

## АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИКИ ФІЛЬТРОВАНИХ НЕЙТРОННИХ ПУЧКІВ НА РЕАКТОРІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСУ ВУГЛЕЦЮ В ОБЛАСТІ ЕНЕРГІЙ БЛЯ 150 кеВ

О. О. Грицай, В. В. Колотий, С. П. Волковецький

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Проаналізовано можливість визначення параметрів резонансу на вуглєці з набору експериментальних усереднених перерізів, отриманих з використанням модифікованих фільтрів, представлено результати розрахункового моделювання таких фільтрів на базі сучасних бібліотек оцінених ядерних даних (БОЯД), проведено порівняння розрахункових характеристик фільтрів з експериментально отриманими, а також оцінку необхідної експериментальної точності вимірювання усереднених перерізів для визначення параметрів резонансу.

*Ключові слова:* фільтровані пучки нейтронів, реактор, вуглець, параметри резонансу.

### Обґрунтування об'єкта досліджень

Як добре відомо, вуглець широко використовується не лише як реакторний конструкційний матеріал, а й застосовується в якості матеріалу-стандарту при дослідженнях розсіювання, особливо при енергіях нижчих 2 МеВ, де повний нейтронний переріз та переріз пружного розсіювання нейтронів є практично ідентичними. Незважаючи на дуже велику кількість експериментальних робіт, присвячених дослідженню перерізів взаємодії нейтронів з ядрами вуглецю (з 1935 по 2007 р. лише для повного нейтронного перерізу налічується 145 експериментальних наборів даних), для енергетичної області від 1 до 500 кеВ експериментальних даних дуже мало, точність, з якою вони отримані, не задовольняє сучасним вимогам, узгодженість між різними наборами даних також викликає ряд запитань. Така ситуація з експериментальними даними в цій області енергій пов'язана з тим, що отримати високоінтенсивні пучки нейтронів з енергією нейтронів від одиниць до декількох сотень кілоелектронвольтів дуже важко. Застосування інтерференційних нейтронних фільтрів дає змогу виділити з "білого" реакторного спектра квазімоноенергетичні нейтронні лінії в цій області енергій з достатньо високою інтенсивністю. Так, завдяки широкому набору природних матеріалів (кремній, алюміній, ванадій, скандій, сірка, марганець, залізо, титан, магній, кобальт, церій, хром, мідь, бор, кадмій, LiF) та високозбагачених ізотопних матеріалів ( $^{52}\text{Cr}$  (99,3 %),  $^{54}\text{Fe}$  (99,92 %),  $^{56}\text{Fe}$  (99,5 %),  $^{57}\text{Fe}$  (99,1 %),  $^{58}\text{Ni}$  (99,3 %),  $^{60}\text{Ni}$  (92,8 % - 99,8 %),  $^{62}\text{Ni}$  (98,04 %),  $^{80}\text{Se}$  (99,2 %),  $^{10}\text{B}$  (85 %),  $^7\text{Li}$  (90 %)) на київському дослідницькому реакторі (КДР) можливо формувати фільтровані нейтронні пучки з інтенсивностями  $10^6$  -  $10^8$  нейтрон/(см<sup>2</sup> · с) [1]. Методика фільтрованих нейтронних пучків була використана нами для проведення високоточних вимірювань повного

нейтронного перерізу вуглецю [2, 3], однак результати, отримані нами з використанням фільтра 148 кеВ, викликали серйозне запитання, оскільки спостерігалась дуже сильна залежність ефективного нейтронного перерізу від товщини досліджуваного зразка. Екстраполяція експериментально отриманих ефективних нейтронних перерізів до нульової товщини призвела до значення усередненого повного нейтронного перерізу  $4,630 \pm 0,068$  б, що значно вище результатів, отриманих іншими авторами в близькій області енергій, а також значно вище перерізу, заданого в БОЯД (оскільки вуглець належить до матеріалів-стандартів, то всі БОЯД дають однакову оцінку повного нейтронного перерізу для цього матеріалу). Для наочності на рис. 1 наведено результати наших вимірювань, експериментальні результати інших авторів, узяті зі світової бази експериментальних даних EXFOR, та переріз повного нейтронного перерізу вуглецю з БОЯД. Неузгодженість нашого результату з результатами інших авторів ніяким чином не свідчить про помилковість нашого результату, у більшості випадків інші автори проводили вимірювання на одному, притому доволі товстому зразку, ми у своєму експерименті використовували набір з дев'яти зразків з товщинами від 0,008888 до 0,24788 атомів/б.

