

**МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ПО РОЗСІЯННЮ ШВИДКИХ НЕЙТРОНІВ**

**М. Т. Скляр, І. О. Корж, М. М. Правдивий**

Створено комп'ютерну програму розрахунків часопрольотних спектрів розсіяних нейтронів методом Монте-Карло для випадку багатоізотного (до 5 ізотопів) розсіювача циліндричної форми з центральним отвором. Роботу програми проілюстровано на прикладі розсіяння нейтронів зразками поліетилену й заліза. На основі цих розрахунків отримано поправки, які звичайно вносяться до експериментально отриманих перерізів: поправки на ослаблення в розсіювачі падаючих і розсіяних нейтронів, на кутову роздільну здатність експерименту, а також на вклад багатократно розсіяних нейтронів.

**1. Вступ**

При вимірюванні перерізів пружного й непружного розсіяння нейтронів методом часу прольоту виникають значні труднощі, якщо ставиться задача отримати прецизійні дані, наприклад: одержання поправок на багатократне розсіяння нейтронів, кутове розділення спектрометра й ослаблення нейтронів у розсіювачі з достатньо хорошою точністю. Але є й інша проблема, пов'язана з труднощами ідентифікації піків спектра з відповідними процесами й правильним визначенням числа подій даного типу. Це пов'язано зі складним характером спектрів, коли збуджуються 3 - 4 рівні в ядрах кожного ізотопу, а також з тим, що багатократні процеси навіть при  $A \approx 50$  змінюють апаратну лінію спектрометра, яка відповідає якомусь процесу. Ці проблеми можна розв'язати в тій чи іншій мірі, моделюючи ці експерименти за допомогою методу Монте-Карло.

**2. Методика одержання часопрольотних спектрів розсіяних нейтронів**

На рис. 1 наведено геометрію експерименту. У точці  $O$  розташовано нейтронну мішень, точка  $O_1$  - центр циліндричного розсіювача, у точці  $D$  знаходиться детектор під кутом  $\Theta_0$ .  $\Theta$  - кут розсіяння нейтрона, що вилетів із мішені під кутами  $\theta, \varphi$ .

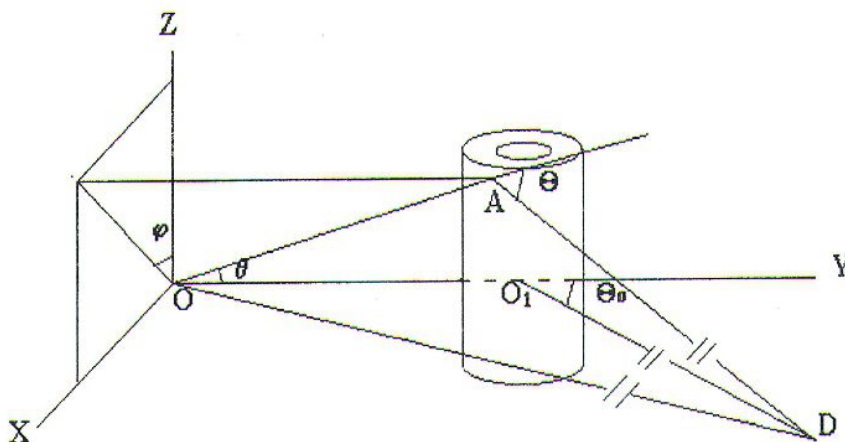


Рис. 1. Геометрія експерименту.

Для одержання часопрольотних спектрів використовували метод, аналогічний описаному в роботі [1]. Нейтрони простежувались за допомогою методу Монте-Карло від утворення їх в результаті реакції T(p,n), диференціальні перерізи якої [2] визначають кути вильоту нейтронів із мішені, і до місця їх реєстрації в детекторі. На кожному етапі розсіяння нейтрону приписувалась статистична вага, яка розподілялась між можливими каналами взаємодії нейтрона й кутами, під якими реєструються нейтрони. Статистичною вагою нейтрона, який n-кратно розсіявся, є просто ймовірність такої події.

