

УДК 539.125.5

О.О. Грицай, С.П. Волковецький, В.А.Лібман

Інститут ядерних досліджень НАН України, 03680, Київ, пр. Науки, 47, Україна

e-mail: stepan_v@kinr.kiev.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗАГРУЗКИ ДЕТЕКТОРА ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ПЕРЕРІЗІВ ЗА МЕТОДОМ ПРОПУСКАННЯ НА ФІЛЬТРОВАНИХ РЕАКТОРНИХ ПУЧКАХ

Останні кілька років проводиться дослідження нейтронних перерізів вуглецю з метою отримання параметрів резонансу в області енергії 150 кеВ. Результати вимірів вимагають високої точності визначення, тому навіть невеликі систематичні похибки вносять вагомий внесок в правильність отриманих значень. Ефектами, які складають основну частину систематичних похибок, є перевантаження детектора. Саме ці ефекти і стали об'єктом дослідження даної роботи.

Ключові слова: нейтронний переріз, вуглець, резонанс, систематичні похибки, перевантаження детектора.

Об'єкт досліджень

Основною метою досліджень останніх років є визначення параметрів розділеного резонансу у вуглецю для області енергії ~ 150 кеВ. Дана робота є важливою тим, що цей елемент використовують як реакторний матеріал, як матеріал-стандарт при дослідженнях пружного розсіювання в області енергії нижче 2 МеВ, де повний нейтронний переріз практично ідентичний перерізу пружного розсіювання. Проте, в досліджуваній області (100 - 200 кеВ) експериментальних даних дуже мало, а точність визначення цих значень не відповідає сучасним вимогам.

Основою успішного визначення параметрів резонансу в досліджуваній області є висока точність експериментальних значень. Методика фільтрованих нейтронних пучків, яка використовується у відділі, дає змогу досягнути високої статистичної точності. Проте, систематичні похибки, якщо їх неможливо позбутися корекцією постановки експерименту, необхідно враховувати як поправку. Одним із ефектів, який є причиною великих систематичних похибок, – є перевантаження водневого детектора. Ці перевантаження спричиняють спотворення спектра, що може призвести до невірної визначення дослід-

жуваного перерізу. Цього ефекту можна позбутися, якщо зменшити інтенсивність пучка. Але це погіршить статистичну точність, оскільки час вимірів обмежений роботою дослідницького реактора ВВР-М [1].

Проблеми перевантажень спектрометра

Постановка експерименту була проведена таким чином, щоб отримати найбільш інтенсивні пучки нейтронів. Це пов'язано з тим, що для знаходження параметрів резонансу вуглецю потрібний набір усереднених перерізів з високою точністю в досліджуваній області. Спосіб визначення набору перерізів – модифікація складу базового фільтра, що призводить до зміни спектру нейтронів. Ця зміна полягає в тому, що основна лінія розділяється на декілька ліній, і для кожної з них визначається власне значення усередненого перерізу. Зрозуміло, що при додаванні до основного складу модифікуючих компонент, інтенсивність фільтрованого нейтронного пучка різко зменшується за рахунок «виїдання» частини спектра. Тому, в цьому випадку при базовому фільтрі пучок повинен мати максимально можливу інтенсивність. Далі буде показано, що висока інтенсивність пучка нейтронів

спричинила перевантаження спектрометра. При перевантаженнях можливо спостерігати два ефекти: зміну газового підсилення за рахунок високої інтенсивності пучка та втрати відліків у спектрі за рахунок мертвого часу спектрометричного тракту. Останній ефект враховується відповідними процедурами, які вводять поправку на мертвий час [2]. Проте, поправка має певні межі застосування і обчислюється за емпіричною формулою:

$$N_i^r = \frac{N_i}{1 - \tau_0 \sum_{j=1}^{1024} N_j - \Delta\tau \sum_{j=1}^{1024} (N_j \cdot j)}, \quad (1)$$

де τ_0 - час, на який електронний тракт втрачає чутливість до наступних сигналів; $\Delta\tau$ - невизначеність часу за рахунок каналної частоти АЦП тракту; N_i – кількість відліків в i -тому каналі. В нашому випадку

при високій інтенсивності пучка, ми могли вийти за межі коректності формули (1).

