

**ВИМІРЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОГО ПОВНОГО НЕЙТРОННОГО ПЕРЕРІЗУ
ІЗОТОПУ ^{52}Cr ПРИ ЕНЕРГІЇ 24 кеВ**

О. О. Грицай, В. В. Колотий, О. І. Кальченко, П. М. Ворона, М. Л. Гнідак

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Повний нейтронний переріз ядра ^{52}Cr отримано для нейтронів з енергією 24 кеВ. У вимірюваннях було використано методику пропускання фільтрованих нейтронів з горизонтального каналу реактора ВВР-М зразком металевого хрому (збагачення по ^{52}Cr – 99,3 %, товщина зразка – $1,208 \cdot 10^{23}$ ядер/см²). Оптимізовано склад (залізо, алюміній, сірка, бор-10) та характеристики нейтронного фільтра для формування нейтронного пучка з максимальною інтенсивністю основної лінії $24,3 \pm 0,8$ кеВ і мінімальними домішковими лініями в спектрі нейтронів, для чого виконано попередні розрахунки нейтронного спектра з використанням сучасних оцінених нейтронних даних з бібліотеки JENDL-3.2. Наведено розраховану форму спектра фільтрованих нейтронів та експериментальне значення інтенсивності пучка нейтронів з 8-го горизонтального каналу реактора, що було оцінено за допомогою методу активації ^{197}Au . Отримане значення ефективного повного нейтронного перерізу ^{52}Cr для квазімоноенергетичних нейтронів 24 кеВ – $\sigma_{t, \text{eф}} = 2,099 \pm 0,012$ б порівнюється з відомими експериментальними даними з бібліотеки CSISRS та з перерізами, розрахованими на основі п'яти бібліотек оцінених ядерних даних.

Експериментальне дослідження величини повного нейтронного перерізу ядра ^{52}Cr було проведено на дослідницькому реакторі ВВР-М у рамках Програми з ядерних даних для фундаментальних досліджень та прикладних задач, яка протягом останніх двох десятиліть успішно реалізується в ІЯД НАН України. Потреба в прецизійних даних для ядра ^{52}Cr обумовлена тим, що наведені в бібліотеках оцінених ядерних даних (ENDF/B-VI, JENDL-3.2 тощо) повні нейтронні перерізи відрізняються в межах ± 80 %. Разом з тим необхідна точність для потреб реакторів поділу, що наведена в Списку найбільш пріоритетних запитів ядерних даних [1], для ядра ^{52}Cr становить 3 %; важливість отримання таких даних віднесено в цьому Списку до найвищого пріоритету.

Виконані на реакторі методичні розробки та створена експериментальна база дозволяють проводити прецизійні вимірювання повних нейтронних перерізів з точністю краще 1 % [2], а в деяких випадках - 0,1 % [3]. На рис. 1. наведено схему установки для нейтронних досліджень на ГЕК-8. Установка складається з таких систем: формування пучка квазімонохроматичних нейтронів, детектування та реєстрації нейтронів, керування експериментальними зразками, радіаційного захисту спектрометра.

Система формування пучка включає елементи колімації та фільтрації нейтронів на шляху від активної зони реактора до детектора. З рис. 1 видно, що попереднє формування потрібної геометрії пучка реалізовано за допомогою двох коліматорів із заліза та карбїду бору. Коліматори встановлено за шибром каналу, вони мають загальну довжину 600 мм (заліза 390 і 210 мм карбїду бору). Колімуючий отвір в них 40 мм при діаметрі каналу 60 мм. Подальше формування пучка відбувається в перших трьох дисках шибера та виносному коліматорі. Колімаційна система забезпечує сходження пучка на зразок 12 мм/м, що відповідає діаметру пучка на зразку 10 мм.

