

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСУ Cr-52 МЕТОДОМ ЗСУВУ СЕРЕДНЬОЇ ЕНЕРГІЇ ФІЛЬТРОВАНИХ НЕЙТРОНІВ

О.О. Грицай, А.К. Гримало, В.В. Колотий

Інститут ядерних досліджень НАН України, пр. Науки, 47, Київ, 03680
e-mail: agrymalo@kinr.kiev.ua

Дослідження параметрів резонансів на фільтрованих нейтронних пучках та їх визначення з набору перерізів, отриманих на одному і тому ж фільтрі, є можливим за рахунок незначного зсуву середньої енергії фільтра. Зміна енергії фільтра проводилась з використанням залежності енергії нейтрона від кута розсіювання. Для розрахунків було використано спектр фільтра з середньою енергією 53.6 кеВ, зразок-розсіювач – вуглець. Було розглянуто резонанс Cr 52 з енергією 50.156 кеВ. Для аналізу чутливості усереднених перерізів зі зміною параметрів резонансу проведено розрахунки повного нейтронного перерізу ядра Cr-52 з використанням однорівневої формули Брейта-Вігнера. Для визначення чутливості методу змінювали енергію резонансу на $\pm 1\%$ та ширину нейтронної лінії на $\pm 10\%$, $\pm 5\%$ та $\pm 1\%$. В результаті було зроблено висновок, що найбільш ефективні щодо чутливості до параметрів резонансу будуть вимірювання повного нейтронного перерізу при середній енергії фільтра 49.2 кеВ, що відповідає вимірюванням під кутом 60° .

Інтенсивні нейтронні пучки (10^6 – 10^8 нейтрон/см²·с), що формуються композиційними фільтрами на Київському дослідницькому реакторі ВВР-М, дозволяють досліджувати усереднені нейтронні перерізи в області енергій нейтронів від декількох кілоелектронвольт до декількох сотень кеВ з дуже високою точністю. Це велика перевага методики фільтрованих пучків. Доволі велика ширина (квазімоноенергетичність) фільтрованої нейтронної лінії в деяких випадках також є однією з переваг методики. Так, коли проводяться дослідження в області нерозділених резонансів, доволі велика ширина фільтра дозволяє припускати, що в такий енергетичний діапазон попадає достатньо багато резонансів, щоб можна було говорити про їх статистичний розподіл. Однак, в разі дослідження ядер, коли відстань між резонансами лежить в межах декількох десятків кеВ, велика ймовірність того, що один-два резонанси попадуть в діапазон енергетичної ширини квазімоноенерге-

тичної лінії. Як відомо, це призводить до самоекранування перерізу, врахування якого проводять шляхом вимірювань зразків з різними товщинами і екстраполяванням спостережуваних перерізів до нульової товщини зразка. Звичайно, при виконанні екстраполявання точність визначення перерізу стає суттєво гіршою. Визначити параметри резонансу з таких вимірювань неможливо.

Перспективною з точки зору дослідження параметрів резонансів на фільтрованих нейтронних пучках є ідея визначення їх з набору перерізів, отриманих на одному і тому ж фільтрі, але з незначним зсувом середньої енергії фільтра.

Зміна середньої енергії фільтрованого пучка може відбуватися завдяки декільком процесам, а саме: 1) завдяки резонансному поглинанню нейтронів при введенні додаткових компонент до складу фільтра; 2) завдяки передачі частини енергії ядру віддачі при проходженні нейтрона через встановлений на пучок зра-

зок-конвертор; 3) завдяки залежності енергії від кута при пружному розсіянні нейтрона на встановленому на пучку зразку-розсіювачі. В даній роботі для зміни середньої енергії фільтрованого пучка використовувалась третя методика.

