , редкого в природе нечетно-нечетного изотопа, нет сколько-нибудь надежных данных по нейтронным сечениям. В атласе [4] приводятся значения для сечений  $n, \gamma$  при  $v = 2200$  м/сек ( $220 \pm 180$ ) и ( $55 \pm 75$ ) барн.

Для измерения полных сечений природного ванадия использовался чистый металлический ванадий двух сортов с чистотой не хуже 99,7%. Образцы приготовлены в виде четырехугольных призм, чтобы измерения можно было проводить при разных толщинах. Образцы металлического ванадия  $V_{(I)} - V_{(III)}$  были получены повторной электронной переплавкой слитка с чистотой 99,7%. В результате достигнута чистота лучше 99,8%. Паспортные данные образцов приведены в табл. 2. Поправки на примеси составляют не более 0,01 барн. Изотоп  $V^{50}$  был доступен лишь в виде пятиоксида  $V_2^{50}O_5$  с обогащением 22,7% по исследуемому изотопу. Для устранения возможных ошибок, связанных с атомной структурой вещества, измерения также проведены и на пятиокиси природного ванадия.

Зависимость полных сечений природного ванадия от времени пролета нейтронов линейна во всем диапазоне энергий.

Характеристика образцов ванадия, использованных при измерении полных сечений

Таблица 2

чений от энергии:

$$\sigma_{tot} = \text{const} + \sigma_a \sqrt{\frac{0,0253}{E}},$$

Образец	Количество ядер/см <sup>2</sup> · 10 <sup>-20</sup>	Примеси
V(I)	115	Al, Fe, Si, Ni < 10 <sup>-2</sup> ; S < 5 · 10 <sup>-3</sup> ; C < 2 · 10 <sup>-2</sup> ; N <sub>2</sub> < 8 · 10 <sup>-2</sup> ; O <sub>2</sub> < 10 <sup>-1</sup>
V(II)	65	То же
V(III)	194	» »
V(IV)	110	C—0,02; N <sub>2</sub> —0,01; O <sub>2</sub> —0,03; H <sub>2</sub> —0,001; Al < 0,02; Fe < 0,01; S < 0,18
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	230	V <sub>2</sub> O <sub>4</sub> < 2%, солей аммония 1,5 · 10 <sup>-2</sup> ; тяжелых металлов 1 · 10 <sup>-2</sup> ; щелочноземельных 1 · 10 <sup>-1</sup> ; сульфатов 4 · 10 <sup>-2</sup> , хлоридов 2 · 10 <sup>-2</sup> , веществ, не растворимых в соляной кислоте, 3 · 10 <sup>-1</sup>
V <sub>2</sub> <sup>50</sup> O <sub>5</sub>	221	Fe < 0,025; Na < 0,12; Ca < 0,007; K < 0,004; Cu < 0,005; Cr—0,06

где const совпадает с сечением рассеяния и обозначена в табл. 1  $\sigma_{tot}(E \rightarrow \infty)$ ;  $\sigma_a$  — сечение поглощения нейтронов при  $v = 2200$  м/сек.

Результаты измерений на пятиокиси природного ванадия в той области энергий, где можно корректно учесть брэгговское рассеяние, в пределах статистического разброса согласуются с расчетными значениями сечений, если использовать величину 4,2 барн для сечения рассеяния на кислороде и 4,75 барн для сечения рассеяния на ванадии. Значения полных сечений пятиокиси ванадия, полученные в наших измерениях, в пределах статистического разброса хорошо согласуются со значениями, полученными в [2]. Однако эти данные не использованы для определения  $\sigma_s$  и  $\sigma_a$ , так как для решетки V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> во всем диапазоне энергий нейтронов трудно корректно учесть влияние на величину наблюдаемого сечения динамики движения атомов. Однако эти трудности не могут привести к ошибке более 8% в определении сечений поглощения нейтронов для V<sup>50</sup>.

