

О. М. Горбаченко, Н. Р. Дзисюк, А. О. Каденко,  
І. М. Каденко, В. А. Плюйко, Г. І. Применко

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ*

## ВИМІРЮВАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПЕРЕРІЗІВ ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ (n, p), (n, $\alpha$ ), (n, 2n) НА ІЗОТОПАХ ДИСПРОЗІЮ, ЕРБІЮ ТА ІТЕРБІЮ

Представлено результати вимірювань перерізів ядерних реакцій (n, p), (n,  $\alpha$ ), (n, 2n) на ізотопах диспрозію, ербію та ітербію при енергії нейтронів  $14,6 \pm 0,2$  MeV та їхнє порівняння з наявною експериментальною інформацією, оціненими ядерними даними та результатами теоретичних розрахунків. Вимірювання проводились нейтронно-активаційним методом. При теоретичному розрахунку використано коди TALYS 1.2 та EMPIRE 3.0, а також емпіричні та напівемпіричні систематики оцінок перерізів реакцій.

*Ключові слова:* переріз ядерних реакцій, нейтронно-активаційний метод, механізми ядерних реакцій.

### Вступ

Дослідження перерізів ядерних реакцій з нейтронами посідають важливе місце, оскільки дають можливість отримати інформацію щодо збуджених станів атомного ядра та механізмів ядерних реакцій [1]. Крім того, дані з нейтронних перерізів є необхідними в прикладних застосуваннях, наприклад при проектуванні захисту термоядерних реакторів та модернізації вже існуючих ядерних енергетичних установок [2, 3]. Зокрема, вони дають змогу розраховувати наведену активність та ступінь радіаційних пошкоджень конструктивних елементів ядерних реакторів [3]. Незважаючи на велику кількість інформації [3, 4] щодо перерізів взаємодії нейтронів з ядрами, для деяких ядер та енергій нейтронів усе ще існують прогалини в експериментальних даних. Додатковою проблемою є розходження в результатах, що представлені різними експериментальними групами, і які іноді відрізняються в рази [2].

У даній роботі як експериментально, так і теоретично досліджуються перерізи реакцій (n, p), (n,  $\alpha$ ), (n, 2n) на ізотопах диспрозію, ербію та ітербію з енергією нейтронів в околі 14 MeV. Практичний інтерес до перерізів таких ядерних реакцій викликаний широким їхнім застосуванням в експериментальних методах ядерної фізики, наприклад у методі граничних індикаторів при вимірюванні спектра нейтронів в активній зоні ядерного реактора, або в нейтронному активаційному аналізі.

Експериментальна частина роботи є продовженням та уточненням досліджень, виконаних у [5, 6]. Експериментальні результати порівнюються з теоретичними розрахунками з використанням кодів EMPIRE 3.0 [7] і TALYS 1.2 [8] та з даними з останніх версій оцінених бібліотек ядерних даних ENDF/B-VII, TENDL-2010, JENDL 4.0.

Для оцінки перерізів реакцій (n, p), (n,  $\alpha$ ), (n, 2n) при енергії нейтронів в околі 14,6 MeV на даний час широко використовуються емпіричні та напівемпіричні формули й підходи, що базуються на систематиках експериментальних даних для перерізів ядерних реакцій [9 - 16]. У більшості ситуацій параметри систематичних залежностей були визначені із залученням порівняно обмеженої кількості експериментальних даних, зокрема з великими похибками [17]. У даній роботі проаналізовано надійність використання систематик із робіт [9 - 16] для опису перерізів реакцій (n, p), (n,  $\alpha$ ) та (n, 2n) на ізотопах диспрозію, ербію та ітербію з урахуванням нових отриманих значень.

### Методика експерименту

Вимірювання перерізів виконано з використанням нейтронно-активаційного методу [18], джерелом нейтронів був нейтронний генератор НГ-300 [19]. Максимальне значення густини потоку нейтронів у місці опромінювання зразка було визначено експериментально і становило  $5,2 \cdot 10^8$  (1/см<sup>2</sup>·с). Під час експериментів для генерації нейтронів використовувався змішаний ( $D^+$  -  $D_2^+$ ) компонент іонного пучка з максимальною енергією  $\sim 225$  кеВ.