На рис. 1 в області 150 кеВ у повному нейтронному перерізі вуглецю дійсно спостерігається резонанс (праворуч цю область наведено у збільшеному масштабі), однак наш результат указує, що цей резонанс має бути значно сильнішим. На жаль, у БОЯД повний нейтронний переріз вуглецю представлено у вигляді таблиці "енергія - переріз", тобто у другому файлі відсутня інформація про параметри резонансів. Інформацію про параметри резонансів як для  $^{12}\text{C}$ , так і для  $^{13}\text{C}$  (вміст якого в природному вуглєці становить 1,11 %) представлено в [4]. Згідно з [4], резонанс у зазначеній вище області належить

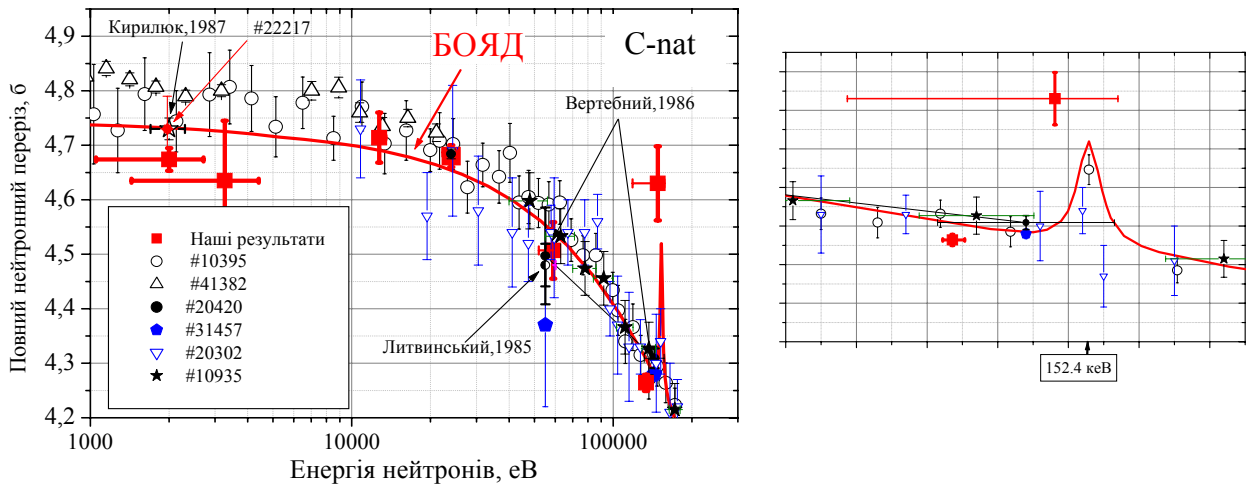


Рис. 1

ядру  $^{13}\text{C}$  і має такі параметри: енергія резонансу  $E_r = 152,4 \pm 1,4$  кеВ, нейтронна ширина  $\Gamma_n = 3,7 \pm \pm 0,7$  кеВ, гамма-ширина  $\Gamma_\gamma = 0,22 \pm 0,05$  еВ. Як уже зазначалося вище, наш результат указує на те, що в цій області енергій має бути значно сильніший резонанс. Фактично одночасно з публікацією наших результатів було опубліковано теоретичну роботу [5], в якій автори передбачають наявність сильного резонансу розсіяння для ядра  $^{12}\text{C}$  в області 0,1 МеВ. Метою даної роботи і є розвиток методики, що дало б змогу не лише дослідити, чи дійсно в цій області енергій є резонанс  $^{12}\text{C}$ , а й визначити його параметри.