Залежно від часу прольоту нейтрона й від кратності розсіяння ми накопичували під 10 кутами величини

$$S_{ijc} = W \cdot p(i,j) \cdot P_{cj} \cdot \exp\left(-\sum_{i=1}^{n_i} n_i \sigma'_{ii} r_c\right), \quad (1)$$

де  $W$  - статистична вага нейтрона;  $p(i,j)$  - імовірність каналу  $j$  для ізотопу  $i$ ;  $P_{cj}$  - імовірність того, що нейтрон у каналі  $j$  полетить у напрямку детектора під кутом  $\Theta_{oc}$ ;  $\exp\left(-\sum_{i=1}^{n_i} n_i \sigma'_{ii} r_c\right)$  - ослаблення розсіяного нейтрона ( $n_i, \sigma'_{ii}$  - число ядер ізотопу  $i$  в  $1 \text{ см}^3$  розсіювача та повний переріз для цього ізотопу відповідно;  $r_c$  - шлях розсіяного нейтрона в розсіювачі).

У результаті одержали часопрольотні спектри розсіяних нейтронів для всіх положень детектора ( $n_{c, \max} = 10$ ) і для всіх кратностей розсіяння ( $k_{\max} = 4$ )  $Sp(nk, k, nc)$ , а також для кожного положення детектора сумарний спектр  $Sp1(nk, nc) = \sum_{k=1}^4 Sp(nk, k, nc)$ .

### 3. Результати розрахунків часопрольотних спектрів нейтронів, розсіяних зразками поліетилену й заліза

Оскільки перерізи розсіяння нейтронів на ядрах водню являються стандартом і часто використовується, у тому числі й нами, для нормування одержаних результатів, було застосовано описаний вище метод для моделювання часопрольотних спектрів нейтронів, розсіяних зразком поліетилену.

На рис. 2 наведено спектри розсіяних нейтронів з енергією біля 2 МэВ для двох положень детектора. Розміри зразка поліетилену: зовнішній діаметр – 0,77 см, внутрішній діаметр – 0,21 см, висота – 3,0 см. Відстань від мішені до центра розсіювача була 10,5 см, а від розсіювача до детектора - 200 см. Дані про диференціальні перерізи пружного розсіяння нейтронів на ядрах вуглецю брались із роботи [3], розсіяння на протонах вважали ізотропним у системі центра мас, що відповідає косинусоїдальному розподілу розсіяних нейтронів у лабораторній системі координат. Повні перерізи розсіяння нейтронів на протонах брались із роботи [4].

На рис. 2 (для кута  $60^\circ$ ) у нижній його частині є зачорнена область - це вклад нейтронів, які розсіялися в межах зразка більше одного разу (від 2 до 4). Вклад багатократно розсіяних нейтронів у “водневий” пік для наведених прикладів незначний і складає 1,38 %.

При простежуванні 5000 нейтронів середньоквадратичні похибки значень у каналах окремого спектра складають 1 – 2 % в області “вуглецевого” піка і 3 – 7 % в області “водневого” піка, а середньоквадратична похибка площі під “водневим” піком складає близько 0,5 %. Час, затрачений на розрахунки, становить 25 с для комп'ютера Pentium-120.

У природній суміші ізотопів заліза ізотоп  $^{56}\text{Fe}$  складає 91,8 %, а  $^{54}\text{Fe}$  - 5,8 %, тому для демонстрації можливостей програми вважали, що зразок заліза складається тільки із цих двох ізотопів. Розміри зразка приймалися такими: діаметр - 2,5 см, діаметр центрального