Для розрахунків зміни середньої енергії фільтрованого пучка в даній роботі розглядався фільтр з первісною середньою енергією 53.6 кеВ, як зразки-розсіювачі було взято декілька ядер: Al, Ni, Cu, Mg, C, Be, Ti. Фільтр, з середньою енергією, близькою до 53.6 кеВ, реально існує у відділі, він використовувався в експериментальних дослідженнях [1]. Даний фільтр було перераховано і доповнено новими компонентами. Розрахунок фільтра було проведено за допомогою програми FILTER_5. Для визначення чистоти фільтра, внеску домішкових ліній, тощо додатково до програми FILTER-5 було використано дві програми: STEP_1 та STEP_2. Склад композиційного фільтра з середньою енергією 53.6 кеВ наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Склад фільтра з середньою енергією нейтронів 53.6 кеВ.

Елемент	Si	S	Mn	Al	¹⁰ B
Товщина, г/см ²	256.3	76.8	6.26	5.39	0.5

Розрахунковий спектр нейтронів після фільтра наведено на рис. 1.

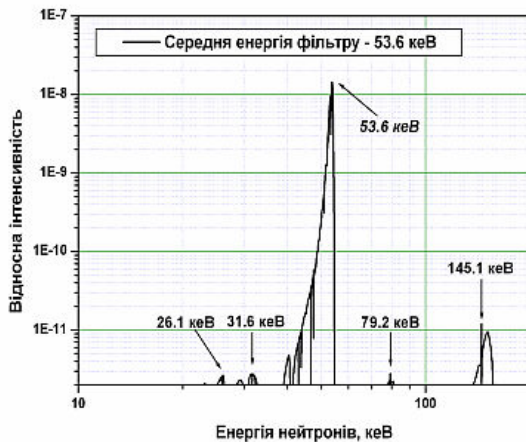


Рис. 1. Розрахунковий спектр нейтронів після фільтра з середньою енергією 53.6 кеВ.

Енергія домішкових ліній та їх внесок по відношенню до всього спектру представлено в таблиці 2.

Таблиця 2. Внесок домішкових ліній по відношенню до всього спектру.

Енергія домішкової лінії, кеВ	26.1	31.6	79.2	145.1
Внесок, %	0.02	0.025	0.006	0.028

Розрахункова чистота фільтра – 99.7%. Розрахункові середня енергія та ширина основної нейтронної лінії (на рівні 95 % відгуку) після фільтра становлять:

$$53.6 \pm_{2.6}^{0.4} \text{ кеВ.}$$

Для зміни первісної середньої енергії фільтра було використано відому залежність енергії розсіяних нейтронів від кута розсіяння, яка має наступний вигляд:

$$E' = E \times \frac{m^2}{(M + m)^2} \times \left(\cos \theta + \sqrt{\frac{M^2}{m^2} - \sin^2 \theta} \right)^2 \quad (1)$$

Використовуючи дану формулу було розраховано енергетичну залежність розсіяних нейтронів для ядер-розсіювачів Al, Ni, Cu, Mg, C, Be, Ti для енергії налітаючих нейтронів 53.6 кеВ. Дану залежність представлено на рис. 2.

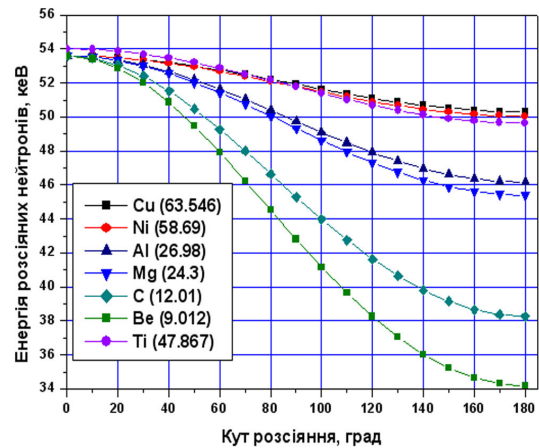


Рис. 2. Енергетична залежність розсіяних нейтронів на ядрах-розсіювачах C, Mg, Al, Ni, Cu, Be, Ti від кута розсіювання для первісної енергії нейтронів 53.6 кеВ.