Для опромінювання були використані зразки з природною сумішшю ізотопів. Вимірювання були проведені на трьох зразках диспрозію. Перші два зразки мали форму диску з розмірами  $\varnothing 15,4 \times 0,07$  мм та масою 132 мг. Перед опромінюванням їх було проаналізовано на присутність домішок інших елементів. Були виявлені домішки таких елементів: Gd – 1,21 %, Sc – 0,039 %, Cu – 0,017 %, що було враховано при обчисленні кількості досліджуваних ядер у зразках. Третій зразок диспрозію мав форму циліндра з розмірами

© О. М. Горбаченко, Н. Р. Дзисюк, А. О. Каденко,  
І. М. Каденко, В. А. Плюйко, Г. І. Применко, 2012

Ø 17,68 × 1,23 мм та масою 2,5158 г. Зразок ербію мав форму паралелепіпеду із розмірами 8,5 × 7,3 × 2,1 мм та масою 1,022 г. Зразок ітербію мав циліндричну форму з діаметром 17,6 мм, висотою 1,2 мм та масою 1,9669 г.

Опромінювання зразків проводилося під кутом 0 град до осі пучка дейтронів на відстані 10 мм від титан-третієвого шару мішені нейтронного генератора. Величину енергії нейтронів, усередненої по зразку, та її розкид було визначено на основі декількох підходів: перший – шляхом проведення кінематичних розрахунків за програмним кодом DROSG [22]; другий – експериментальний на основі Zr/Nb методу [23]; третій – з використанням розрахунків методом Монте-Карло. У розрахунках урахувався вплив на нейтронний спектр перерозсіяння швидких нейтронів на конструкційних елементах нейтронного генератора та на стінах експериментальної зали в місці розташування зразка. Для цього було розроблено модель нейтронного генератора та обчислено форму спектра нейтронів із використанням коду MCNP4C [20]. Було враховано реальну геометрію опромінення зразків, інформацію про складові конструкційних матеріалів, геометричні

розміри зразка та його положення відносно титан-третієвої мішені нейтронного генератора. Незалежно від методу обчислень було отримано, що при використаній геометрії експерименту середнє значення енергії нейтронів та його похибка становлять 14,6 ± 0,2 МеВ.

Апаратурні гамма-спектри ядер-продуктів активації накопичувалися спектрометром на основі коаксіального HPGe детектора (об'єм ~ 110 см<sup>3</sup>). Енергетична роздільна здатність спектрометра 2,0 кеВ для гамма-квантів з енергією 1332 кеВ, що супроводжують розпад <sup>60</sup>Co, та 0,9 кеВ для гамма-квантів з енергією 122 кеВ при розпаді <sup>57</sup>Co. Час вимірювання апаратурних гамма-спектрів ядер-продуктів активації змінювався від 5 хв до 36 год.

Величини перерізів ядерних реакцій визначалися відносним активаційним методом, де опорною (моніторною) ядерною реакцією була реакція <sup>27</sup>Al(n, α)<sup>24</sup>Na [24] з перерізом реакції σ<sub>m</sub> = 112,9 ± 1,2 мб при E<sub>n</sub> = 14,6 ± 0,2 МеВ. За таким методом переріз досліджуваної ядерної реакції при фіксованій енергії нейтронів визначається виразом

$$\sigma_x = \sigma_m \cdot \Phi \cdot \frac{S_x \cdot \lambda_x \cdot I_{m,\gamma} \cdot \varepsilon_m \cdot N_m \cdot v_m \cdot D_m(t_{m,ir}) \cdot (1 - D_m(t_{m,c})) \cdot D_m(t_{m,m})}{S_m \cdot \lambda_m \cdot I_{x,\gamma} \cdot \varepsilon_x \cdot N_x \cdot v_x \cdot D_x(t_{x,ir}) \cdot (1 - D_x(t_{x,c})) \cdot D_x(t_{x,m})}, \quad (1)$$

де S<sub>α</sub> - площа під піком повного поглинання у спектрі зразка α (тут і далі індекс α = x відповідає досліджуваному зразку, а α = m - моніторному); λ<sub>α</sub> - стала розпаду ідентифікованих ядер-продуктів активації у зразку α: λ<sub>α</sub> = ln 2 / T<sub>1/2,α</sub>, T<sub>1/2,α</sub> - період напіврозпаду відповідних ядер; I<sub>α,γ</sub> - квантовий вихід (інтенсивність) ідентифікованих гамма-ліній ядер-продуктів у зразку α; ε<sub>α</sub> - ефективність реєстрації гамма-квантів для ідентифікованих гамма-ліній ядер-продуктів у зразку α; N<sub>α</sub> - кількість ядер-мішені у зразку α: N<sub>α</sub> = N<sub>A</sub> m<sub>α</sub> / M<sub>α</sub>, де N<sub>A</sub> - число Авогадро, а m<sub>α</sub>, M<sub>α</sub> - маса зразка α та молярна маса відповідних ядер мішені; v<sub>α</sub> - процентний вміст відповідного ізотопу у природній суміші хімічних елементів ядер мішені зразка α; D<sub>α</sub>(t) = 1 - exp(-λ<sub>α</sub> · t); t<sub>α,m</sub> - час набору апаратурного спектра для зразка α після витримки зразка з часом t<sub>α,c</sub> та його опромінення за час t<sub>α,ir</sub>; Φ = Φ<sub>m</sub> / Φ<sub>x</sub> - відношення густин потоків нейтронів, що опромінюють моніторний та досліджуваний зразки.