До складу системи детектування та реєстрації нейтронів входили: пропорційний водневий лічильник типу СНМ-38 (склад наповнення – 90 % H_2 + 9,56 % CH_4 + 0,44 % $^3\text{He}_2$, тиск – 3 атм, робоча напруга – 2500 В), електронні блоки, персональний комп'ютер IBM PC-286/287 та лінії зв'язку. Спеціальна конструкція об'єднувала пропорційний лічильник і попередній підсилювач. Сигнал з підсилювача через кабельну лінію передавався до вимірювального центру, де через головний підсилювач БУІ-3К та електронні блоки КАМАК надходив до персонального комп'ютера. Комп'ютерна програма вимірювання ZERKIN-3

керує послідовністю виконання експерименту та накопичує експериментальні спектри в пам'яті комп'ютера.

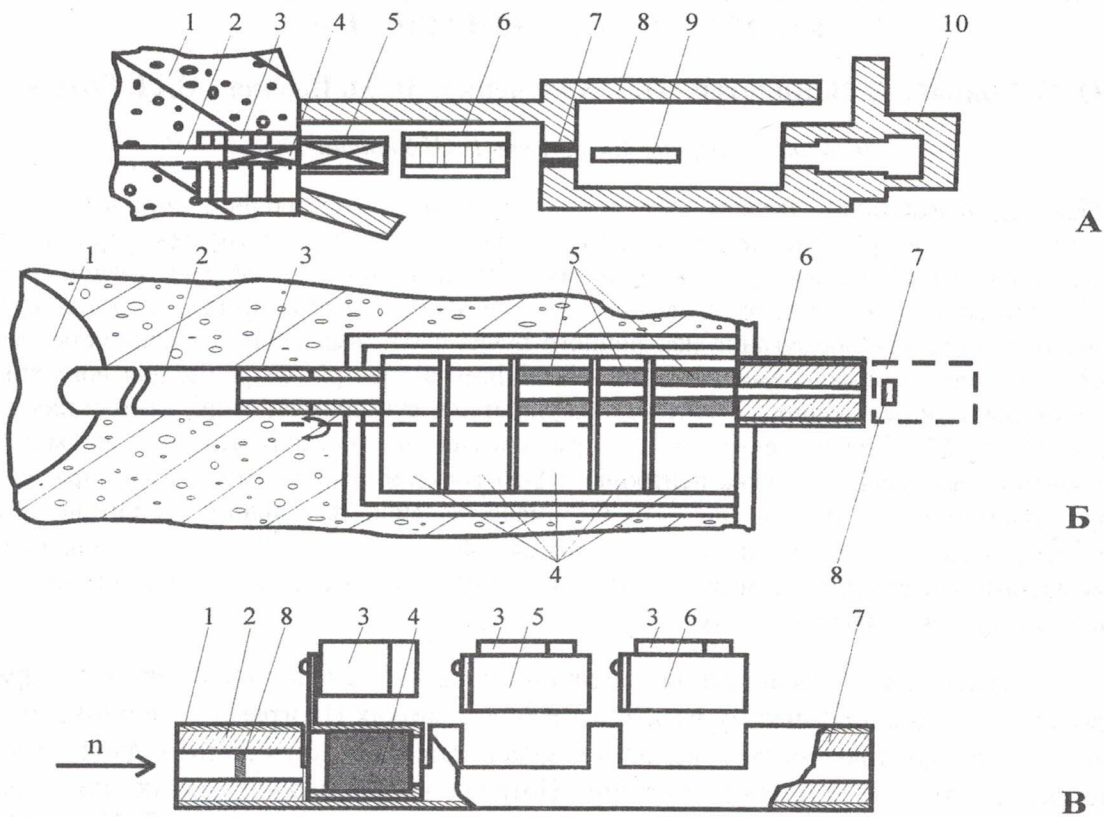


Рис. 1. А. Схема установки для вимірювання повних нейтронних перерізів: 1 - біологічний захист реактора; 2 - горизонтальний канал ГЕК-8; 3 - шибер; 4 - колімаційно-фільтруючі збірки; 5 - виносний коліматор; 6 - пристрій для переміщення зразків; 7 - вхідний коліматор детекторного відсіку; 8 - радіаційний захист установки; 9 - детектор нейтронів; 10 - уловлювач нейтронного пучка. Б. Схема системи формування пучка: 1 - берилієвий відбивач нейтронів; 2 - труба горизонтального каналу; 3 - первинні коліматори; 4 - диски шибера; 5 - колімаційно-фільтруючі збірки; 6 - виносний коліматор; 7 - пристрій для перестановки зразків; 8 - зразок ^{197}Au . В. Схема пристрою для зміни зразків: 1 - центруюча труба для встановлення зразків на пучку; 2 - вхідний коліматор; 3 - електромотор з блоком керування; 4, 5, 6 - зразки; 7 - вихідний коліматор; 8 - зразок ^{197}Au .