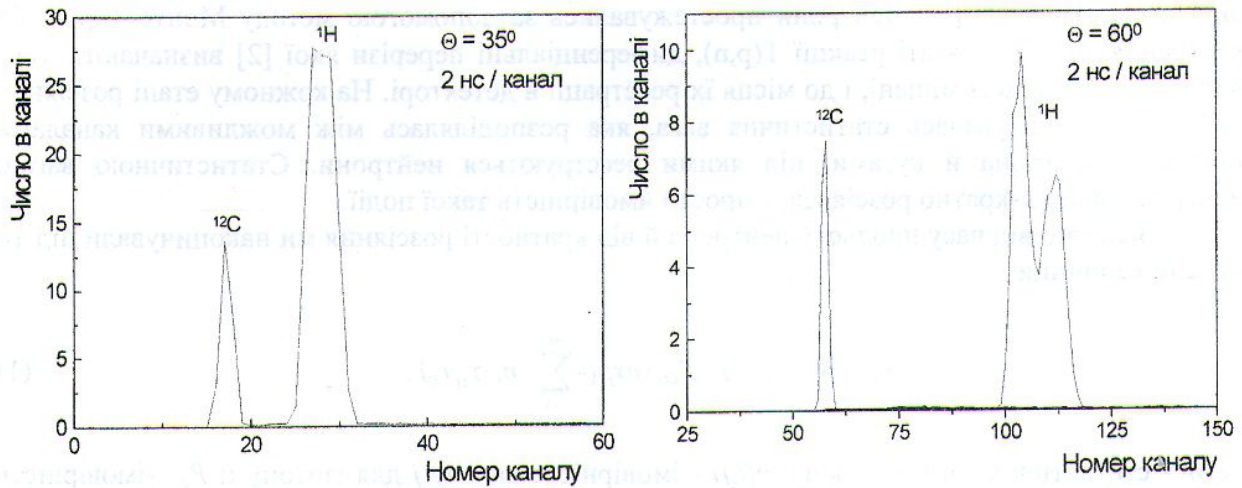


Рис. 2. Часопрольотні спектри нейтронів з енергією  $E_n = 1,962 \pm 0,029$  MeV, розсіяних зразком поліетилену.

отвору - 0,95 см, висота - 5 см. Енергія падаючих нейтронів  $\approx 3,0$  MeV. Так же, як і для поліетиленового розсіювача, відстань від мішені до зразка була 10,5 см, а від розсіювача до детектора - 200 см. Повні перерізи та перерізи пружного й непружного розсіяння нейтронів на ізотопах  $^{54}\text{Fe}$  і  $^{56}\text{Fe}$  брались із бібліотеки оцінених даних ENDF/B-V1 [5], а диференціальні перерізи з роботи [3]. Результати розрахунків часопрольотного спектра розсіяних нейтронів наведено на рис. 3.

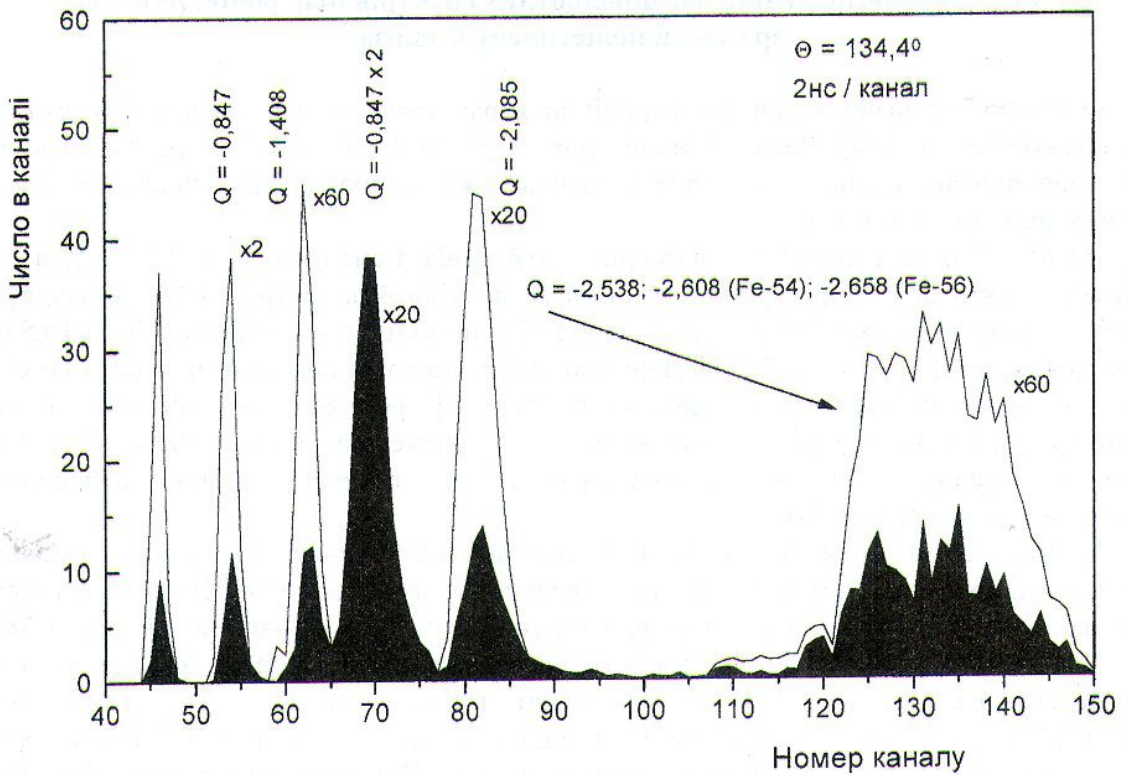


Рис. 3. Часопрольотний спектр нейтронів з енергією  $E_n = 3,05 \pm 0,036$  MeV, розсіяних зразком заліза.