Для подальших досліджень як зразок-розсіювач було вибрано вуглець. Цей вибір обумовлено тим, що він дозволяє при зміні кута від 0° до 180° змінювати енергію в широкому діапазоні: від 53.6 кеВ до

38.2 кеВ. Результати розрахунків зміни енергії розсіяних нейтронів від кута розсіяння для вуглецю-розсіювача наведено в таблиці 3.

Для дослідження можливості визначення параметрів резонансу з експериментально отриманого набору перерізів було проведено розрахунки щодо чутливості вимірювання повного нейтронного перерізу при різних середніх енергіях фільтра.

Як досліджуване ядро було вибрано Cr-52, розглядалась можливість вивчення параметрів резонансу з енергією $E_0 = 50.156$ кеВ, спіном $J = 1/2$, нейтронною шириною резонансу $\Gamma_n = 1.529$ кеВ, радіаційною шириною $\Gamma_\gamma = 641.7$ меВ (параметри резонансу взято з бібліотеки ENDF/B-VII [2]). Повний нейтронний переріз Cr-52 (обчислений за допомогою програми PREPRO-2000 на основі ENDF/B-VII) в діапазоні енергії від 40 до 60 кеВ представлено на рис 3.

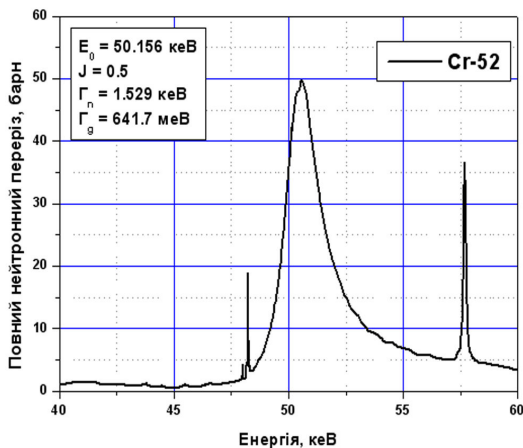


Рис.3. Енергетична залежність повного нейтронного перерізу ядра хрому-52 в області енергії від 40 до 60 кеВ.

За допомогою програми GROUPIE (з PREPRO-2000 [3]) для кожної зміненої енергії фільтра було проведено розрахунки усередненого по спектру фільтра повного нейтронного перерізу Cr-52:

$$\langle \sigma_i \rangle = \frac{\int_{E_1}^{E_2} \sigma_i(E) \Phi(E) dE}{\int_{E_1}^{E_2} \Phi(E) dE}, \quad (2)$$

де $\sigma_i(E)$ – повний нейтронний переріз Cr-52, $\Phi(E)$ – функція, що описує форму нейтронного спектру після фільтра, E_1 , E_2 – ліва та права енергетична межа фільтра. Результати цих розрахунків представлено в таблиці 4.

Для більшої наочності результати цих розрахунків разом з повним нейтронним перерізом хрому-52 представлено також на рис. 4. Лініями показано пораховані усереднені значення перерізу хрому-52, довжина лінії відображає ширину фільтра, над кожною з ліній вказано кут розсіяння, поряд з лінією наведено значення середньої енергії фільтра, в дужках - усереднене значення перерізу при відповідній енергії $E_{сеп}$. Курсивом наведено різницю значень усереднених перерізів при сусідніх кутах розсіяння, в дужках – відносне значення різниці у відсотках.

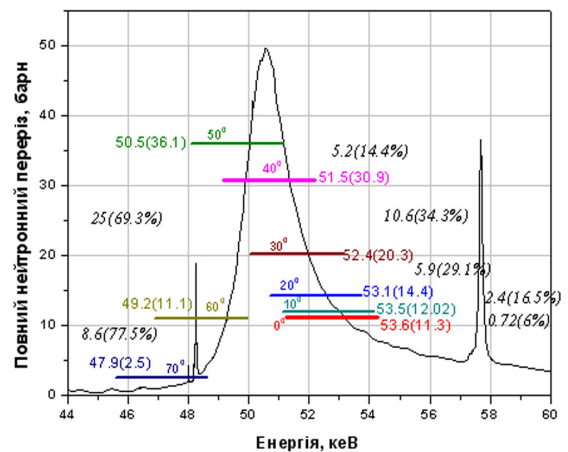


Рис. 4. Результати розрахунків усередненого по спектру фільтра повного нейтронного перерізу Cr-52 при різних середніх енергіях фільтра $E_{сеп}$.