Система керування експериментальними зразками забезпечує встановлення на нейтронний пучок зразків з певним чергуванням, що задається перед початком вимірювання в програмі ZERKIN-3. Одночасно в систему можна завантажити три зразки й ставити їх на пучок у будь-якій послідовності та комбінації.

Систему радіаційного захисту спектрометра складено з двох відсіків. У першому розташовано виносний коліматор з елементами формування пучка й пристрій для дистанційної зміни зразків на пучку. У другому відсіку розміщено детекторну збірку, електронні блоки для її живлення та уловлювач нейтронного пучка.

Для отримання пучка нейтронів з середньою енергією близько 24 кеВ було використано такий набір фільтруючих компонентів: природне залізо (армко) – $236,1 \text{ г/см}^2$; алюміній – $115,02 \text{ г/см}^2$; сірка – $19,02 \text{ г/см}^2$ і бор-10 – 1 г/см^2 . Спектр нейтронів, сформований таким фільтром, було розраховано на основі нейтронних перерізів з бібліотеки оцінених ядерних даних JENDL-3.2 за програмою FILTER, розробленою у відділі нейтронної фізики. Ця програма дозволяє задавати довільний склад фільтра як за кількісними, так і компонентними параметрами. На рис. 2 наведено розрахунковий спектр нейтронів із середньою енергією 24,3 кеВ для варіанта фільтра, використаного в експерименті, а також

наведено енергетичну залежність перерізу захоплення нейтронів ядром ^{197}Au в цьому діапазоні енергій, розраховану на основі бібліотеки JENDL-3.2. Вузькі провали в розрахунковому спектрі нейтронів після фільтра викликані нейтронними р-резонансами ізотопів заліза ($^{56,57}\text{Fe}$) та сірки (^{33}S).