Ефект перевантаження, який спричиняє зміну газового підсилення, не призводить до втрати відліків, але деформує апаратний спектр, що призводить в свою чергу також до спотворення результатів. Щоб зрозуміти суть даного ефекту, необхідно розглянути механізм реєстрації нейтронів газорозрядними лічильниками.

Для реєстрації нейтронів використовують ядерні реакції з утворенням заряджених частинок у вихідному каналі. Для досліджуваного діапазону енергій (100-200 кеВ) використано реакцію пружного розсіювання нейтронів на протонах (ядрах водню). Було використано газовий пропорційний лічильник з наповненням ^1H – LND-281. Характеристики даного лічильника наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні характеристики водневого лічильника нейтронів

Тип лічильника	Наповнення	Тиск, атм	Робоча напруга, В	Діапазон енергій, кеВ
LND-281	$\text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{N}_2$	4	2800-2900	10 ÷ 900

При попаданні нейтрона в детектор, що заповнений воднем, відбувається пружне розсіювання нейтронів на ядрах водню з передачею енергії від 0 до E_n^{max} . В результаті, отримуємо розподіл числа імпульсів у залежності від амплітуди сигналу, зображений на рис. 1.

Амплітуда сигналу на виході детектора пропорційна кількості пар іонів, що утворилися в детекторі зарядженими частинками-продуктами. Проте, заряд, зібраний від електронів утворених пар, дуже малий (для енергії 145 кеВ сумарний заряд 2×10^{-15} Кл). Для збільшення цієї величини використовується газове підсилення детектора, тобто між катодом і анодом створюється сильне електричне поле, яке розганяє утворені первинні електрони, які, в свою чергу, повторно іонізують атоми робочого середовища детектора. Таким чином збільшується кількість електронів і, відповідно, – амплітуда сигналу. Підсилення в такому випадку може коливатись від 10 до 1000. Коефіцієнт

газового підсилення сильно залежить від величини електричного поля в детекторі (рис. 1 – зміна напруги становила ~ 20 В при початковій робочій 2900 В) [3].

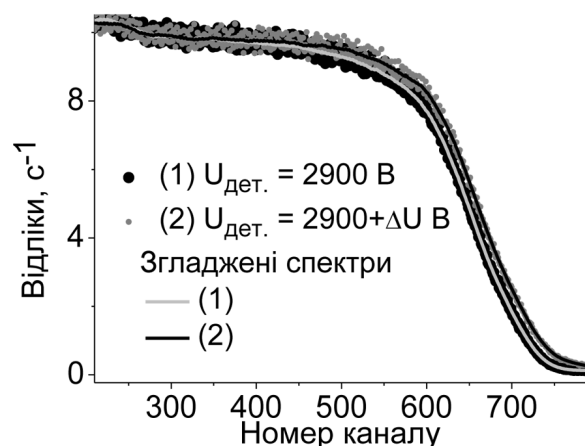


Рис. 1. Вплив зміни робочої напруги лічильника на апаратний спектр.

Суть ефекту зміни газового підсилення за рахунок великої інтенсивності нейтронного пучка полягає в тому,

що емісійні електрони власним електричним полем екранують електричне поле всередині лічильника, таким чином впливаючи на газове підсилення. Це відбувається, якщо частота реєстрації нейтронів настільки велика, що між двома послідовними реєстраціями анод не збирає весь заряд емітованих електронів, які були утворені при реєстрації попереднього нейтрона. Як показано вище, достатньо невеликої зміни робочої напруги (електричного поля), щоб помітно змінити підсилення. Коли підсилення зменшується, край полицки протонів віддачі зміщується вліво. Оскільки сумарна кількість відліків не зменшується, зі зменшенням підсилення збільшується кількість відліків в кожному каналі.

Вплив, який має цей ефект на виміри пропускання зразків, закладений в обробці результатів вимірів. Для визначення пропускання проводяться набори спектра прямого пучка і спектра нейтронів, що пройшли через досліджуваний зразок. Поканалне співвідношення кількості відліків другого спектра до першого дають поканалне пропускання зразка. Усереднене по вибраному діапазону каналів значення пропускання використовується для визначення ефективного усередненого перерізу за формулою:

$$\sigma_{>eff} = \frac{\ln(\langle T \rangle)}{n}, \quad (2)$$

де n – товщина досліджуваного зразка в ядрах на барн.

