

УДК 539.172.4

# ЯДЕРНІ ДАНІ ДЛЯ НЕЙТРОННО-ФІЗИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ РЕАКТОРІВ

**М. Алізадех\***

E-mail: trefoilsymbol@gmail.com

**Б. М. Бондар**

Інженер-радіофізик

Відділ радіаційної безпеки і дозиметричного контролю

Всеукраїнський центр радіохірургії

клінічної лікарні «Феофанія»

вул. Академіка Заболотного 21, м. Київ, Україна, 03680

E-mail: miarex@ukr.net

**В. М. Бондар**

Кандидат фізико-математичних наук, асистент\*

E-mail: vira\_bondar@ukr.net

**Б. Ю. Лещенко**

Кандидат фізико-математичних наук, доцент\*

E-mail: borisleshch@ukr.net

\*Кафедра атомних електростанцій і

інженерної теплофізики

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги 37, м. Київ, Україна, 03056

*Представлено результати експериментальних вимірювань ядерних даних для нейтронно-фізичних розрахунків реакторів. Зокрема, наведено особливості удосконаленої методики вимірювань перерізів ядерних реакцій з вильотом гама-квантів для кадмію, оцінено похибки даних, а також проведено відповідні теоретичні розрахунки з використанням програмного коду EMPIRE*

*Ключові слова: ядерні дані, механізми ядерних реакцій, перерізи, гама-поля, відновлення амплітудних спектрів*

*Представлены результаты экспериментальных измерений ядерных данных для нейтронно-физических расчетов реакторов. В частности, приведены особенности усовершенствованной методики измерений сечений ядерных реакций с вылетом гамма-квантов для кадмия, оценены погрешности данных, а также проведены расчеты данных с использованием кода EMPIRE. Проведен анализ полученных результатов с точки зрения механизмов ядерных реакций*

*Ключевые слова: ядерные данные, механизмы ядерных реакций, сечения, гамма-поля, восстановление амплитудных спектров*

## 1. Вступ

Бурхливий розвиток таких сучасних ядерних технологій, термоядерний синтез, а також необхідність контролю радіаційного навантаження на конструкційні матеріали ядерних реакторів нового покоління, проведення нейтронно-фізичних розрахунків реакторів потребує наявності відповідних ядерних даних по перерізах взаємодії нейтронів з конструкційними матеріалами реактора. Зазвичай перебіг ядерної реакції супроводжується вильотом  $\gamma$ -квантів, тому дослідження перерізів ( $n, \chi\gamma$ ) реакцій є важливим для уточнення характеристик полів  $\gamma$ -квантів, що безпосередньо пов'язано з особливостями розподілу енерговиділення, радіаційного захисту від  $\gamma$ -випромінювання тощо. Окрім того, проведення експериментальних вимірювань перерізів та їхнє порівняння з відповідними теоретичними розрахунками дає змогу поглибити наші уявленні про характеристики збуджених станів ядер та їхній розпад, а також удосконалити існуючі теоретичні моделі, що описують механізми ядерних реакцій.

## 2. Мета дослідження та постановка задачі.

На основі аналізу даних, представлених в міжнародних бібліотеках експериментальних ядерних даних, а також аналізу відповідних джерел, наведених в

[1], можна зробити висновок, що кількість експериментальних робіт, виконаних зі швидкими нейтронами енергії  $E_n = 14$  MeV, отриманих, зазвичай, при роботі генераторів на основі DT реакції. У той же час відмінність між результатами, представленими різними експериментальними групами, може сягати декількох разів, а роботи, в яких одночасно експериментально вимірюється спектр  $\gamma$ -квантів в широкому енергетичному діапазоні, відсутні. Саме тому проведення вимірювань такого типу з використанням удосконалених методик викликають підвищений інтерес як з теоретичної, так і з практичної точок зору.