**Методика фільтрованих пучків для визначення параметрів ізольованого резонансу**

Як зазначалось вище, застосування методики фільтрованих пучків на КДР дає можливість отримувати пучки квазімоноенергетичних нейтронів з інтенсивністю  $10^6 - 10^8$  нейтрон/(см<sup>2</sup> · с), що дає змогу за достатньо короткий вимірювальний час досягати високої статистичної точності. Використання для визначення повних нейтронних перерізів методу пропускання, який, як відомо, не потребує знання абсолютної величини нейтронного потоку, дає змогу досягати повних похибок у визначенні перерізів на рівні 1 % і краще. Однак експериментальне значення перерізу, отримане в таких вимірах, є фактично перерізом, усередненим в енергетичному діапазоні  $E_{\min} \div E_{\max}$  по спектру фільтрованого пучка, де  $E_{\min}$ ,  $E_{\max}$  є нижня та верхня енергетична межа квазімоноенергетичної нейтронної лінії після фільтра. Якщо в енергетичному діапазоні  $E_{\min} \div E_{\max}$  досліджуваний переріз має резонанс, ми "відчуємо" його завдяки явищу самоекранування, але визначити параметри резонансу не зможемо.

Однак якщо ми розіб'ємо діапазон  $E_{\min} \div E_{\max}$  на декілька різних більш вузьких областей з відомими спектральними характеристиками кожної з областей і проведемо серію високоточних вимірювань нейтронних перерізів  $\langle \sigma \rangle_i$ , тоді сукупність таких усереднених перерізів може дати змогу визначити параметри резонансу. Саме ця ідея закладена в основу методики для визначення параметрів ізольованого резонансу на фільтрованих нейтронних пучках. Практично реалізувати отримання набору фільтрованих пучків з вузькими нейтронними лініями можливо, якщо доповнити склад базового фільтра такими матеріалами, повний нейтронний переріз яких у діапазоні  $E_{\min} \div E_{\max}$  має один чи два сильних резонанси. Саме підбору таких матеріалів для базового фільтра 149 кеВ та експериментальній перевірці створених модифікованих фільтрів і присвячена перша частина даної роботи.

**Базовий фільтр 149 кеВ та його модифікація**

При створенні нових фільтрів чи модифікації існуючих у відділі нейтронної фізики зазвичай використовується така послідовність дій:

- 1) розрахункове моделювання фільтра на основі даних з БОЯД;
- 2) конструювання фільтра зі складом матеріалів, найбільш близьким до розрахунково визначеного;
- 3) експериментальна перевірка характеристик створеного фільтра та порівняння їх з розрахунковими (уточненими відповідно до реального складу фільтра) характеристиками.

Для розрахункового моделювання нейтронного спектра після фільтра було створено спеціальну комп'ютерну програму FILTER. Ця програма дає змогу включити в обчислення практично будь-яку комбінацію матеріалів та ізотопів, що

використовуються для отримання фільтрованого нейтронного спектра з необхідною енергією. Програма FILTER (п'ята версія) дає змогу отримати дві енергетично залежні функції  $F1(E)$  та  $F2(E)$ , що відображають фільтрований нейтронний спектр.

1. Пропускання нейтронів  $T(E)$ , помножене на реакторний спектр налітаючих нейтронів  $\Phi(E)$ :

$$F1(E) = T(E) \cdot \Phi(E) \equiv \exp[-\sum n_i \cdot \sigma_i(E)] \cdot \Phi(E), \quad (1)$$

де  $n_i$  – ядерна товщина  $i$ -ї компоненти фільтра;  $\sigma_i(E)$  – повний нейтронний переріз  $i$ -го нукліда.