Зрозуміло, що інтенсивність пучка, який пройшов через зразок, буде меншою, ніж прямого пучка. Якщо ефект перевантажень був наявний у спектрах прямого пучка, у спектрах після проходження пучка через зразок він проявлятиметься слабше. Якщо зразок доволі товстий, ефект перевантажень може бути взагалі відсутнім. Розглянемо ситуацію, коли спектр прямого пучка стиснений, кількість відліків у каналах збільшена (наявний ефект перевантажень); спектр після зразка – не спотворений (перевантаження відсутні). Пропускання такого зразка буде меншим

від істинного, і відповідно ефективний переріз буде більшим.

Для визначення усередненого перерізу використовується набір зразків з різними товщинами. Зрозуміло, що для тонких зразків, пропускання яких 0.9-0.97, зміна даного ефекту буде незначною, тому переріз можна вважати близьким до істинного. Проте, якщо використовуються товсті зразки, пропускання яких ~ 0.6 , відмінності можуть бути значними.

Аналіз впливу ефектів перевантаження на ефективні усереднені перерізи

Як вже було сказано, висока інтенсивність пучка створює два ефекти перевантажень. Аналіз показав, що ці ефекти по різному впливають на величину визначеного ефективного усередненого перерізу. Кожен з них призводить до того, що ми отримуємо зростаючу залежність перерізів від товщини зразка. Насправді ж переріз не повинен залежати від товщини зразка, якщо не спостерігається ефект резонансного самоекранування; в разі ж його наявності – спостережуваний переріз повинен зменшуватися при збільшенні товщини зразка.

Така картина залежності перерізу від товщини зразка, причому зі збільшенням товщини величина перерізу зростала, спостерігалася нами експериментально при загрузках 6,1 та 6,9 кГц (див. на рис. 2).

Розглянемо ефект зміни газового підсилення за рахунок екранування електричного поля лічильника емітованими електронами. Як було сказано раніше, цей ефект призводить до того, що висота полицки прямого пучка в спектрі збільшується. Для товстих зразків вплив цього ефекту слабшає - спектр слабше деформується. Тому, для товстих зразків пропускання буде меншим за істинне значення, а переріз - більший. При тому чим товстіший зразок, тим більше зростає переріз.

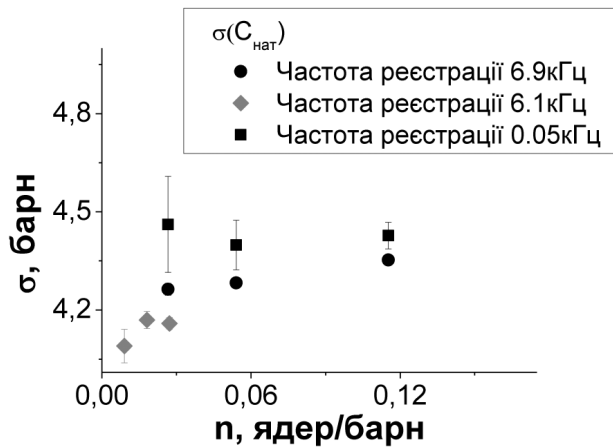


Рис. 2. Ефективні усереднені перерізи при різній загрузці лічильника.

На рис. 3 показана симуляція даного ефекту. Для цього вручну було збільшено висоту полицки для прямого пучка на 0,11; 0,21; 0,53 та 1,06 %. Як видно з рис. 3, це призвело до збільшення ефективних усереднених перерізів для товстих зразків, а для тонкого зміни незначні.