При енергії нейтронів  $\approx 3,0$  MeV збуджується ряд рівнів ізотопів  $^{56}\text{Fe}$  ( $2^+$ ,  $Q = -0,847$  MeV;  $4^+$ ,  $Q = -2,085$  MeV;  $2^+$ ,  $Q = -2,658$  MeV;  $0^+$ ,  $Q = -2,942$  MeV) і  $^{54}\text{Fe}$  ( $2^+$ ,  $Q = -1,408$  MeV;  $4^+$ ,  $Q = -2,538$  MeV;  $0^+$ ,  $Q = -2,561$  MeV;  $2^+$ ,  $Q = -2,950$  MeV). На рис. 3 не приведено четверті рівні обох ізотопів, оскільки в програмі всі нейтрони з енергіями, меншими за 0,25 MeV, не беруть участі у формуванні часопрольотного спектра; це пов'язано з тим, що поріг реєстрації нашого детектора того ж порядку. У спектрі, крім піків, що відповідають вказаним рівням, добре проявляється пік, який відповідає нейтронам, котрі два рази непружно розсіялись на рівні  $2^+$  (0,847 MeV) ізотопу  $^{56}\text{Fe}$ . Так же, як і для поліетилену, зачорнені області на рис. 3 відповідають багатократно розсіяним нейтронам.

Час одного розрахунку часопрольотних спектрів для 10 положень детектора становить 1,34 хв для комп'ютера Pentium-120 ( простежувались 5000 нейтронів).

#### 4. Поправки

##### 4.1. Поправки до інтегральних перерізів

При визначенні перерізів взаємодії нейтронів з ядрами відносно одержані експериментальні дані (числа подій даного типу) до потоку нейтронів у точці, що відповідає центру розсіювача, а вони визначаються середнім потоком по розсіювачу. У програмі визначаємо ці два потоки, і їх відношення буде поправкою до одержаних перерізів. Ці поправки становлять  $1,144 \pm 0,004$  і  $1,265 \pm 0,003$  для поліетилену й заліза відповідно. При визначенні інтегральних перерізів пружного й непружного розсіяння нейтронів ядрами заліза треба враховувати той факт, що в результаті подальших непружних зіткнень розсіяного в даний канал нейтрона він вибуває із цього каналу, а пружно розсіяні нейтрони в результаті подальших непружних взаємодій дають вклад у канали непружного розсіяння. Відповідна класифікація розсіяних нейтронів дає можливість ввести поправки на ці процеси. Для інтегральних перерізів пружного й непружного розсіяння на перших двох рівнях  $^{56}\text{Fe}$  поправки відповідно становлять  $1,0914 \pm 0,0028$  (0,27 %);  $0,921 \pm 0,010$  (1,09 %) і  $0,840 \pm 0,018$  (2,1 %).

##### 4.2. Поправки до диференціальних перерізів

Експериментально одержані числа розсіяних нейтронів під різними кутами тільки в першому наближенні відображають хід диференціального перерізу пружного розсіяння нейтронів. Це пов'язано з вкладом приблизно ізотропно розподілених багатократно розсіяних нейтронів й усередненням диференціального перерізу пружного розсіяння в межах деякого інтервалу кутів, що характеризує кутову роздільну здатність експерименту.

У програмі маємо можливість одержати усереднені по 5000 нейтронах значення вхідних диференціальних перерізів пружного розсіяння нейтронів  $\bar{\sigma}(\Theta_{oc}) = \sum_i w_i \sigma(\Theta_{ci}) / \sum_i w_i$ , а також значення  $\sigma(\Theta_{oc})$  для всіх положень детектора; тоді відношення  $\sigma(\Theta_{oc}) / \bar{\sigma}(\Theta_{oc})$  і будуть шуканими поправками. У табл. 1 наведено поправки на кутову роздільну здатність для водню й заліза (енергії падаючих нейтронів 2 і 3 MeV відповідно).

Таблиця 1

$\text{Cos } \Theta_{oc}$	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1	-0,1	-0,3	-0,5	-0,7	-0,9
H	0,9989	0,9995	1,000	0,9594						
Fe	1,020	1,014	0,972	0,735	0,898	0,980	0,992	0,980	0,951	0,955

Середньоквадратичні похибки наведених значень  $< 0,9\%$ , хоча переважна більшість значень має похибки  $0,2 - 0,4\%$ .