2. Пропускання нейтронів  $T(E)$ , помножене на реакторний спектр налітаючих нейтронів  $\Phi(E)$  і на енергетично залежний переріз реакції  $\sigma_{react}(E)$ , що використовується для детектування нейтронів:

$$F2(E) = T(E) \cdot \Phi(E) \cdot \sigma_{react}(E). \quad (2)$$

Реакторний спектр налітаючих нейтронів  $\Phi(E)$  береться у вигляді функції, що складається з трьох частин: максвеллівського розподілу, залежності  $1/E$  та спектра поділу. Цей спектр нормується до одиниці  $\int \Phi(E)dE = 1$  в енергетичних межах від  $10^{-5}$  еВ до 20 МеВ. Повні нейтронні перерізи для нуклідів  $\sigma_i(E)$  розраховувались з

БОЯД в енергетичному діапазоні від  $10^{-5}$  еВ до 20 МеВ для температури 300 К, використовуючи програмний комплекс PREPRO2007 [6]. Спочатку було створено спеціалізовану бібліотеку перерізів нуклідів на основі JENDL-3.2 та ENDF/B-6.

При виконанні цієї роботи розрахунки базового фільтра 149 кеВ проводились з використанням також сучасних версій БОЯД ENDF/B-7, JEFF-3.1 та JENDL-3.3. Необхідність таких додаткових розрахунків обумовлена тим, що, як показав аналіз, у різних БОЯД спостерігаються суттєві відмінності в повних нейтронних перерізах титану та кремнію, які є основними компонентами базового фільтра (табл. 1). Вибір бібліотеки для проведення остаточних розрахунків модифікованих фільтрів базувався на порівнянні експериментально отриманих та розрахункових спектральних характеристик нейтронного пучка після базового фільтра. Як можна бачити з рис. 2, на якому представлено апаратурний спектр протонів віддачі, відновлений спектр нейтронів та розрахункові спектри, прораховані за даними бібліотек JEFF-3.1 та JENDL-3.3, найкраще узгодження між експериментом та розрахунком спостерігається для бібліотеки JEFF-3.1. Саме цю бібліотеку було обрано для подальших розрахунків. Ізотопний склад базового фільтра 149 кеВ та модифікованих фільтрів представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Фільтр	Вміст ізоотопу, г/см <sup>2</sup>							
	B (85 % <sup>10</sup> B)	Si	Ti	Al	<sup>58</sup> Ni	<sup>54</sup> Fe	V	<sup>52</sup> Cr
Базовий 149 кеВ	1,647	255,5	13,505	0,43	-	-	-	-
1М модифікований Ni	1,647	255,5	13,505	0,43	17,0	-	-	-
2М модифікований Fe	1,647	255,5	13,505	0,43	-	10,34	-	-
3М модифікований V	1,647	255,5	13,505	0,43	-	-	42,77	-
4М модифікований Cr	1,647	255,5	13,505	0,43	-	-	-	10,0

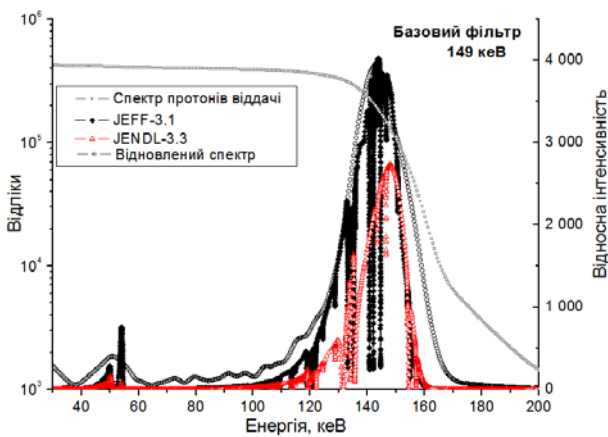


Рис. 2

На рис. 3 представлено результати розрахунків спектрів нейтронів після базового фільтра

149 кеВ (сірий колір) та після фільтрів, модифікованих <sup>58</sup>Ni, <sup>54</sup>Fe, V та <sup>52</sup>Cr (чорний колір), отримані з використанням бібліотеки JEFF-3.1. З рисунка видно, що додавання до складу базового фільтра різноманітних компонент дійсно призводить до розщеплення нейтронної лінії на дві чи три частини. Чисельні характеристики - енергетичні межі нейтронних ліній, відносна інтенсивність кожної з ліній до всього вихідного спектра, положення максимуму інтенсивності  $E(I_{max})$  та положення середньозваженої енергії лінії  $E_c$  - наведено в табл. 2.