Як це описано в [1], зазвичай експериментальні вимірювання перерізів ядерних реакцій з вильотом гамма-квантів проводяться з використанням активізаційної методики, яка має ряд недоліків, пов'язаних із наявністю значного фону від теплових нейтронів. Окрім того, проблемою при проведенні таких вимірювань є складність розділення сигналів, які відповідають вимірюваним гамма-квантам, від нейтронів первинного пучка, а також фону від космічного випромінювання. Таким чином, метою даного дослідження є вдосконалення існуючих методик по вимірюванню ядерних даних по перерізах нейтронних реакцій, а також пошук адекватної теоретичної моделі, як б дала можливість оцінювати ті дані, які відсутні в міжнародних бібліотеках експериментальних ядерних даних. Це обумовлює постановку задачі дослідження, яка полягає у визначенні диференційних перерізів ядерних реакцій при

взаємодії нейтронів з ядрами конструкційних матеріалів реактора.

Зокрема, у даній роботі запропоновано модифіковану методику часу прольоту для вимірювання перерізів ядерних реакцій з вильотом гамма-квантів, надійно розділивши їх від первинних нейтронів джерела, а також фонового космічного випромінювання. Проведено вимірювання перерізів реакцій з вильотом гамма-квантів при взаємодії нейтронів з ядрами кадмію. Експериментальні дані порівнюються з відповідними теоретичними розрахунками, виконаними з використанням коду EMPIRE у припущенні перебігу реакції через складене ядро, а також з врахування перед рівноважного вильоту гамма-квантів.

### 3. Експериментальні вимірювання ядерних даних по перерізах

Експериментальні вимірювання  $\gamma$ -спектра проводилося сцинтиляційним  $\gamma$ -спектрометром з часовою селекцією подій на базі кристала NaI (TI) ( $\varnothing 150 \times 100$  мм) і фотопомножувача ФЭУ-63. Джерелом нейтронів слугував імпульсний нейтронний генератор на основі реакції  $T(d, n)^4He$ . Дейтрони набувають необхідної енергії у низьковольтному імпульсному прискорювачі з клістронним групуванням пучка дейтронів із такими параметрами: енергія дейтронів 130 кеВ, частота послідовності імпульсів  $f = 7.25$  МГц, часова тривалість на половині висоти для піка нейтронів прямого пучка, що була виміряна методом часу прольоту, становить  $\Delta t = 2$  нс; середня інтенсивність джерела нейтронів при використанні твердої Ti-T мішені  $\sim 10^7$  с $^{-1}$ .

Вимірювання проводилися в кільцевій геометрії під кутом  $\theta_\gamma = 90^\circ$  відповідно до напрямку нейтронів (рис. 1). Зразок мав форму тора з великим радіусом  $R_s = 16,5$  см, товщиною 2 см та масою 6050 г. Ti-T мішень, що бомбардувалася дейтронами, було розташовано в центрі тора, що опромінювався. Нейтрони вилітали з джерела під кутом  $\theta_n \approx 90^\circ$  до напрямку дейтронів. Енергія нейтронів, відповідно, становила приблизно  $En = 14,1$  МеВ. Відбір подій, що відповідали реєстрації  $\gamma$ -квантів на інтенсивному фоні вторинних нейтронів, космічного випромінювання та наведеної радіоактивності, реалізовано методом часу прольоту.

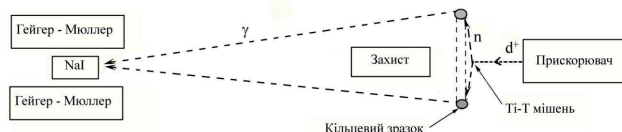


Рис. 1. Геометрія експерименту

Прольотна база (відстань між мішенню генератора нейтронів і серединою циліндричного кристала NaI  $\gamma$ -спектрометра) становила  $L = 172$  см. Така геометрія забезпечувала надійне розділення за часом сукупності сигналів, обумовлених  $\gamma$ -квантами, що випромінювалися зразком, від фонових  $\gamma$ -квантів та нейтронів (розсіяних на стінах, стелі та підлозі ек-

спериментальної зали), а також від нейтронів, які потрапляли до детектора після перерозсіяння на зразку. Застосовувалося формування сигналів з прив'язкою до фіксованої долі їхньої амплітуди. Диференціальним дискримінатором на реєстрацію відбиралися тільки  $\gamma$ -кванти (рис. 2).