Даний ефект можна врахувати, якщо змінити процедуру обробки результатів вимірів, а саме: замість визначення пропускання поканално визначати пропускання, використовуючи інтенсивність нейтронних ліній. Як показано на рис. 1, форма спектра протонів віддачі на водневому лічильнику має вигляд полицки. Тому було розглянуто декілька методів апроксимації для спектрів такого типу. Один із них – опис полицки за допомогою функції арктангенса:

$$y(x) = A + Bx + \sum_{i=1}^M C_i \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{x - X_{ci}}{W_i} \right) \right), \quad (3)$$

де A, B, C, X_{ci}, W_i – шукані параметри апроксимації. Зміст цих параметрів наступний: A, B – параметри, які описують крайові ефекти реєстрації нейтронів та підложку від високоенергетичних ліній; C_i – амплітуда i -тої полицки; X_{ci} – положення полицки, величина, яка є характеристикою енергії i -тої нейтронної лінії; W_i – характеристика ширини лінії; M – кількість ліній у спектрі.

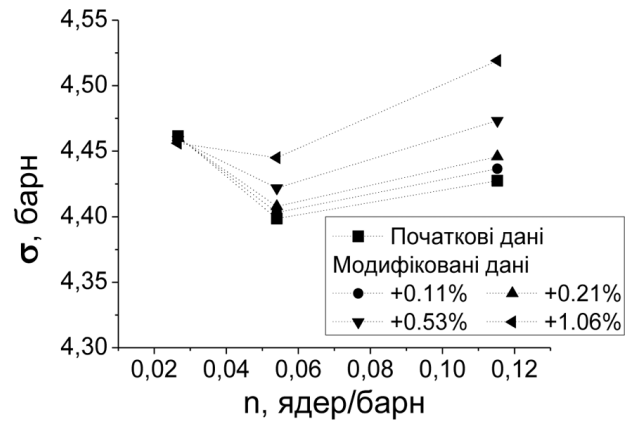


Рис. 3. Симуляція змін $\langle \sigma \rangle_{\text{eff}}$ відповідно до спотворення спектра ефектом зміни газового підсилення лічильника.

Результат апроксимації одного з експериментально отриманих апаратурних спектрів представлено на рис. 4. Як видно з рисунка, спектр нейтронів має дві високоінтенсивні лінії.

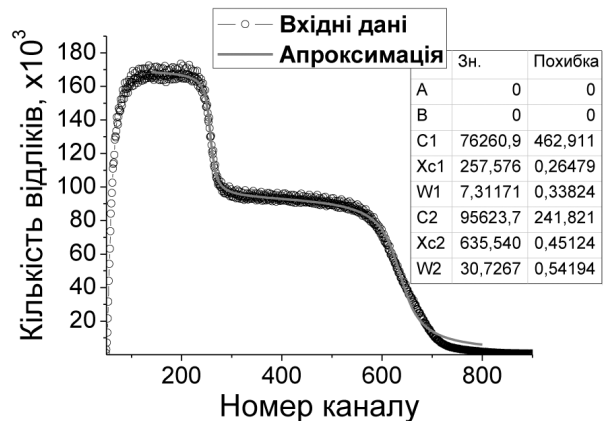


Рис. 4. Апроксимація полицок протонів віддачі функцією арктангенса.

Для того, щоб визначити інтенсивність потрібної лінії необхідно знайти інтеграл функції з (3), що описує полицку:

$$S_{\text{line}} = \int_0^N C_2 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{x - X_{c2}}{W_2} \right) \right). \quad (4)$$

Параметр N є правою межею полицки.

Після проведення даної процедури переріз визначається за формулою:

$$\sigma = -\frac{\ln\left(\frac{S_{line}^s}{S_{line}^{db}}\right)}{n}, \quad (5)$$

де S_{line}^s – площа під поличкою спектру зі зразком, S_{line}^{db} – площа під поличкою спектра прямого пучка.

Результати, отримані використовуючи площі під лініями, наведено в табл. 2. Як бачимо, відмінності ефективних перерізів не значні в порівнянні зі значеннями похибок отриманих значень. Це свідчить про відсутність впливу цього ефекту в даних вимірах.