На сьогодні реалізовано експериментальну перевірку лише двох із розрахованих модифікованих фільтрів – із застосуванням <sup>58</sup>Ni та <sup>54</sup>Fe. Перевірка характеристик проводилась на восьмому горизонтальному експериментальному ка-

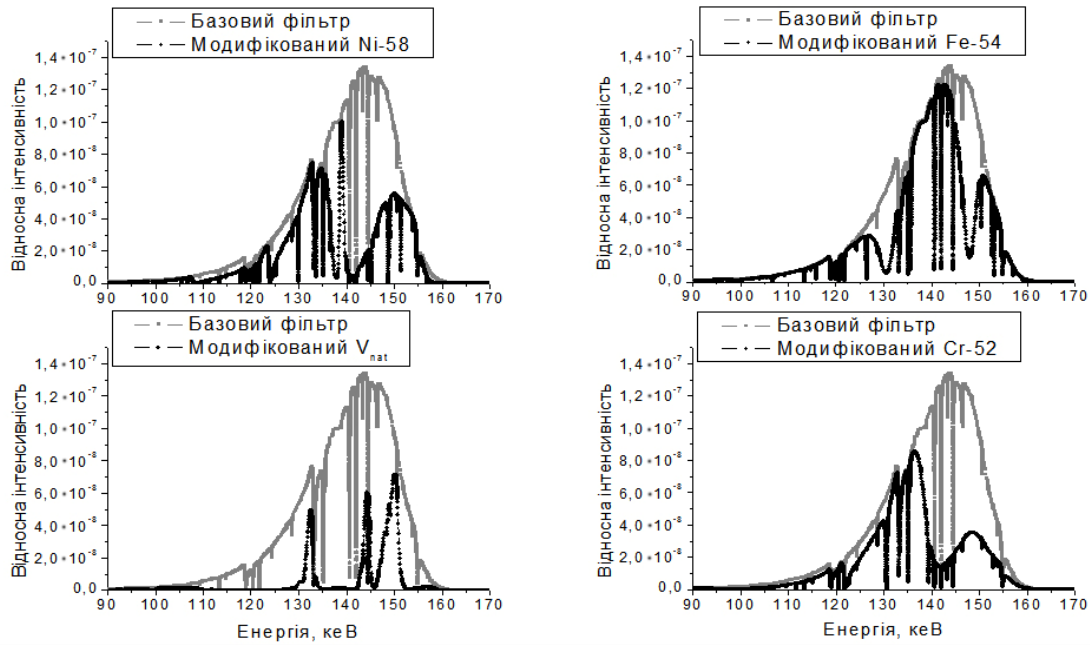


Рис. 3

Таблиця 2

Фільтр і лінії	Інтенсивність, %	$E_{min}$ , кеВ	$E_{max}$ , кеВ	$E(I_{max})$ , кеВ	$E_c$ , кеВ
Базовий фільтр 149 кеВ	96,8	94,9	163,7	143,9	142,5
1М модифікований $^{58}Ni$	96,54	108,8	162,9		
1-ша лінія – 122 кеВ	8,29	108,8	124,5	123,4	121,5
2-га лінія – 134 кеВ	57,28	124,5	141,9	139	133,9
3-тя лінія – 151 кеВ	30,99	141,9	162,9	150,2	150,6
2М модифікований $^{54}Fe$	97,98	99	163		
1-ша лінія – 121 кеВ	14,6	99	131,5	127	120,8
2-га лінія – 142 кеВ	62	131,5	148,1	142,9	142
3-тя лінія – 153 кеВ	21,39	148,1	163	150,9	152,8
3М модифікований V	92,74	125,9	153,5		
1-ша лінія – 133 кеВ	20,95	125,9	138,8	132,6	132,9
2-га лінія – 145 кеВ	36,28	138,8	145,9	144,4	144,5
3-тя лінія – 151 кеВ	35,52	145,9	153,5	150,2	150,6
4М модифікований $^{52}Cr$	95,11	100	163,7		
1-ша лінія – 134 кеВ	69,22	100	141,6	136,7	133,8
2-га лінія – 147 кеВ	25,91	141,6	161,8	148,7	146,6