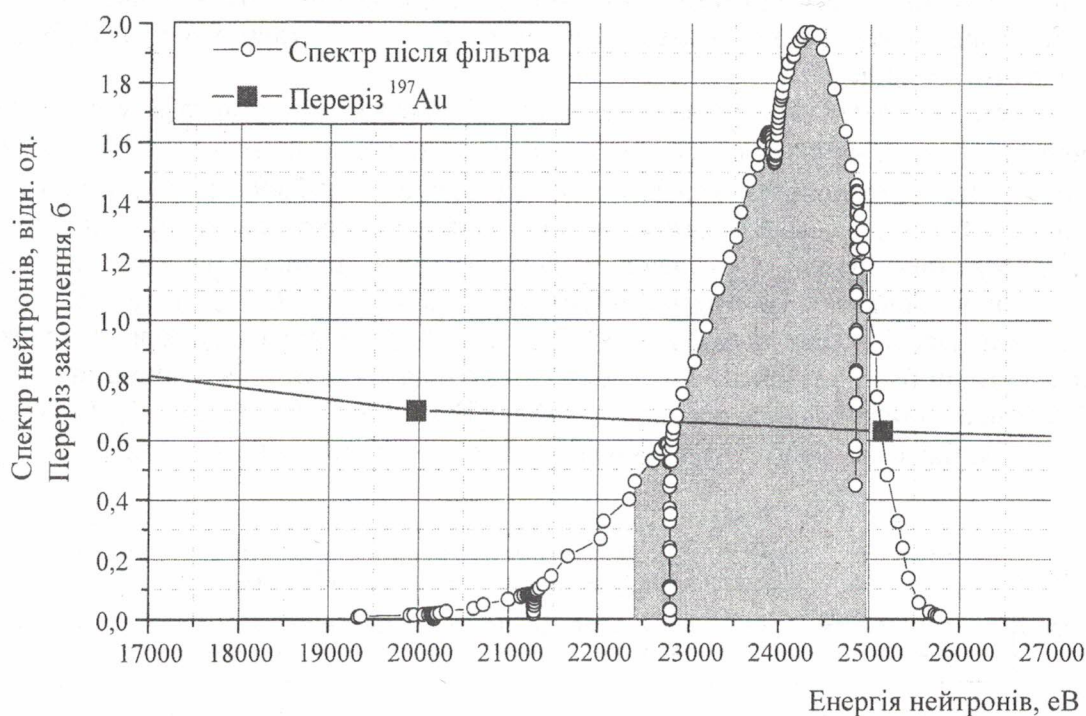


Рис. 2. Розрахунковий спектр нейтронів та переріз захоплення нейтронів ядром ^{197}Au .

Для визначення абсолютної інтенсивності нейтронного потоку квазімоноенергетичної лінії 24,3 кеВ одночасно з вимірюваннями повних перерізів було опромінено зразок ^{197}Au . Зразок мав діаметр 10 і товщину 0,1 мм. Для запобігання активації зразка розсіяними повільними нейтронами його було вміщено в кадмієвий контейнер з товщиною стінок 1 мм. Розташування зразка при опроміненні було показано на рис. 1. Усереднене по лінії 24,3 кеВ значення перерізу захоплення становило 0,647 б. Усереднення було проведено в діапазоні енергій 19,34 - 25,78 кеВ. Границі вибрано на рівні відносної інтенсивності нейтронного потоку 0,01.

Активність зразка ^{197}Au вимірювалась на Ge(Li)-спектрометрі з використанням гамма-лінії 412 кеВ. Було проведено 24 вимірювання наведеної активності зразка ^{197}Au , кожен по 0.5 год. Отримане значення нейтронного потоку для фільтра, використаного в експерименті, складає $(2,28 \pm 0,20) \cdot 10^5$ нейтрон/(см²·с). Зазначимо, що наведена похибка 8,9 % включає статистичну точність експериментальних значень площі під піком (8,3 %), а також точності сталої розпаду золота ($T_{1/2} = 2.697 \pm 0.003$ дня), абсолютного квантового виходу для гамма-лінії 412 кеВ ($I_\gamma = 95,5 \pm 0,1$), ефективності спектрометра ($\epsilon = 0.00625 \pm 0.00020$) та кількості ядер у зразку $N_0 = (1,8854 \pm 0,0038) \cdot 10^{20}$ ядер.

Зразок ^{52}Cr було виготовлено із металевого порошку, яким заповнено алюмінієвий контейнер з внутрішнім діаметром 31,75 мм. Товщина зразка становила $(1,208 \pm 0.004) \cdot 10^{23}$ ядер/см², ізотопне збагачення – 99,3 %. Для визначення фонових відліків одночасно проведено вимірювання зразка поліетилену товщиною 0,731г/см². Для забезпечення високої статистичної точності вимірювання тривали майже 30 год. З метою усунення впливу нестабільностей зміна зразків на нейтронному пучку проводилась через кожну хвилину. Всього було зроблено сім серій вимірювань, у кожній серії було зареєстровано по чотири

вимірювання зразка ^{52}Cr , по одному вимірюванню зразка й поліетилену, порожнього алюмінієвого контейнера ("прямий пучок") та алюмінієвого контейнера й поліетилену. Пропускання зразка було розраховано для кожного вимірювання зразка ^{52}Cr за формулою

$$T = \{N_{зр} - N_{зр+PE}\} / \{N_{п/п} - N_{п/п+PE}\},$$

N – число нейтронів, зареєстрованих лічильником за однаковий проміжок часу, відповідно: де $N_{зр}$ – після зразка; $N_{зр+PE}$ – після зразка + поліетилен; $N_{п/п}$ – у "прямої пучку"; $N_{п/п+PE}$ – у "прямої пучку" + поліетилен.