Як видно з результатів розрахунків, навіть при незначній зміні середньої енергії фільтра зміни в спостережуваних усереднених повних нейтронних перерізах повинні проявлятися достатньо сильно. При забезпеченні точності вимірювання повних нейтронних перерізів краще 2% (що є абсолютно реальним для методики фільтрованих нейтронів) ці зміни можливо ідентифікувати експериментально, що дає підстави зробити висновок про можливість визначення параметрів такого резонансу з набору усереднених перерізів,

виміряних при різних середніх енергіях фільтру.

Для визначення чутливості методу щодо визначення параметрів резонансу з експериментально отриманого набору перерізів було проведено два варіанти розрахунків.

1. Досліджували зміну усереднених повних нейтронних перерізів при різних середніх енергіях фільтру $E_{\text{сєр}}$ при зміні енергії резонансу на $\pm 1\%$.
2. Досліджували зміну усереднених повних нейтронних перерізів при різних середніх енергіях фільтру $E_{\text{сєр}}$ при зміні нейтронної ширини резонансу на $\pm 10\%$, $\pm 5\%$ та $\pm 1\%$.

При проведенні цих розрахунків повний нейтронний переріз ядра Cr-52 обчислювався з використанням однорівневої формули Брейта-Вігнера [4].

Результати першого варіанту розрахунків - усереднені повні нейтронні перерізи при різних середніх енергіях фільтру $E_{\text{сєр}}$ в припущенні, що енергія резонансу $E_0=50156.0$ еВ відрізняється на $\pm 1\%$, - представлено на рис.5. Чисельні значення розрахованих усереднених перерізів наведено у таблиці 5. В стовпчиках 5 та 7 в дужках наведено відношення різниці перерізів порахованих в припущенні, що енергія резонансу E_R відрізняється від первісного значення $E_0=50156.0$ еВ на $\pm 1\%$, та перерізу в припущенні, що $E_R=E_0=50156.0$ еВ.

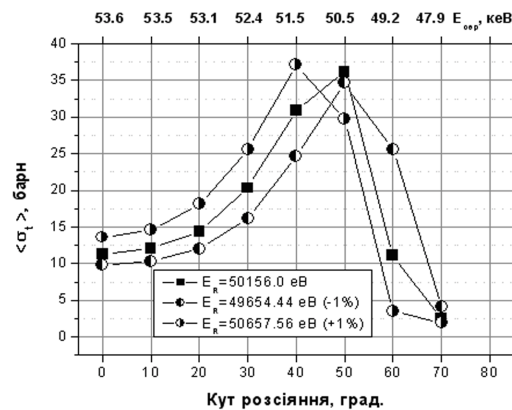


Рис. 5. Розраховані значення усередненого повного нейтронного перерізу хрому-52 при зміні початкової енергії резонансу $E_R=E_0=50156.0$ еВ на $\pm 1\%$.

Як добре видно з рис. 5 та таблиці 5, найбільш чутливими до положення резонансу будуть виміри усередненого повного нейтронного перерізу хрому-52 при середніх енергіях фільтру 49.2, 52.4 та 53.5 кеВ, що відповідає вимірюванням під кутами 60° , 30° та 20° .

Результати досліджень зміни усереднених повних нейтронних перерізів при різних середніх енергіях фільтру $E_{\text{сєр}}$ при зміні нейтронної ширини резонансу на $\pm 10\%$, $\pm 5\%$ та $\pm 1\%$ представлено в таблицях 6, 7 та 8, а також для більшої наочності перший з цих результатів представлено на рисунку 6.