На рис. 1 приведены полные нейтронные сечения для природного ванадия в диапазоне энергий 0,007—110 эв. Все результаты измерений обработаны по методу наименьших квадратов, при этом использована зависимость полных се-

результаты измерений полных нейтронных сечений для V<sup>50</sup> показаны на рис. 2. Эти значения получены решением системы уравнений для образцов V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и V<sub>2</sub><sup>50</sup>O<sub>5</sub> и последующим вычитанием сечения кислорода, равного 4,2 барн. Линейная зависимость  $\sigma_{tot}(E)$  для V<sup>50</sup> описывается уравнением  $\sigma_{tot} = 7,1 + 41 \sqrt{\frac{0,0253}{E}}$ ,

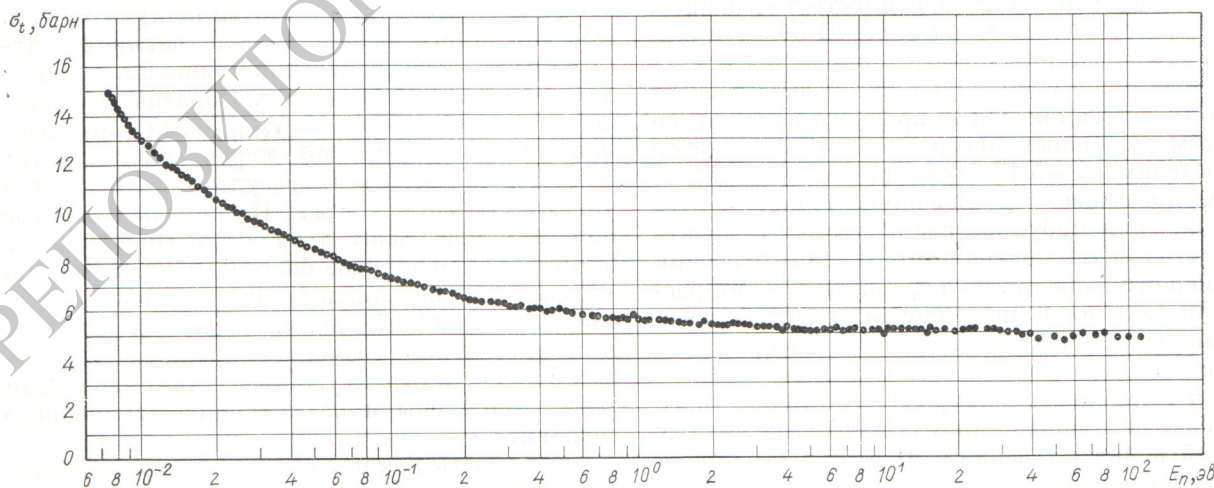


Рис. 1. Энергетическая зависимость полного нейтронного сечения природного ванадия.

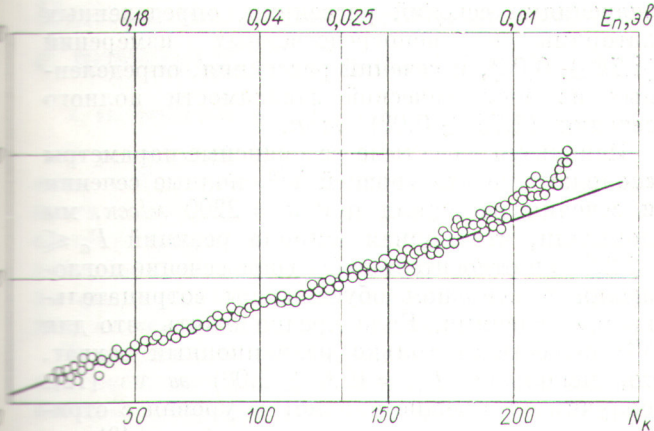


Рис. 2. Полное нейтронное сечение  $V^{50}$  в зависимости от энергии нейтронов (верхняя шкала) или от времени пролета нейтронов (нижняя шкала), где  $N_k$  — номер канала временного анализатора. Пунктиром отмечена скорость нейтронов ( $v = 2200$  м/сек).

причем сечение рассеяния определено путем непосредственного измерения в 4л-геометрии. Эта зависимость с точностью лучше 5% согласуется с экспериментальными данными в интервале энергий 0,12—0,025 эв.