налі (ГЕК) КДР одночасно для базового фільтра та двох його модифікацій. Це було реалізовано за рахунок розміщення в дисках шибера горизонтального каналу та у виносному коліматорі елементів базового складу фільтра, а елементи, що використовувалися для модифікації, були розміщені в пристрої автоматичного переміщення зразків. Реєстрація нейтронів проводилась водневим лічильником LND-281. Час набору спектрів тривав 6 год. Сумарний час експозиції одного спектра становив 2880 с. Детально опис установки, умови проведення подібних експериментів та процедури обробки апаратурних спектрів описано в публікаціях [1 - 3]. Отримані в експерименті спектри протонів віддачі (скореговані на фоні

умови) та відновлені з них спектри нейтронів представлено на рис. 4. Згладжування апаратурних спектрів проводилося за допомогою власного програмного пакета C\_SG-V9, використовуючи десятикратне лінійне згладжування по п'яти точках. Диференціювання проводилося також у цьому програмному пакеті. Після диференціювання подібну процедуру згладжування було застосовано також до відновленого нейтронного спектра – п'ятикратне лінійне згладжування по п'яти точках. Роздільна енергетична здатність апаратури не дає змоги чітко виділити внески від кожної з нейтронних ліній, щоб розділити ці внески, відновлені спектри апроксимувалися розподілами Гаусса, як показано на рис. 4.

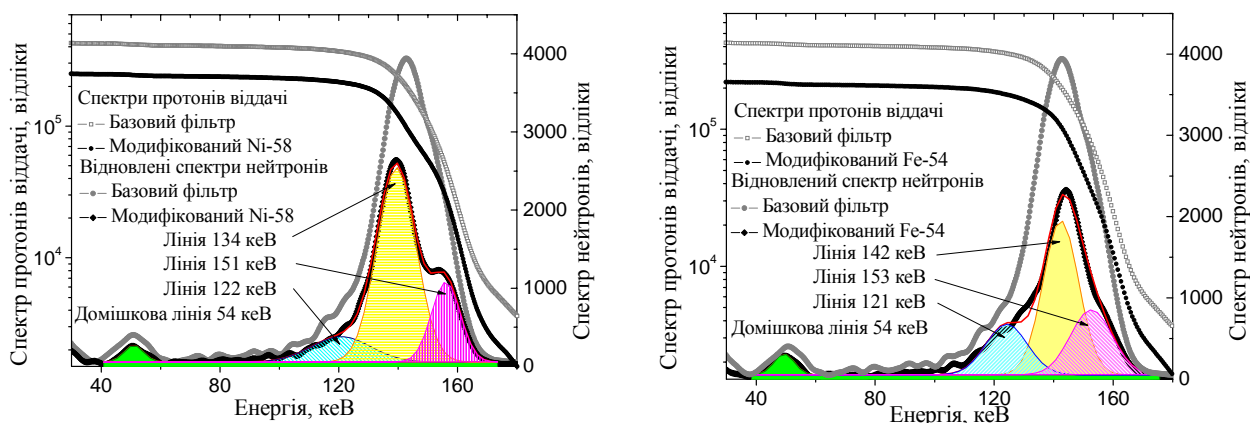


Рис. 4

Порівнюючи рис. 3 та 4, можна бачити, що розподіли Гауса досить непогано описують нейтронні лінії, що утворюються після проходження нейтронів через модифіковані фільтри. У табл. 3 наведено порівняння відносних інтенсивностей нейтронних ліній, отриманих з експериментальних даних та обчислених за програмою FILTER з урахуванням залежності ефективності детектора від енергії. Експериментальна похибка, указана в табл. 3, являє собою точність апроксимації нейтронної лінії розподілом Гауса.