Після лінеаризації формули (1) відповідно до

методу перенесення похибок [25] знаходимо вираз для відносної похибки середнього значення перерізу

$$\frac{\delta \sigma_x}{\sigma_x} = \sqrt{\left(\frac{\delta \sigma_x}{\sigma_x}\right)_{stat}^2 + \left(\frac{\delta \sigma_x}{\sigma_x}\right)_{syst}^2}, \quad (2)$$

де виділені статистична  $\left(\frac{\delta \sigma_x}{\sigma_x}\right)_{stat}$  та систематич-

на  $\left(\frac{d \sigma_x}{\sigma_x}\right)_{syst}$  компоненти похибки:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\delta \sigma_x}{\sigma_x}\right)_{stat}^2 = & \left(\frac{\delta S_x}{S_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta m_x}{\bar{m}_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta v_x}{\bar{v}_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta S_m}{S_m}\right)^2 + \\ & + \left(\frac{\delta m_m}{\bar{m}_m}\right)^2 + \left(\frac{\delta v_m}{\bar{v}_m}\right)^2 + \left(\frac{\delta \sigma_m}{\sigma_m}\right)^2 + \\ & + d_x^2(t_{x,ir}) \left(\frac{\delta t_{x,ir}}{t_{x,ir}}\right)^2 + d_x^2(t_{x,m}) \left(\frac{\delta t_{x,m}}{t_{x,m}}\right)^2 + \\ & + d_m^2(t_{m,ir}) \left(\frac{\delta t_{m,ir}}{t_{m,ir}}\right)^2 + d_m^2(t_{m,m}) \left(\frac{\delta t_{m,m}}{t_{m,m}}\right)^2 + \\ & + \ln^2 2 \cdot \left(\frac{\delta t_{x,c}}{T_{1/2,x}}\right)^2 + \ln^2 2 \cdot \left(\frac{\delta t_{m,c}}{T_{1/2,m}}\right)^2 + \delta \Phi^2, \quad (3) \end{aligned}$$

$$\left(\frac{\delta\sigma_x}{\bar{\sigma}_x}\right)_{\text{sys}}^2 = \left(\frac{\delta I_x}{\bar{I}_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta\epsilon_x}{\bar{\epsilon}_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{1/2,x}}{\bar{T}_{1/2,x}}\right)^2 + \left(\frac{\delta I_m}{\bar{I}_m}\right)^2 + \left(\frac{\delta\epsilon_m}{\bar{\epsilon}_m}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{1/2,m}}{\bar{T}_{1/2,m}}\right)^2. \quad (4)$$

У формулах (2) - (4)  $\bar{p}$  - середнє значення, а  $\delta p = \sigma_p$  - середньоквадратичне відхилення величин  $p$ , що визначені у виразі (1);  $d_\alpha(t) = \lambda_\alpha \cdot t / (\exp(\lambda_\alpha \cdot t) - 1)$ . В останньому доданку співвідношення (3) враховано те, що у відносному активаційному методі  $\bar{\Phi} = 1$ .

Формула (1) відповідає найпростішій ситуації, коли, зокрема, зміна густини нейтронного потоку під час опромінювання є малою, внесок від вторинних нейтронів (перерозсіяння нейтронів) можна не враховувати, зразки є точковими (тобто можна знехтувати ефектом самопоглинання гамма-квантів у зразках) і відсутній або практично відсутній розпад ядер продуктів активації за рахунок каскадних гамма-переходів. Крім того, з використанням виразу (1) однозначно обчислити переріз конкретної ядерної реакції можливо або у випадку відсутності конкуруючих (супутніх) ядерних реакцій, що призводять до утворення того ж самого ядра-продукту, або коли їхнім внеском можна знехтувати. Усе це потребує попереднього аналізу ізотопного складу досліджуваних зразків, визначення можливих типів ядерних реакцій та їхніх порогів.