Ці значення пропускань приведено на рис. 3 залежно від номера вимірювання ^{52}Cr . Усереднене по всім вимірюванням значення пропускання дорівнювало $0,7710 \pm 0,0007$, що відповідає ефективному повному нейтронному перерізу $\sigma_t^{eф} = 2,099 \pm 0,012$ б при точності 0,6 %. Ця похибка складається із статистичної похибки вимірювань пропускання - 0,35 %, похибок зважування зразка та визначення його розмірів, точності ізотопного складу та впливу домішок, поправки на внесок інших ізотопів хрому ^{50}Cr , ^{53}Cr та ^{54}Cr (згідно з паспортом їхні масові внески складають 0,1, 0,5 та 0,1 % відповідно). Переріз для кожного з цих трьох ізотопів було визначено як середнє п'яти значень перерізів, отриманих на основі п'яти бібліотек оцінених ядерних даних ENDF/B-VI, JENDL-3.2, JEF-2, CENDL-2 та BROND-2. Похибку середнього визначено як середньоквадратичне відхилення.

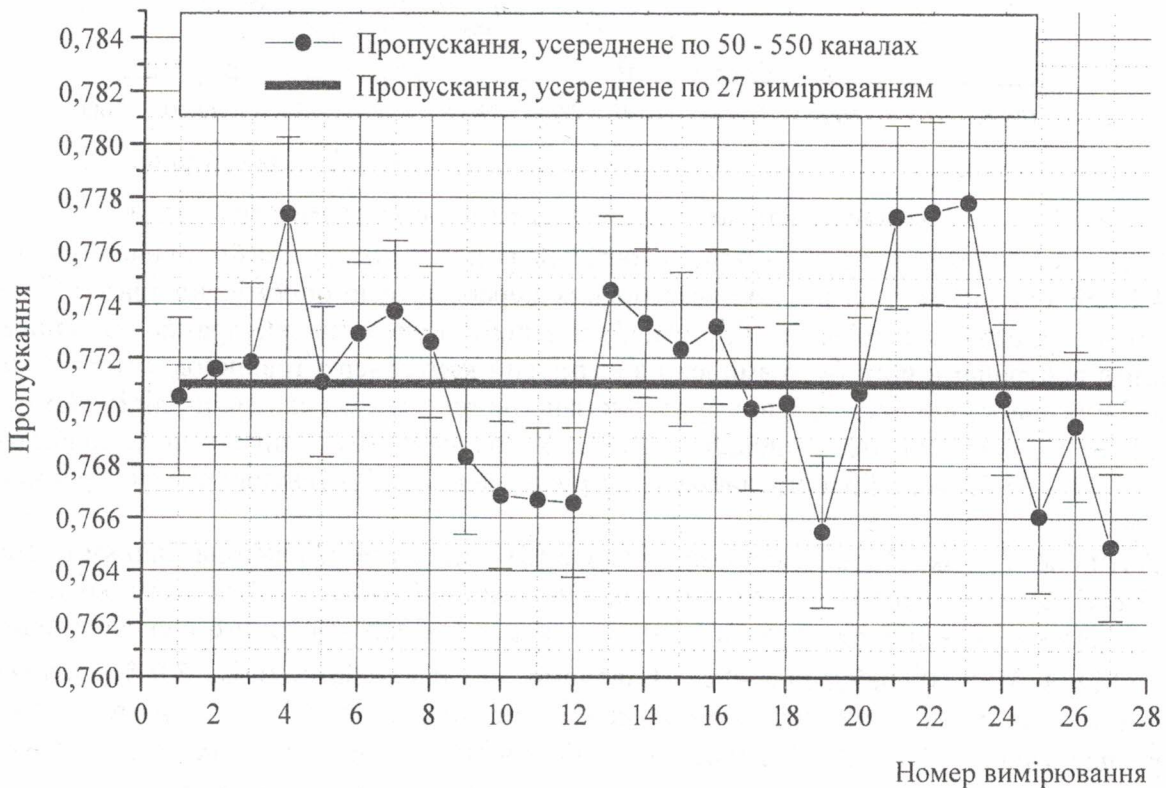


Рис. 3. Пропускання зразка ^{52}Cr .