Так, застосовуючи подібну методику при вимірюваннях перерізів вуглецю, експериментально можливо отримати набори усереднених перерізів  $\langle\sigma\rangle_i$ . Здобути інформацію про параметри

резонансу вуглецю в районі 150 кеВ з набору експериментальних перерізів  $\langle\sigma\rangle_i$  можливо лише в тому випадку, коли точність вимірювання кожного з них краща, ніж різниця між їхніми значеннями. Щоб оцінити необхідну точність, було проведено розрахунки усереднених нейтронних перерізів вуглецю  $\langle\sigma^{розр}\rangle_i$  для кожної з виділених нейтронних ліній, причому при проведенні цих розрахунків енергетичні межі та спектр зважування було взято з експерименту, а повний нейтронний переріз вуглецю  $\sigma(E)$  – з БОЯД. Результати розрахунків усереднених нейтронних перерізів вуглецю для кожної з нейтронних ліній модифікованих фільтрів представлено в табл. 4.

Таблиця 3

Фільтр					
Модифікований $^{58}\text{Ni}$			Модифікований $^{54}\text{Fe}$		
Нейтронна лінія	Відносна інтенсивність, %		Нейтронна лінія	Відносна інтенсивність, %	
	Експеримент	Розрахунок		Експеримент	Розрахунок
122 кеВ	$8,0 \pm 0,4$	8,7	121 кеВ	$17,4 \pm 0,6$	15,4
134 кеВ	$61,5 \pm 0,6$	57,4	142 кеВ	$53,1 \pm 10,8$	61,4
151 кеВ	$25,3 \pm 0,4$	29,7	153 кеВ	$22,4 \pm 8,1$	20,5

Таблиця 4

Фільтр					
Модифікований $^{58}\text{Ni}$			Модифікований $^{54}\text{Fe}$		
Нейтронна лінія	$E_{\min} \div E_{\max}$ , кеВ	$\langle\sigma^{розр}\rangle_i$ , б	Нейтронна лінія	$E_{\min} \div E_{\max}$ , кеВ	$\langle\sigma^{розр}\rangle_i$ , б
Базовий фільтр	$96 \div 174$	4,3310	Базовий фільтр	$96 \div 174$	4,3310
122 кеВ	$96 \div 142$	4,3438	121 кеВ	$104 \div 143$	4,3410
134 кеВ	$119 \div 160$	4,3206	142 кеВ	$123 \div 161$	4,3077
151 кеВ	$142 \div 170$	4,2865	153 кеВ	$133 \div 170$	4,2690

Як свідчать дані табл. 4, точність вимірювання усереднених перерізів повинна бути кращою 1 %, оптимальний варіант – 0,1 %. Оскільки вимірювання перерізів проводиться на тих самих зразках і в тих самих умовах, тобто всі складові похибки, за винятком статистичної, однакові, то фактично потрібно досягти 0,1 % статистичної точності. Як видно з рис. 4, найбільш критична

ситуація з точністю вимірювання перерізу, усередненого по енергетичному інтервалу 96 - 142 кеВ (лінія 122 кеВ для фільтра, модифікованого  $^{58}\text{Ni}$ ); за час вимірювання 48 хв було досягнуто статистичної точності 5,5 %, тобто щоб отримати точність 0,1 % потрібно проводити вимірювання протягом 40 год. Зменшити час вимірювань можливо, якщо проводити дослідження



на дев'ятому ГЕК, де інтенсивність нейтронів приблизно на 20 % вища. Але навіть 40 год вимірювань є прийнятним часом. Насправді ситуація з вимогою до величини похибки може бути значно простішою, оскільки, як було зазначено вище, наші вимірювання [2] дають підставу очікувати в області 150 кеВ значно сильнішого резонансу.