Якщо тепер числа нейтронів, однократно розсіяних під кутами  $\Theta_{oc}$  (обчислюються в програмі), помножити на відповідні поправки на кутову роздільну здатність експерименту й співставити результати з експериментальними числами розсіяних нейтронів всіх кратностей, то їх відношення буде сумарною поправкою (на кутову роздільну здатність і багатократне розсіяння) до експериментального диференціального перерізу пружного розсіяння нейтронів. У табл. 2 наведено значення цієї поправки для заліза.

Таблиця 2

$\text{Cos}\Theta_{oc}$	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1	-0,1	-0,3	-0,5	-0,7	-0,9
Fe	$1,219 \pm 0,002$	$1,137 \pm 0,005$	$0,894 \pm 0,010$	$0,378 \pm 0,008$	$0,692 \pm 0,005$	$0,961 \pm 0,003$	$1,009 \pm 0,002$	$0,966 \pm 0,002$	$0,885 \pm 0,002$	$0,901 \pm 0,003$

Для непружного розсіяння, що вважається ізотропним, ці поправки не вводяться. Але в разі помітного ослаблення падаючих нейтронів у розсіювачі експериментальний переріз має помітну анізотропію, що пояснюється тим, що число актів розсіяння нейтронів більше в тій частині розсіювача, яка ближча до мішені, і це приводить до більшого ослаблення розсіяних вперед нейтронів. Тому вводиться невелика поправка до експериментального перерізу, яка у випадку непружного розсіяння на першому рівні  $^{56}\text{Fe}$  ( $2^+$ ,  $0,847\text{ MeV}$ ) досягає близько  $\pm 3\%$  для  $\text{Cos}(\Theta_{oc}) = \pm 0,9$  відповідно.

Слід зазначити, якщо за вхідні будемо використовувати свої експериментальні дані [6], що звичайно й буває, то одержання поправок стає ітераційним процесом.

## 5. Висновок

Враховуючи масштаби наведених вище поправок до перерізів розсіяння нейтронів, можна зробити висновок, що для одержання заслуговуючих на довіру експериментальних перерізів розсіяння нейтронів конче необхідно мати програму моделювання експерименту, оскільки інші методи [7, 8] не можуть дати кращого результату, бо базуються на ряді спрощень і припущень.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Parker J.B., Towle J.H., Sams D. et al. // Nucl. Instr. and Methods. - 1964. - Vol. 30, No. 1. - P. 7.
2. Liskin H., Paulsen A. // Nuclear Data Tables. - 1973. - Vol. 11, No. 7. - P. 569.
3. Базазянц Н.О., Забродская А.С., Ларина А.Ф., Николаев М.Н. // Ядерные константы. - 1972. - Вып. 8. - Ч. 1. - С. 61.
4. Horsley A. // Nucl. Data. - 1966. - Vol. A2, No. 3. - P. 243.
5. Hetrick D.M., Fu C.Y., Larson N.M. // ORNL / TM-7341, Evaluated Nuclear Data Files, ENDF/B-VI. - 1989.
6. Корж И.А., Мищенко В.А., Правдивый Н.М. // Атомная энергия. - 1987. - Т. 62. - Вып. 6. - С. 417.
7. Cox S.A. // Nucl. Instr. and Methods. - 1967. Vol. 56. - P. 245.
8. Engelbrecht C.A. // Nucl. Instr. and Methods. - 1971. - Vol. 93. - P. 103.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАССЕЯНИЮ  
БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ****Н. Т. Скляр, И. А. Корж, Н. М. Правдивый**

Разработана компьютерная программа расчетов времяпролетных спектров рассеянных нейтронов методом Монте-Карло в случае многоизотопных (до 5 изотопов) рассеятелей цилиндрической формы с центральным отверстием. Работа программы проиллюстрирована примерами рассеяния нейтронов образцами полиэтилена и железа. На основе этих расчетов получены поправки, которые обычно вводятся в экспериментально полученные сечения: поправки на ослабление потоков падающих и рассеянных нейтронов, на угловое разрешение эксперимента, а также на вклад многократно рассеянных нейтронов.

**MODELING OF THE FAST NEUTRON SCATTERING EXPERIMENTS****M. T. Sklyar, I. O. Korzh, M. M. Pravdivy**

A Monte-Carlo computer program was created for calculations of scattering neutron time-of-flight spectra in case samples which may contain up to five isotopes and may have central hole. On the base of these calculations we obtained corrections which usually are introduced to the experimental cross sections and they are the result of the multiple scattering effects, neutron flux attenuation and the angular spread of neutrons incident on a cylindrical sample.