У таблиці наведено усереднені значення перерізу ^{52}Cr $\sigma_t^{розр.}$ та фактори резонансного самоекранування $K_{се}^{розр.}$, що було пораховано на основі вказаних бібліотек оцінених ядерних даних. Діапазон усереднення такий же, як і при усередненні перерізу золота, тобто 19,34 – 25,78 кеВ, функція зважування відповідає формі спектра після фільтра (див. рис. 2). В останньому рядку таблиці наведено ефективні розрахункові перерізи $K_{се}^{розр.} \cdot \sigma_t^{розр.}$ та експериментальне значення ефективного перерізу, що було отримано в даній роботі. Оскільки в нашій роботі не було досліджено експериментальне значення коефіцієнта

самоекранування, то можемо лише оцінити межі неекранованого перерізу ^{52}Cr , скориставшись мінімальним та максимальним значенням із порахованих $K_{\text{се}}^{\text{розр.}}$, а саме 0,8418 та 0,9663. Такі межі розходження $K_{\text{се}}^{\text{розр.}}$ викликані тим, що параметри єдиного в цьому діапазоні p -резонансу 22,98 кеВ суттєво відрізняються в наведених бібліотеках оцінених ядерних даних. На жаль, параметри цього резонансу не було уточнено в останніх вимірюваннях ^{52}Cr у резонансній області з високим розділенням [6], оскільки аналіз починався з енергії 48 кеВ.

Порівняння усереднених повних нейтронних перерізів ^{52}Cr для різних ENDF/B бібліотек та експериментального значення, отриманого з нейтронним фільтром 24 кеВ

Джерело	ENDF/B-6	JENDL-3.2	JEF-2.2	BROND-2	CENDL-2	Дана робота
$\sigma_t^{\text{розр.}}$, б	2,8265	1,5600	1,3319	1,1957	1,5600	-
$K_{\text{се}}^{\text{розр.}}$	0,9663	0,8655	0,8430	0,8418	0,8655	-
$\sigma_t^{\text{еф.}}$, б	2,7312	1,3502	1,1228	1,0065	1,3502	$2,099 \pm 0,012$

Виходячи із зазначених мінімального та максимального значень $K_{\text{се}}^{\text{розр.}}$ та отриманого експериментального значення ефективного повного нейтронного перерізу $2,099 \pm 0,012$ б, можна зробити висновок, що діапазон можливого значення повного нейтронного перерізу ізоотопу ^{52}Cr лежить у межах від $2,172 \pm 0,012$ до $2,493 \pm 0,014$ б (ширина смуги 0,321 б).