Таблиця 2

Ефективні усереднені перерізи за методикою поканального пропускання та з визначенням інтенсивностей ліній у спектрах

Концентрація, ядер/барн	Поканальне пропускання		Площа під поличкою	
	σ , барн	$\Delta\sigma$, барн	σ , барн	$\Delta\sigma$, барн
0,0266	4,263	0,018	4,285	0,027
0,0541	4,283	0,016	4,290	0,02
0,1152	4,353	0,015	4,358	0,016

На відсутність впливу даного ефекту на результат вказують також значення параметра X_{c2} з формули (3), який при наявності зміни газового підсилення також повинен змінюватись – збільшуватись зі збільшенням товщини зразка. Для всіх зразків і прямого пучка він однаковий (для прямого пучка: 635.5 ± 0.5 ; для зразків: 635.3 ± 0.5 , 635.1 ± 0.5 , 634.7 ± 0.5).

Другий етап роботи – проведення аналізу впливу перевантажень на втрати відліків за рахунок мертвого часу спектрометра. Як згадувалось вище, для даних спектрів застосовувалась поправка на мертвий час спектрометричного тракту (1). Аналізувалось чи може спостережуватись залежність перерізу від товщини зразка бути спричинена неповною компенсацією втрат відліків процедурою (1). Спочатку було проведено симуляцію ефективних усереднених перерізів, вносячи різні значення втрат відліків в каналах. Для цього від вхідних даних, отриманих при загрузці лічильника 0.05кГц, а саме від висоти полички прямого пучка, віднімалось деяке значення-імітація втрати відліків (відношення цього значення до кількості відліків вхідного спектра бралось рівним 0,43; 0,53; 1,06; 1,38 та 1,59 %). Отримані при такій симуляції значення перерізів представлено на рис. 6. Як бачи-

мо, для тонкого зразка значення перерізу більш чутливі до втрат, ніж для товстих. При певному значенні втрат залежність перерізу від товщини зразка стає зростаючою. Для порівняння на рис. 5 зображено вплив поправки на мертвий час спектрометричного тракту при загрузці 6.9 кГц, проведеного за формулою (1). Корекція в цьому випадку на порядок більша, ніж при симуляції.

Значення – 9.53 % вказує на відмінності відліків між вхідними даними – апаратурним спектром та відліками вихідного спектру – після внесення поправки на мертвий час спектрометра згідно (1).

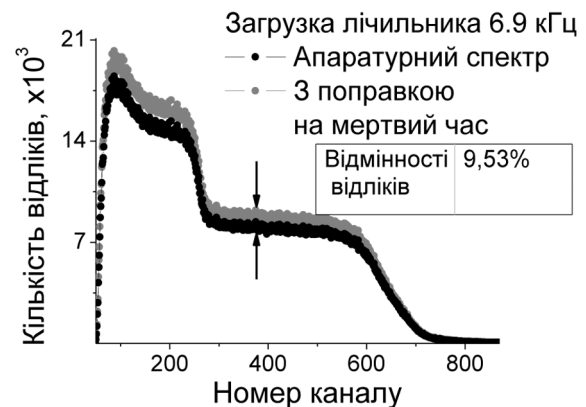


Рис. 5. Вплив на апаратурний спектр введення поправки на мертвий час спектрометра.

На рис. 6 сірими точками представлено також перерізи, отримані при загрузках 6,9 кГц з використанням формули (1). Як видно з рисунка, експериментальні значення з високою інтенсивністю пучка близькі до відхилень, проведених при симуляції – 0,53 %.

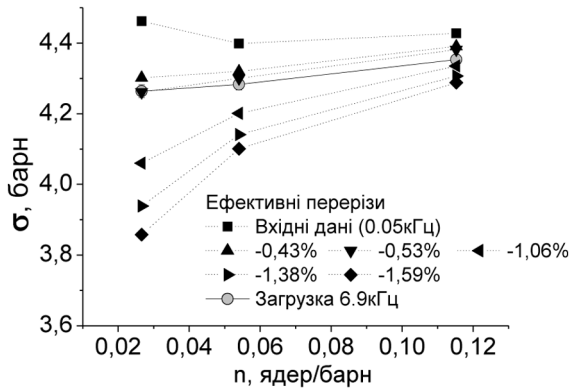


Рис. 6. Симуляція ефекту втрат відліків за рахунок мертвого часу спектрометра.