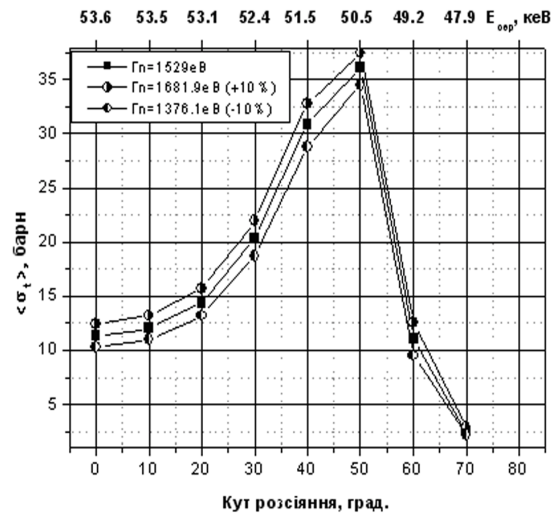


Рис. 6. Розраховані значення усередненого повного нейтронного перерізу хрому-52 при зміні початкової нейтронної ширини резонансу на $\pm 10\%$.

Як видно з таблиці 6 та рис. 6 зміна початкової нейтронної ширини резонансу на $\pm 10\%$ буде найсильніше проявлятися в зміні значення усередненого повного нейтронного перерізу хрому-52 при середніх енергіях фільтру $E_{\text{сєр}}$ 49.2, 53.5 та 53.6 кеВ, що відповідає вимірюванням під кутами 60° , 10° та 0° . З таблиці 7 видно, що зміна початкової нейтронної ширини резонансу на $\pm 5\%$ буде найсильніше проявлятися в зміні значення усередненого повного нейтронного перерізу хрому-52 при середніх енергіях фільтру 49.2 та 47.9 кеВ, при інших значеннях $E_{\text{сєр}}$ відмінності не перевищуватимуть 4.9%. Змі-

на значення усередненого повного нейтронного перерізу хрому-52 при зміні початкової нейтронної ширини резонансу на $\pm 1\%$ майже при всіх значеннях середніх енергій фільтра $E_{\text{сеп}}$ не перевищує 2% (див. таблицю 8).

У результаті проведеного аналізу можливо зробити висновок, що вимірювання з

точністю краще 2% повного нейтронного перерізу хрому-52 при різних середніх енергіях кремнієвого фільтра $E_{\text{сеп}}$ дасть змогу визначити параметри s-резонансу в районі енергії 50 кеВ з точністю: 1) положення резонансу – краще, ніж 1%; 2) нейтронну ширину резонансу – краще 5%.

Таблиця 3. Енергія розсіяних нейтронів в залежності від кута розсіяння для ядра-розсіювача вуглецю.

Кут, град	0⁰	10 ⁰	20 ⁰	30 ⁰	40 ⁰	50 ⁰	60 ⁰	70 ⁰	80 ⁰	90 ⁰
Енергія, кеВ	53.6	53.5	53.1	52.4	51.5	50.5	49.2	47.9	46.5	45.2
Кут, град	0⁰	100 ⁰	110 ⁰	120 ⁰	130 ⁰	140 ⁰	150 ⁰	160 ⁰	170 ⁰	180 ⁰
Енергія, кеВ	53.6	43.9	42.6	41.5	40.5	39.7	39.0	38.5	38.3	38.2

Таблиця 4. Результати розрахунків усередненого по спектру фільтру повного нейтронного перерізу Cr-52 при різних середніх енергіях фільтру $E_{\text{сеп}}$.

Кут j, град.	$E_{\text{сеп}}$, кеВ	$\langle\sigma_t\rangle$, барн	$\langle\sigma_t\rangle_{j+1}-\langle\sigma_t\rangle_j$, барн	$\frac{\langle\sigma_t\rangle_{j+1}-\langle\sigma_t\rangle_j}{\langle\sigma_t\rangle_j}$, %
0	53.6	11.3	0.72	6
10	53.5	12.02	2.4	16.5
20	53.1	14.4	5.9	29.1
30	52.4	20.3	10.6	34.3
40	51.5	30.9	5.2	14.4
50	50.5	36.1	25	69.3
60	49.2	11.1	8.6	77.5
70	47.9	2.5	1.57	62.8

Таблиця 5. Розраховані значення усередненого повного нейтронного перерізу хрому-52 при зміні початкової енергії резонансу $E_R=E_0=50156.0$ еВ на $\pm 1\%$.