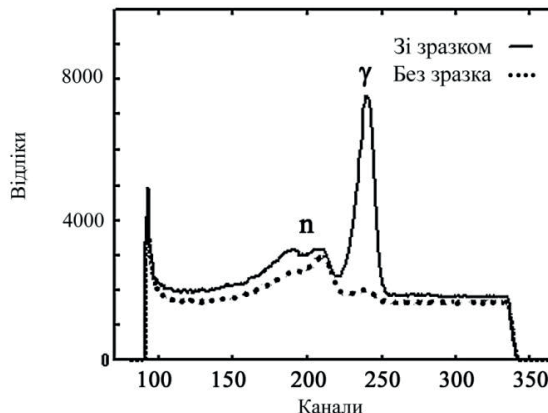


Рис. 2. Часова селекція нейтронів і миттєвих  $\gamma$ -квантів: суцільна лінія — спектр зі зразком, пунктир — спектр без зразка

Ефективність часової селекції було збільшено за рахунок використання додаткового захисту  $\gamma$ -детектора. Пасивний захист являв собою масивні блоки з комбінації речовин, що забезпечують сильне поглинання нейтронів та  $\gamma$ -квантів у широкому інтервалі енергій (сталь, важкий бетон, свинець, борований поліетилен) з товщиною близько 0,3 м та загальною масою близько 2,5 т. Пасивний захист охоплював суцільний кут, близький до  $4\pi$ , тоді як захист колімаційного отвору від прямого нейтронного потоку здійснювався сталевим тінювим конусом довжиною  $l = 40$  см. Додатковий активний захист, переважно від космічної радіації, реалізовано за рахунок оточення кристала NaI килимом з лічильників Гейгера-Мюллера, включених у схему антизбігів ( $\tau \approx 10^{-6}$  с) із сигналами спектрометричного тракту.

Система моніторингу нейтронного потоку являла собою окремий тракт селекції первинних нейтронів методом часу прольоту та амплітудної селекції. Детектором нейтронного монітора слугував пластмасовий сцинтилятор  $\varnothing 30 \times 40$  мм, з'єднаний з фотопомножувачем ФЭУ-36. Монітор було розміщено на відстані  $L_m = 3,36$  м від мішені генератора нейтронів під кутом  $\theta_m = 140^\circ$  до напрямку пучка дейтронів, що відповідало енергії первинних нейтронів 13,5 МеВ.

Для відновлення перерізів  $\sigma(E_\gamma)$  з відповідних амплітудних апаратних спектрів було використано регуляризувальний алгоритм на компактних множинах [2, 3].

Отримані результати після обробки експериментальних даних наведено на рис. 3. Результати даної роботи орівнюються з експериментальними даними інших авторів [4, 5].

Як видно з рис. 3, значення перерізів у цілому узгоджуються з результатами інших авторів в енергетичних діапазонах, де існують відповідні експериментальні дані.

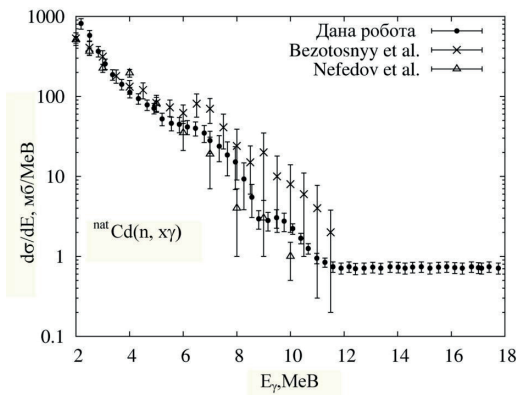


Рис. 3. Ядерні дані по перерізах реакцій  $^{nat}\text{Cd}(n, x\gamma)$ : точки – експериментальні дані, отримані в даній роботі, хрестики – [4], трикутники – [5]