Проте, в даному випадку, для спрощення розрахунків, проводилась зміна тільки кількості відліків прямого пучка. Насправді ж, змінюються одночасно всі спектри, при тому не прямопропорційно інтенсивності. При визначенні абсолютних величин перерізів виникають труднощі, оскільки невідомі абсолютні величини інтенсивності пучка нейтронів в обох серіях вимірів чи хоча б їх співвідношення. Оперуючи наявними даними можна визначити тільки мінімальне значення

відхилень, яке можливе в цих вимірах. Це проводилось корекцією даних для серії з загрузкою 6,9 кГц, вважаючи, що істинні значення відповідають результатам вимірів із загрузкою 0,05 кГц. В першому наближенні вважається, що для найтовстішого зразка втрат відліків немає. В такому випадку, знаючи істинне пропускання (взято з вимірів при загрузці 0,05 кГц) та інтенсивність пучка при загрузці 6,9 кГц, можна визначити наскільки потрібно збільшити інтенсивність прямого пучка, щоб перерізи в обох серіях вимірів були однаковими. Розрахунки показали, що відмінності інтенсивності прямого пучка складають 0,9 %. Зрозуміло, що при втратах відліків у спектрі найтовстішого зразка, ця відмінність буде більшою. Якщо розглянути похибки процедури (1), то в межах 100-600 каналів ця величина приблизно дорівнює 1-2 %, тобто є більшою за мінімальні втрати відліків у каналах за рахунок неповної компенсації ефекту. Тому, врахування даного ефекту можливе за двома напрямками. Перший напрямок – зменшення інтенсивності пучка нейтронів до значення, при якому (1) повністю компенсує втрати відліків у каналах. Другий напрямок передбачає проведення детальних досліджень ефекту втрат відліків за рахунок мертвого часу спектрометра, з метою внесення поправок у процедуру (1) для розширення діапазону застосування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Звіт про науково-дослідну роботу Отримання ядерно-фізичних характеристик нуклідів, необхідних для розвитку фундаментальних та прикладних задач. (керівник – Грицай О.О.). – 2002. Київ, ДР № 0100U005114. – 154 с.
2. Грицай О.О., Колотий В.В., Волковецький С.П. Аналіз можливості застосування методики фільтрованих нейтронних пучків на реакторі для визначення параметрів резонансу вуглецю в області 150 кеВ // Ядерна фізика та енергетика. – 2009. – Т. 10. – № 4. – С. 418–423.
3. Калашникова В.И., Козодаев М.С. Детекторы элементарных частиц. – М: Наука, 1966. – 44 – 56 с.

Стаття надійшла до редакції 28.05.2011

O.O. Gritzay, S.P. Volkovetskyi, V.A. Libman

Institute for Nuclear Research NAS Ukraine

03680, Kyiv, Prospekt Nauki, 47, Ukraine

RESEARCH OF INFLUENCE OF DETECTOR LOAD AT CROSS-SECTION DETERMINATION AFTER TRANSMISSION METHOD BY THE FILTERED REACTOR BEAMS

During a last few years neutron cross-section of carbon were studied in energy region near 150 keV in order to get resonance parameters. The results of measurings require high accuracy of determination, therefore even small systematic errors contribute significantly to rightness of the obtained values. Effect that make a main part in systematic errors is overload of detector. This effect became the object of research in this work.

Key words: neutron cross-section, carbon, resonance, systematic errors, overload of detector.

О.О. Грицай, С.П. Волковецкий, В. А. Либман

Институт ядерных исследований НАН Украины

03680, Киев, пр. Науки, 47, Украина

e-mail: stepan_v@kinr.kiev.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАГРУЗКИ ДЕТЕКТОРА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СЕЧЕНИЯ ПО МЕТОДУ ПРОПУСКАНИЯ НА ФИЛЬТРОВАННЫХ РЕАКТОРНЫХ ПУЧКАХ

Последние несколько лет проводится исследование нейтронных сечений углерода с целью получения параметров резонанса в области энергии 150 кэВ. Результаты измерений требуют высокой точности определения, поэтому даже небольшие систематические погрешности вносят весомый вклад в правильность полученных значений. Эффектами, которые составляют основную часть систематических погрешностей, являются перегрузки детектора. Именно эти эффекты и стали объектом исследования данной работы.

Ключевые слова: нейтронное сечение, углерод, резонанс, систематические погрешности, перегрузки детектора.