Кут, град.	$E_{\text{сеп}}$, кеВ	$\langle\sigma_t\rangle$, барн $E_R=E_0=50156$ еВ	$\langle\sigma_t\rangle_1$, барн $E_R=E_0+1\%$	$\langle\sigma_t\rangle_1-\langle\sigma_t\rangle$, барн	$\langle\sigma_t\rangle_2$, барн $E_R=E_0-1\%$	$\langle\sigma_t\rangle_2-\langle\sigma_t\rangle$, барн
0	53.6	11.3	13.6	2.3(20.4%)	9.8	1.5(13.3%)
10	53.5	12.02	14.6	2.6(21.5%)	10.3	1.7(14.3%)
20	53.1	14.4	18.1	3.7(25.7%)	12.0	2.4(16.7%)
30	52.4	20.3	25.6	5.3(26.1%)	16.2	4.1(20.2%)
40	51.5	30.9	37.1	6.2(20.1%)	24.6	6.3(20.4%)
50	50.5	36.1	29.7	6.4(17.7%)	34.6	1.5(4.2%)
60	49.2	11.1	3.5	7.6(68.5%)	25.6	14.5(130.6%)
70	47.9	2.5	1.9	0.6(24%)	4.1	1.6(64%)

Таблиця 6. Розраховані значення усередненого повного нейтронного перерізу хрому-52 при зміні початкової нейтронної ширини резонансу на $\pm 10\%$.

Кут, град	$E_{сер}$, кеВ	$\langle\sigma_t\rangle$, барн $\Gamma_n=1529\text{eВ}$	$\langle\sigma_t\rangle_1$, барн $\Gamma_{nR}=\Gamma_n+10\%$	$\langle\sigma_t\rangle_1-\langle\sigma_t\rangle$, барн	$\langle\sigma_t\rangle_2$, барн $\Gamma_{nR}=\Gamma_n-10\%$	$\langle\sigma_t\rangle_2-\langle\sigma_t\rangle$, барн
0	53.6	11.3	12.4	1.1(9.7%)	10.3	1 (8.8%)
10	53.5	12.02	13.2	1.18(9.8%)	10.95	1.07 (8.9%)
20	53.1	14.4	15.7	1.3(9.0%)	13.2	1.2 (8.3%)
30	52.4	20.3	21.9	1.6 (7.9%)	18.7	1.6 (7.9%)
40	51.5	30.9	32.8	1.9 (6.1%)	28.8	2.1 (6.8%)
50	50.5	36.1	37.5	1.4 (3.9%)	34.5	1.6 (4.4%)
60	49.2	11.1	12.6	1.5 (13.5%)	9.5	1.6 (14.1%)
70	47.9	2.5	2.9	0.4 (0.16%)	2.2	0.3 (0.12%)

Таблиця 7. Розраховані значення усередненого повного нейтронного перерізу хрому-52 при зміні початкової нейтронної ширини резонансу на $\pm 5\%$.