#### 4. Теоретичні розрахунки ядерних даних

Теоретичні розрахунки ядерних даних по перерізах було проведено з використанням коду EMPIRE із застосуванням удосконаленого методу Хаузера – Фешбаха [6], що базується на статистичній теорії ядерних реакцій. У рамках такого підходу вважається, що переріг реакції відбувається через складене ядро. Зокрема, переріз реакції типу  $X(a,b)Y: a + X \rightarrow C \rightarrow b + Y$ , що йде по каналу  $b$ , визначається таким співвідношенням

$$\sigma_b(E, J, \pi) = \sigma_c(E, J, \pi) \frac{\Gamma_b(U = E_a + S_a, J, \pi)}{\Gamma(U, J, \pi)}, \quad (1)$$

де  $\sigma_c$  – переріз утворення компаунд-ядра  $C$ ;  $U$  – енергія збудження компаунд-ядра,  $E_a$  – енергія налітаючої частинки  $a$ ;  $\Gamma_b$  – ширина розпаду по каналу  $b$ ;  $\Gamma$  – повна ширина розпаду збуджених станів компаунд-ядра зі спіном  $J$  та парністю  $\pi$ :

$$\Gamma(U, J, \pi) = \sum_e \Gamma_e(U, J, \pi) = \frac{1}{2\pi\rho_c(U, J, \pi)} \times \sum_{J=0}^{\infty} \sum_{\pi' = J-1}^{J+1} \sum_{l=J-1/2}^{j+1/2} \int_0^{U-S_e} \rho_{C-e}(U', J, \pi') T_e^{jl\pi'}(U-S_e-U') dU'. \quad (2)$$

Тут  $S_e$  – енергія відділення частинки  $e$  від компаунд-ядра;  $\rho_c$  – густина рівнів у компаунд-ядрі,  $\rho_{C-e}$  густина рівнів залишкових ядер;  $U'$  – енергія збудження дочірнього ядра;  $T_e^{jl\pi'}$  – коефіцієнт проходження для частинки  $e$  з енергією  $E_e = U - S_e - U'$ , орбітальним моментом  $l$  та повним кутовим моментом  $j$ ;  $J'$  – спин дочірнього ядра. У випадку нуклонів коефіцієнти проходження розраховувалися за оптичною моделлю, тоді як для  $\gamma$ -квантів  $S_e = 0$  і коефіцієнт проходження  $\gamma$ -кванта типу  $X$  та мультипольності  $\lambda$  має вигляд

$$T_e^{jl\pi'} = 2\pi \cdot \sum_{X=E,M} \omega_X(l, \pi') E_\gamma^{2\lambda+1} \bar{f}_{X\lambda}(E_\gamma), \quad (3)$$

де фактор  $\omega_X(l, \pi')$  враховує закон збереження парності,  $\bar{f}_{X\lambda}(E_\gamma)$  – радіаційна силова функція (РСФ)  $\gamma$ -розпаду.

Таким чином, для розрахунку перерізів необхідні такі вхідні параметри [7 – 9]: оптичний потенціал, густини ядерних рівнів та РСФ. Для врахування передрівноважних процесів у даній роботі використовувався екситонна модель [10].