**Нейтронные сечения рассеяния  $V^{50}$  и природного ванадия**

Полное сечение рассеяния природного ванадия сравнивалось с полным нейтронным сечением рассеяния реакторного графита и висмута высокой чистоты. Измерения выполнены по методу времени пролета в 4л-геометрии с использованием счетчика нейтронов, наполненного  $He^3$ . Эффективность детектора при энергии нейтронов 0,0253 эв составляла 100%, при энергии 1 эв — 50%. Методика учета многократного рассеяния и ослабления потока нейтронов в образце и другие подробности приведены в работах [7, 8]. Для получения результатов использован энергетический диапазон 0,5—5 эв. В табл. 3 указаны характеристики использованных образцов, а в табл. 4 — значения сечений рассеяния, полученные в результате измерений сечения ванадия относительно сечений висмута и графита (эталонов). Статистическая точность измерений в широком интервале энергий составляет 0,6%.

Измерения 2, 3, 5 выполнены не столько для определения сечения рассеяния ванадия, сколько для проверки корректности методики введения поправок, учитывающих многократное рассеяние и ослабление потока нейтронов в образ-

це. Поправки измерений 1 и 4 составляют около 2%, в измерениях же 2, 3, 5 они велики. Тем не менее получаются согласующиеся результаты. Сечения рассеяния для эталонов были заимствованы из работ [9, 10]. Следует отметить, что в литературе для висмута есть набор значений сечений, отличающихся на величины, выходящие за пределы статистических ошибок. Лишь приведенное в табл. 4 значение согласуется с наиболее вероятным значением сечения рассеяния ванадия по результатам наших измерений, которое составляет  $(4,75 \pm 0,03)$  барн.

Сечение рассеяния  $V^{50}$  найдено вычитанием из полного сечения рассеяния образца  $V_2^{50}O_5$ , обогащенного  $V^{50}$ , сечения рассеяния  $V^{51}$  и сечения кислорода, принятого равным 3,8 барн.

Характеристика образцов, использованных при измерении сечений рассеяния

Таблица 3

Номер измерения	Образец	Количество ядер/см <sup>2</sup> · 10 <sup>-20</sup>	$n\sigma_{tot}$ при $v = 2200$ м/сек	Содержание элемента, %
1	$V_{(I)}$ (металл)	72,6	~ 0,07	> 99,7
2	$V_{(II)}$ (металл)	371	0,378	99,7
3	$V_{(III)}$ (металл)	711	0,725	99,7
4	Графит реакторный $C_{(I)}$	170	~ 0,1	—
5	Графит реакторный $C_{(II)}$	351	0,15	—
6	Bi (металл)	52,1	0,05	99,9
7	$V_2^{50}O_5$	9,9	0,056	—

Сечения рассеяния ванадия относительно висмута и графита

Таблица 4

Номер измерения	Образец	Эталон	$\sigma_s$ эталона, барн	$\sigma_s$ образца, барн
1	$V_{(I)}$	Bi	9,29 [9]	$4,73 \pm 0,08$
2	$V_{(II)}$	Bi	9,29 [9]	$4,80 \pm 0,08$
3	$V_{(III)}$	Bi	9,29 [9]	$4,79 \pm 0,08$
4	$V_{(I)}$	$C_{(I)}$	4,74 [10]	$4,75 \pm 0,02$
5	$V_{(I)}$	$C_{(II)}$	4,74 [10]	$4,71 \pm 0,05$
6	$V_2^{50}O_5$	$V_{(I)}$	4,74	$7,5 \pm 0,6$

В энергетическом диапазоне 0,5—5 эв в пределах 0,6 барн сечение рассеяния не зависит от энергии, среднее значение по интервалу составляет  $(7,5 \pm 1)$  барн. Сравнительно большая ошибка в сечении рассеяния связана с тем, что неточно известно влияние связи кислорода в кристаллической решетке на величину сечения рассеяния.

### Обсуждение результатов

Наиболее достоверные значения полных и парциальных сечений по результатам наших измерений для изотопов ванадия приведены в табл. 5. Они получены путем статистического

Значения нейтронных сечений изотопов ванадия, рекомендованные авторами

Таблица 5

Изотоп	$\sigma_{tot}$ , барн	$\sigma_a$ , барн	$\sigma_s$ , барн
V <sup>50</sup> Природный ванадий	$48,3 \pm 0,5$ $10,06 \pm 0,03$	$41 \pm 4$ $5,28 \pm 0,03$	$7,5 \pm 1$ $4,75 \pm 0,03$