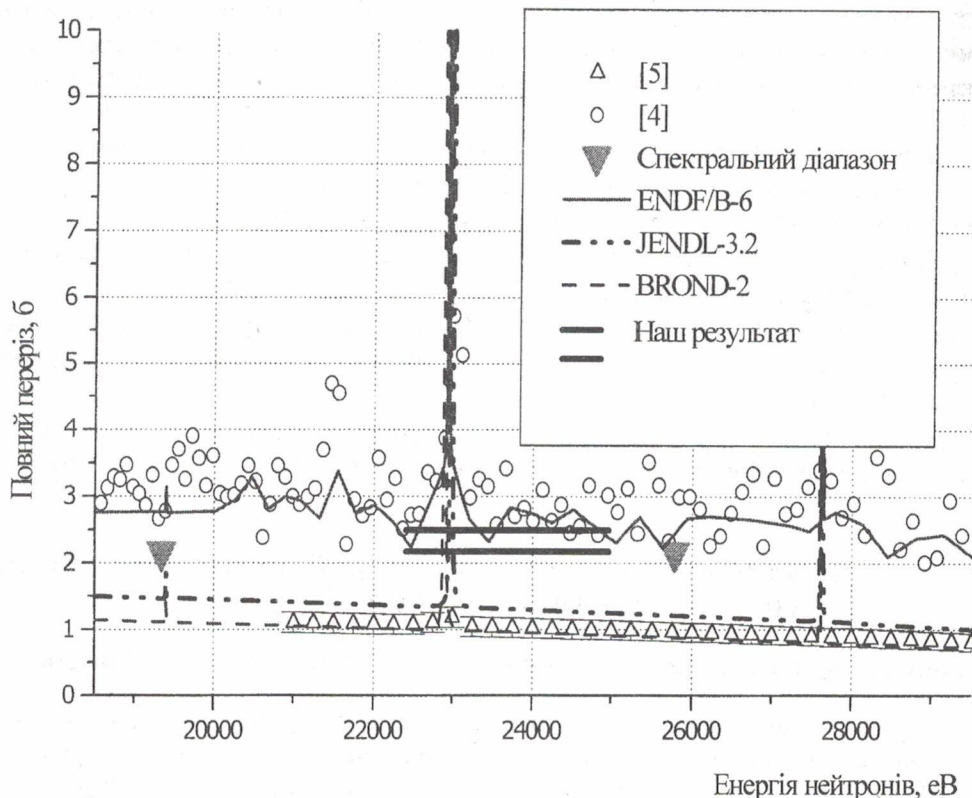


Рис. 4. Експериментальні дані для повного нейтронного перерізу ізоотопу ^{52}Cr .

На рис. 4 наведено експериментальні дані енергетичної залежності повного нейтронного перерізу для ізотопу ^{52}Cr [4, 5], взяті з міжнародної бібліотеки експериментальних ядерних даних CSISRS, енергетичну залежність перерізу, пораховану на основі бібліотек оцінених ядерних даних ENDF/B-VI, JENDL-3.2 та BROND-2, та смугу експериментального значення перерізу, отриманого в даній роботі. Енергетичний діапазон, якому відповідає експериментальне значення перерізу, отриманого нами на квазімоноенергетичному пучку нейтронів, ми вибирали з розрахунку 95 % “відгуку” спектральної лінії, що відповідає енергії фільтра $E_{\text{фільтра}} = 24,01$ кеВ з шириною $-1,60$ та $+0,96$ кеВ (на рис. 2 цей діапазон відмічено сірим заповненням, межі повної ширини спектра нейтронів після фільтра відмічено на рис. 4 сірими трикутниками). Як можна бачити, смуга наших значень перерізу лежить між значеннями з ENDF/B-VI та іншими бібліотеками, ближче до ENDF/B-VI. Очевидно, оцінка в останній ґрунтувалась на роботі [4], в інших – на [5].

Висновки

1. Уперше в діапазоні 22,41 – 24,97 кеВ виконано вимірювання ефективного повного нейтронного перерізу ^{52}Cr з точністю 0,6 %.
2. Отримане значення повного нейтронного перерізу в межах 2,17 – 2,45 б може бути запропоноване як опорний переріз для подальшого уточнення оцінених та рекомендованих ядерних даних.
3. Для подальшого удосконалення оцінених ядерних даних для ізотопу ^{52}Cr необхідні дослідження факторів резонансного самоекранування та перерізів для інших енергій, що й планується нами на майбутнє.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *The NEA High Priority Nuclear Data List // NEA Nuclear Science Committee, May 1998. – P. 78.*
2. *Пуртов О.А., Шкарупа А.М., Архипов В.Н. та ін. Методика измерения полных нейтронных сечений атомных ядер в диапазоне энергий 100 – 1000 кэВ с помощью фильтрованных пучков нейтронов атомного реактора. - Киев, 1989. – 19 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-89-26).*
3. *Gritzay O.O., Libman V.A., Murzin A.V et al. Preliminary measurements of the neutron total cross section of ^{208}Pb at 24 keV and the neutron polarizability // Proc. Int. Semin. Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-8, JINR-E3-2000-192). - Dubna, Russia, 2000. - P. 165.*
4. *Stieglitz R.G., Hockenbury R.W., Block R.C. Kev neutron capture and transmission measurements on ^{50}Cr , ^{52}Cr , ^{53}Cr , ^{54}Cr , ^{60}Ni and V // Nucl. Phys. - 1971. - Vol. A163. - P. 592.*
5. *Spencer R.R., Beer H., Froehner F.H. The Total Neutron Cross Sections of ^{50}Cr , ^{52}Cr , ^{62}Ni and ^{64}Ni in the Energy Region 10 - 300 keV. Karlsruhe, 1972. - 24 p. - (Reprint / Kernforschungszentrum. Institut fur Angewandte Kernphysic; KFK-1517).*
6. *Carlton R.F., Harvey J.A., Larson D.C. and Hill N.W. Neutron resonance spectroscopy for $n + ^{52}\text{Cr}$: Total and differential elastic scattering cross sections // Phys.Rev. C. - 2000.- Vol. 62. - P. 014608-1-11.*

ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПОЛНОГО НЕЙТРОННОГО СЕЧЕНИЯ ИЗОТОПА ^{52}Cr ПРИ ЭНЕРГИИ 24 кэВ

Е. А. Грицай, В. В. Колотый, А. И. Кальченко, П. Н. Ворона, Н. Л. Гнидак

Полное нейтронное сечение ядра ^{52}Cr получено для нейтронов с энергией 24 кеВ. В измерениях использована методика пропускания фильтрованных нейтронов из горизонтального канала реактора ВВР-М образцом металлического хрома (обогащение по ^{52}Cr 99,3 %, толщина образца $1,208 \cdot 10^{23}$ ядер/см²). Оптимизировано состав (железо, алюминий, сера, бор-10) и характеристики нейтронного фильтра для формирования нейтронного пучка с максимальной интенсивностью основной линии $24,3 \pm 0,8$ кэВ и минимальными примесными линиями в спектре нейтронов, для чего выполнено предварительные расчеты нейтронного спектра с использованием

современных оцененных нейтронных данных из библиотеки JENDL-3.2. Приводятся расчетная форма спектра фильтрованных нейтронов и экспериментальное значение интенсивности пучка нейтронов из 8-го горизонтального канала реактора, оцененное с помощью метода активации ^{197}Au . Полученное значение эффективного полного нейтронного сечения ^{52}Cr для квазимоноэнергетических нейтронов 24 кеВ – $\sigma_t^{\text{эф}} = 2,099 \pm 0,012$ б сравнивается с известными экспериментальными данными из библиотеки CSISRS, а также с сечениями, полученными из библиотек оцененных ядерных данных.

MEASUREMENTS OF ^{52}Cr EFFECTIVE TOTAL NEUTRON CROSS SECTION AT THE ENERGY 24 keV

O. O. Gritzay, V. V. Koloty, A. I. Kaltchenko, P. M. Vorona, M. L. Gnidak

The total neutron cross section for ^{52}Cr nucleus was measured at the neutron energy 24 keV. The measurements were taken using the transmission method of filtered neutrons from reactor horizontal channel and chromium metal sample (enrichment 99,3 % ^{52}Cr , thickness $1,208 \cdot 10^{23}$ $1/\text{cm}^2$). The optimized content and characteristics of filtered neutron beam with the maximum of basic energy line $24,3 \pm 0,8$ keV and minimum of impurity energy lines were received using our own calculation code and modern neutron data from evaluated neutron data library JENDL-3.2. The calculated shape of nuclear spectra is shown just as the experimental value of filtered neutron flux from the 8th horizontal channel calculated with the activation of ^{197}Au thin sample. The measured value of ^{52}Cr effective total neutron cross section for 24 keV quasimonoenergetic neutrons – $\sigma_t^{\text{эф}} = 2,099 \pm 0,012$ b was compared with known experimental values from CSISRS library and the values calculated with evaluated nuclear data libraries.

Надійшла до редакції 15.06.01,
після доопрацювання – 22.02.02.