Експерименти по визначенню параметрів резонансу вуглецю з використанням модифікованих фільтрів заплановано провести в найближ-

чому майбутньому. Методика визначення параметрів ізольованих резонансів за допомогою техніки реакторних фільтрованих пучків є новою і потребує подальшого розвитку як з точки зору розробки нових модифікованих фільтрів, так і з точки зору розвитку методів обробки отриманих експериментальних результатів і процедури одержання параметрів резонансу з експериментальних даних. Ми плануємо продовжувати розвиток цієї перспективної методики. Дана стаття є першим кроком у цьому напрямку.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Gritzay O. O., Koloty V. V., Kaltchenko O. I.* Neutron filters at Kyiv Research reactor. - Kyiv, 2001. - (Prep. / Nat. Ac. Sci. Ukr. Inst. for Nucl. Res.; KINR-01-6).
2. *Gritzay O., Koloty V., Klimova N. et al.* Precision Neutron Total Cross Section Measurements for Natural Carbon at Reactor Neutron Filtered Beams // Proc. 12-th Int. Symp. on Reactor Dosimetry (Gatlinburg, TN, USA, May 2005). - Mayfield, USA, 2008. - P. 205.
3. *Gritzay O. O., Koloty V. V., Kalchenko O. I. et al.* The Total Neutron Cross Section for Natural Carbon in the Energy Range 2 to 148 keV // Proc. of the ND-2007 (Nice, France, April 22 - 27, 2007). - P. 543.
4. *Mughabghab S. F.* Atlas of Neutron Resonances, Resonance Parameters and Thermal Cross Sections / 5-th Ed. - NNDC BNL Upton, USA.
5. *Canton L., Amos K., Karataglidis S. et al.* Particle-unstable light nuclei with a Sturmian approach that preserves the Pauli principle // Nucl. Phys. - 2007. - Vol. A790. - P. 251 - 256.
6. *Cullen D. E.* The 1992 ENDF Pre-processing Codes, IAEA-NDS-39, Rev. 7, Feb., 1992.

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ  
ФИЛЬТРОВАННЫХ НЕЙТРОННЫХ ПУЧКОВ НА РЕАКТОРЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСА УГЛЕРОДА В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ ОКОЛО 150 кэВ**

**О. О. Грицай, В. В. Колотый, С. П. Волковецкий**

Проведен анализ возможности определения параметров резонанса на углероде из набора экспериментальных усредненных сечений, полученных с использованием модифицированных фильтров, представлены результаты расчетного моделирования таких фильтров на основе современных библиотек оцененных ядерных данных, проведены сравнения расчетных характеристик фильтров с экспериментально полученными, а также проведена оценка необходимой экспериментальной точности измерения усредненных сечений для определения параметров резонанса.

*Ключевые слова:* фильтрованные пучки нейтронов, реактор, углерод, параметры резонанса.

**ANALYSIS OF POSSIBLE USE OF NEUTRON FILTERED BEAM TECHNIQUE  
AT THE REACTOR FOR THE CARBON RESONANCE PARAMETERS DETERMINATION  
IN THE 150 keV ENERGY REGION**

**O. O. Gritzay, V. V. Koloty, S. P. Volkovetskyi**

Possibility of determination of carbon resonance parameter from the set of experimental averaged cross sections, obtained using modified filters, is analyzed, results of computed simulation of such filters on basis of up-to-date evaluated nuclear data file libraries are presented, comparison of calculated and experimental filter parameters is realized, as well as estimation of the necessary experimental accuracy for measurements of the averaged cross sections for resonance parameters determination is fulfilled.

*Keywords:* filtered neutron beams, reactor, carbon, resonance parameters.

Надійшла до редакції 13.11.09,  
після доопрацювання - 09.12.09.