усреднения по всем сериям измерений на разных образцах с учетом всех известных ошибок. При этом значения  $\sigma_{tot}$  и  $\sigma_a$  относятся к точке  $v = 2200$  м/сек;  $\sigma_s$  имеет смысл сечения рассеяния на свободном ядре;  $\sigma_a$  — сечение поглощения нейтронов,  $\sigma_{tot}$  — полное сечение. Заметим, что неопределенности в сечении рассеяния, полученного экстраполяцией полного сечения к  $E \rightarrow \infty$ , связанные с неточностью определения времени пролета, могут составлять 0,2 барн. Верхний предел ошибки, связанной с неопределенностью в концентрации химических примесей, может составлять не более 0,02 барн. Ошибки, приведенные в табл. 5, фактически учитывают как статистический разброс, так и возможный дрейф аппаратуры во времени. Данные для V<sup>50</sup> получены непосредственными измерениями впервые, поэтому сравнение с предыдущими результатами нецелесообразно.

Полное сечение рассеяния нейтронов на природном ванадии, полученное авторами, заметно ниже значений, полученных другими авторами:  $(5,07 \pm 0,1)$  [3] и  $(5,13 \pm 0,02)$  барн [6]. Согласно в пределах ошибок есть с данными работы [2]  $(4,8 \pm 0,2)$  барн и работы [11], в которой приводится значение сечения рассеяния при  $E_n = 1,44$  эв, равное 4,74 барн. Следует отметить, что имеется хорошее согласие между

значениями сечений рассеяния, определенных авторами из непосредственных измерений  $(4,74 \pm 0,03)$ , и сечений рассеяния, определенных из энергетической зависимости полного сечения  $(4,75 \pm 0,02)$  барн.

Используя известные резонансные параметры «положительных» уровней V<sup>50</sup>, полные сечения и сечения рассеяния при  $v = 2200$  м/сек, мы показали, что полная ширина реакций  $\Gamma_a \leq 2,2$  эв и относительно большое сечение поглощения в основном обусловлены «отрицательными» уровнями. Если предположить, что для V<sup>50</sup> существует только радиационный захват, то, используя  $\Gamma_\gamma = (0,6 \pm 0,08)$  эв из [12], получим следующие параметры уровня с отрицательной энергией:  $|E_0| = (125 \pm 10)$  эв,  $2g\Gamma_n^0 = (0,4 \pm 0,4)$  эв. Для V<sup>51</sup> получено, что  $\Gamma_\gamma \leq 2$  эв. В работе [13] показано, что  $\Gamma_\gamma = 2,05$  эв для V<sup>51</sup>. Однако литературные источники не подтверждают эту величину. При такой ширине сечение в тепловой точке полностью объясняется вкладом «положительных» уровней, причем оптическая длина рассеяния должна быть равной 6,4 ферми.

В заключение авторы выражают благодарность М. В. Пасечнику за внимание к работе, В. С. Золотареву и Л. Д. Груздевой за любезное предоставление изотопа V<sup>50</sup>, Г. С. Падуноу и В. Л. Нечитайло за помощь в работе.

Поступила в Редакцию 21/VII 1972 г.

### ЛИТЕРАТУРА

- R. Schmunk et al. Nucl. Sci. and Engng, 7, 193 (1960).
- P. Egelstaff. AERE, N/R 1147 (1953).
- V. Brockhouse. Canad. J. Phys., 31, 432 (1953).
- Neutron Cross Sections. BNL-325. Second Edition. Suppl. No. 2, Vol II AZ-21 to 40.
- М. Ф. Власов, А. Л. Кирилюк. «Укр. физ. ж.», 8, 947 (1963).
- И. В. Гордеев и др. Ядерно-физические константы. М., Госатомиздат, 1963.
- В. П. Вертебный и др. Нейтронная физика. Труды Совещания. Киев, «Наукова думка», 1971.
- В. П. Вертебный и др. «Укр. физ. ж.», 13, 605 (1968).
- W. Trifshäuser. Z. Physik, 186, 23 (1965).
- L. Koester, W. Nistler. Phys. Rev. Letters, 27, 956 (1971).
- L. Rayburn, E. Wollan, Nucl. Phys., 61, 381 (1965).
- С. П. Капчигашев. «Атомная энергия», 19, 294 (1965).
- С. М. Захаров и др. «Ядерные константы». вып. 7(2), 49 (1974).