На рис. 4 представлено результати порівняння експериментально отриманих диференціальних перерізів реакцій  $^{nat}\text{Cd}(n, x\gamma)$  з відповідними теоретичними розрахунками, проведеними в припущенні перебігу реакції через складене ядро, а також з урахуванням вильоту частинок на передрівноважних стадіях реакції. При проведенні розрахунків було використано вхідні параметри, що встановлені в кодах EMPIRE і TALYS за домовленістю. Обчислення було проведено з урахуванням ізотонічного складу природного зразка кадмію:  $^{106}\text{Cd}$  (12 %),  $^{108}\text{Cd}$  (0,9 %),  $^{110}\text{Cd}$  (12,4 %),  $^{111}\text{Cd}$  (12,8 %),  $^{112}\text{Cd}$  (24 %),  $^{113}\text{Cd}$  (12,3 %),  $^{114}\text{Cd}$  (28,8 %) та  $^{116}\text{Cd}$  (7,6 %), де в дужках указано розповсюдженість відповідного ізотопу. Для отримання значень перерізів  $^{nat}\text{Cd}(n, x\gamma)$  реакцій результати розрахунків для різних ізотопів додавалися з масовими коефіцієнтами, що відповідають значенню їхньої розповсюдженості. Результати порівняно з експериментальними даними інших авторів [4, 5]. Як видно з рисунків, теоретично розрахований спектр, у цілому, узгоджується з експериментальними даними за винятком енергетичного діапазону від 6 до 11 MeB. Розходження може свідчити про похибки в значеннях вхідних параметрів, що їх було використано в розрахунках, або про певні особливості структури даного ядра, не враховані в обчисленнях.

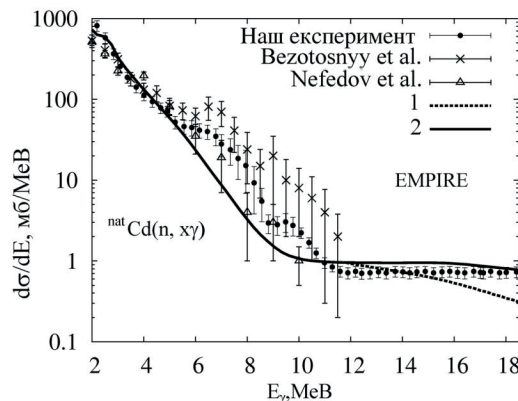


Рис. 4. Ядерні дані по перерізах реакцій  $^{nat}\text{Cd}(n, x\gamma)$ , розраховані з використанням коду EMPIRE.

Експериментальні результати: точки – дані, отримані в даній роботі, хрестики – [4], трикутники – [5]. Теоретичні розрахунки: 1 – перерізи, обчислені з використанням моделі Хаузера – Фешбаха; 2 – результати, розраховані за моделлю Хаузера - Фешбаха з урахуванням вильоту частинок на передрівноважних стадіях

Як видно з рис. 4, перерізи, обчислені з урахуванням вильоту частинок на передрівноважних стадіях, краще узгоджуються з експериментальними даними у високоенергетичній області. У той же час розрахунки, проведені за моделлю Хаузера - Фешбаха без урахування передрівноважних процесів, дають занижені значення перерізів в області високих енергій  $\gamma$ -квантів. Для кращого узгодження теоретичних розрахунків з

експериментальними результатами необхідно також проводити дослідження залежності теоретичних розрахунків від вхідних параметрів теоретичної моделі, зокрема, густини ядерних рівнів, радіаційних силових функцій та оптичного потенціалу.

## 5. Висновки

У результаті проведених досліджень запропоновано модифіковану методику часу прольоту для вимірювання перерізів ядерних реакцій з вильотом гамма-квантів, надійно розділивши їх від первинних нейтронів джерела, а також фонового космічного випромінювання. Зокрема, проведено вимірювання перерізів реакцій з вильотом гамма-квантів при взаємодії нейтронів з ядрами кадмію.

Експериментальні дані порівнюються з відповідними теоретичними розрахунками, виконаними з використанням коду EMPIRE в рамках моделі Хаузера-Фешбаха, а також з врахування перед рівноважного вильоту гамма-квантів. Результати розрахунків загалом узгоджуються з експериментальними даними за винятком енергетичного діапазону

від 6 до 11 MeV, що може свідчити про похибки в значеннях вхідних параметрів, які було використано в розрахунках, або певні особливості структури даного ядра, не враховані в обчисленнях. У ході досліджень також продемонстровано, що перерізи, обчислені з урахуванням вильоту частинок на передрівноважних стадіях, краще узгоджуються з експериментальними даними в високоенергетичній області, тоді як результати розрахунків, проведених за моделлю Хаузера - Фешбаха, що не враховує передрівноважні процеси, є заниженими. Для кращого узгодження теоретичних розрахунків з експериментальними результатами необхідно також проводити дослідження залежності теоретичних розрахунків від вхідних параметрів теоретичної моделі, зокрема, густини ядерних рівнів, радіаційних силових функцій та оптичного потенціалу.