Кут, град	$E_{сер}$, кеВ	$\langle\sigma_t\rangle$, барн $\Gamma_n=1529\text{eВ}$	$\langle\sigma_t\rangle_1$, барн $\Gamma_{nR}=\Gamma_n+5\%$	$\langle\sigma_t\rangle_1-\langle\sigma_t\rangle$, барн	$\langle\sigma_t\rangle_2$, барн $\Gamma_{nR}=\Gamma_n-5\%$	$\langle\sigma_t\rangle_2-\langle\sigma_t\rangle$, барн
0	53.6	11.3	11.8	0.5 (4.4%)	10.8	0.5(4.4%)
10	53.5	12.02	12.6	0.58(4.8%)	11.5	0.52(4.3%)
20	53.1	14.4	15.1	0.7(4.9%)	13.8	0.6(4.2%)
30	52.4	20.3	21.1	0.8(3.9%)	19.5	0.8(3.9%)
40	51.5	30.9	31.9	1(3.2%)	29.9	1(3.2%)
50	50.5	36.1	36.8	0.7(1.9%)	35.3	0.8(2.2%)
60	49.2	11.1	11.9	0.8(7.2%)	10.3	0.8(7.2%)
70	47.9	2.5	2.7	0.2(8%)	2.3	0.2(8%)

Таблиця 8. Розраховані значення усередненого повного нейтронного перерізу хрому-52 при зміні початкової нейтронної ширини резонансу на $\pm 1\%$.

Кут, град	$E_{сер}$, кеВ	$\langle\sigma_t\rangle$, барн $\Gamma_n=1529\text{eВ}$	$\langle\sigma_t\rangle_1$, барн $\Gamma_{nR}=\Gamma_n+1\%$	$\langle\sigma_t\rangle_1-\langle\sigma_t\rangle$, барн	$\langle\sigma_t\rangle_2$, барн $\Gamma_{nR}=\Gamma_n-1\%$	$\langle\sigma_t\rangle_2-\langle\sigma_t\rangle$, барн
0	53.6	11.3	11.4	0.1(0.9%)	11.2	0.1(0.9%)
10	53.5	12.02	12.1	0.08(0.7%)	11.9	0.12(0.99%)
20	53.1	14.4	14.6	0.2(1.4%)	14.3	0.1(6.9%)
30	52.4	20.3	20.5	0.2(1%)	20.1	0.2(0.99%)
40	51.5	30.9	31.1	0.2(0.6%)	30.7	0.2(0.6%)
50	50.5	36.1	36.3	0.2(0.6%)	36.0	0.1(0.3%)

Література

1. Пшеничный В.А., Грицай Е.А., Гнидак Н.Л. Изомерное отношение ^{151}Eu для тепловых нейтронов и нейтронов с энергией 2, 55 и

144 кеВ. – Вопросы атомной науки и техники, сер: Ядерные константы, 1986, в. I, с.9.

2. "ENDF-201, ENDF/B-VI Summary Documentation", Brookhaven National Laboratory Report BNL-NCS-1741, 4th Edition, October 1991, Edited P.F. Rose.
3. Cullen D.E. The 1992 ENDF Pre-processing Codes // IAEA-NDS-39 – Rev.7. – Feb. 1992.
4. Власов Н.А., Нейтроны. М., 1955, с.137.

STUDIES OF Cr-52 RESONANCE PARAMETERS BY FILTERED NEUTRON AVERAGE ENERGY SHIFT METHOD

O.O.Gritzay, A.K.Grymalo, V.V.Koloty

Institute for Nuclear Research, NAS of Ukraine, Pr. Nauky 47, Kyiv, 03680
e-mail: agrymalo@kinr.kiev.ua

Studies of resonance parameters at filtered neutron beams and their determination from the set of neutron cross sections obtained at the same filter are possible due to a slight shift of the average energy of the filter. The filter energy was varied using the neutron energy dependence on the scattering angle. The spectrum of the filter with the average energy 53.6 keV and carbon as a sample-scatterer were used in the calculations. The resonance of Cr-52 with the energy 50.156 keV was studied. For the analysis of sensitivity of the averaged cross sections to the variation of the resonance parameters, Cr-52 total neutron cross section was calculated using Breit-Wigner single-level formula. In order to determine the method sensitivity, the energy of resonance was changed within $\pm 1\%$ and the neutron line width within $\pm 10\%$, $\pm 5\%$ and $\pm 1\%$. As a result, the measurements of total neutron cross section at the average energy 49.2 keV, corresponding to the angle 60° , were concluded to be the most sensitive to the resonance parameters.