Отримані результати включені до міжнародної бібліотеки експериментальних ядерних даних, так можуть бути використані для проведення нейтронно-фізичних розрахунків реакторів. Досліджені теоретичні моделі можуть бути використані для оцінки ядерних даних, які відсутні експериментальних бібліотеках.

## Література

1. Bondar, V. M. Differential cross sections of gamma-ray production by 14 MeV neutrons on iron and bismuth [Text] / V. M. Bondar, I. M. Kadenko, B. Yu. Leshchenko, Yu. M. Onishchuk, V. A. Plujko // Reactor Dosimetry State Of The Art 2008: Proc. 13th Int. Symp., 25-30 May 2008, Alkmaar, Netherlands. – 2009. – P. 516 – 524.
2. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач [Текст] / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1985. – 286 с.
3. Gurevich, G. M. Apparatus function of scintillation  $\gamma$ -spectrometer based on large. NaI(Tl) [Text] / G. M. Gurevich, V. M. Mazur, G. V. Solodukhov // Instruments and Experimental Techniques. – 1975. – Vol. 2. – P. 59–62.
4. Bezotosnyy, V. M. Total cross-section for gamma-production by inelastic interaction of fast neutrons with light, intermediate and heavy nuclei [Text] / V. M. Bezotosnyy, V. M. Gorbachev, M. A. Efimova, L. M. Surov, M. S. Shevtsov // Yadernye Konstanty. – 1980. – № 19. – 77 p.
5. Nefedov, Yu. Ya. Gamma Production cross sections and gamma spectra measurements results at 14-MeV neutron interaction with nuclei Na, S, Cl, Ti, V, Cr, Ni, Zn, Ge, Nb, Cd In, Sn, Bi, 235U and 238U [Text] / Yu. Ya. Nefedov, V. I. Nagornyy, V. I. Semenov, A. K. Zhitnik, R. A. Orlov, A. E. Shmarov // Journ.: Vop. At. Nauki i Tekhn., Ser. Yadernye Konstanty. – 2000. – Vol. 1. – 7 p.
6. Capote, R. EMPIRE: Parameters for calculation of nuclear reactions of relevance for energy and non-energy nuclear applications [Text] / R. Capote, M. Herman, M. Oblozinsky [et al] // Nuclear Data Sheets. – 2009. – Vol. 110. – P. 3107 – 3214.
7. Plujko, V. A. Statistical description of dipole gamma-transitions in atomic nuclei [Text] / V. A. Plujko, R. Capote, O. M. Gorbachenko, V. M. Bondar // Proceedings of the 3-rd International conference Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-Kyiv2010), June 7-12, 2010, Kyiv, Ukraine. – 2011. – Part I. – P. 342 – 346.
8. Plujko, V. A. GDR Parameters for Atomic Nuclei Within New Systematics [Text] / V. A. Plujko, R. Capote, O. M. Gorbachenko, V. M. Bondar // Proceedings of the 19th Annual Conference of Doctoral Students (WDS-2010), 1st June - 4th June, 2010, Prague, Czech Republic. – 2010. – P. 116 – 121.
9. Plujko, V. A. Giant Dipole Resonance parameters with uncertainties from photonuclear cross sections [Text] / V. A. Plujko, R. Capote, O. M. Gorbachenko // Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 2011. – Vol. 97. – P. 567 – 585.
10. Gadioli, E. Pre-Equilibrium Nuclear Reactions [Text] / E. Gadioli, P. E. Hodson. – Oxford : Clarendon Press, 1992. – 518 p.