При обробці експериментальних даних були враховані всі ці фактори при визначенні перерізів. Достатньо висока точність визначення середнього значення енергії нейтронів (~1,4 %) дає змогу вважати потік нейтронів майже моноенергетичним. Неточковість досліджуваних зразків, яка приводить до самопоглинання гамма-квантів у зразках (але, зазвичай, покращує статистику вимірів), ураховувалась модифікацією ефективності детектора  $\epsilon_\alpha$ . Для цього була використана модель детектора, описана в [5], що дало можливість урахувати реальну геометрію та елементний склад зразків. Аналогічно до підходу в роботі [5] були проаналізовані й можливі внески ефекту каскадного додавання. Було виявлено, що для досліджуваних ізотопів впливом ефектів каскадного додавання можна знехтувати.

Таким чином, попередній аналіз показав, що при обчисленні перерізів ядерних реакцій можна застосовувати формулу (1) з використанням середніх значень для всіх величин, що в неї входять, і модифікованого виразу для ефективності реєстрації.

Були також проаналізовані внески похибок різного типу в повну похибку перерізів. Похибки значень часу опромінення, часу витримки, часу набору, визначення маси зразків та значення моніторного перерізу є малими і кожна з їхніх величин не перевищувала значення 1,1 %. Похибки процентного вмісту відповідного досліджуваного ізотопу у природній суміші хімічних елементів ядер мішені зразка вважалися такими, що збігаються з похибкам вмісту відповідних ізотопів в їхній природній суміші. Згідно з даними таблиць розповсюдження хімічних елементів цей компонент похибки не перевищує 5,4 %. Зміна нейтронного потоку під час опромінювання  $\delta\Phi$  не перевищувала 5 %. Результати аналізу ефекту каскадного додавання показали, що для досліджуваних ізотопів впливом даного ефекту можна знехтувати. Значення цих компонент відносних похибок зазвичай менші за похибки площ під піками повного поглинання і тому не враховувалися при обчисленні статистичного компонента (3) повної похибки, квадрат якої, за таких умов, має вигляд

$$\left(\frac{\delta\sigma_x}{\bar{\sigma}_x}\right)_{\text{stat}}^2 \cong \left(\frac{\delta S_x}{\bar{S}_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta S_m}{\bar{S}_m}\right)^2. \quad (5)$$

Відповідно до виразу (4) систематична похибка визначається похибками ядерних характеристик (квантові виходи гамма-ліній ядер-продуктів, періоди напіврозпаду) та ефективності реєстрації гамма-квантів для ідентифікованих гамма-ліній ядер-продуктів. Невизначеністю квантового виходу та періоду напіврозпаду для моніторного ядра продукту, що становлять < 1 %, можна знехтувати, і вираз (4) для квадрата систематичної похибки приймає вигляд

$$\left(\frac{\delta\sigma_x}{\bar{\sigma}_x}\right)_{\text{sys}}^2 \cong \left(\frac{\delta I_x}{\bar{I}_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{1/2,x}}{\bar{T}_{1/2,x}}\right)^2 + \left(\frac{\delta\epsilon_x}{\bar{\epsilon}_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta\epsilon_m}{\bar{\epsilon}_m}\right)^2 \approx \left(\frac{\delta I_x}{\bar{I}_x}\right)^2. \quad (6)$$

На рис. 1 - 9 наведено повну похибку, обчислену за формулами (2), (5) і (6).

### Результати вимірювань та розрахунків перерізів реакцій

**Ядерні реакції на диспрозії.** У досліджуваному діапазоні енергій нейтронів для реакцій  $^{156}\text{Dy}(n, 2n)^{155}\text{Dy}$  та  $^{158}\text{Dy}(n, 2n)^{157(m+g)}\text{Dy}$  раніше було виконано декілька вимірювань з достатньо великими похибками. Відзначимо, що сумарний

переріз реакції  $(n, 2n)$  на ядрі  $^{158}\text{Dy}$  складається з перерізу утворення метастабільного стану ядра  $^{157m}\text{Dy}$ , період напіврозпаду якого становить 21,6 мс, з подальшим розпадом в основний стан ядра  $^{157}\text{Dy}$  та перерізу утворення самого ядра в основному стані  $^{157g}\text{Dy}$ . У подальшому ядро  $^{157}\text{Dy}$  зазнає розпаду з періодом напіврозпаду 8,14 год.

На рис. 1 демонструються отримані в даній роботі значення величин перерізів ядерної реакції  $(n, 2n)$  на ізотопах диспрозію, експериментальні дані з бази EXFOR [4], результати обчислень за кодами EMPIRE 3.0 та TALYS 1.2 і за систематиками з робіт [9, 12], також показано дані з бібліотек оцінених ядерних даних TENDL та ENDF. Тут і далі в якості даних EXFOR наведено всі існуючі на даний час експериментальні дані.

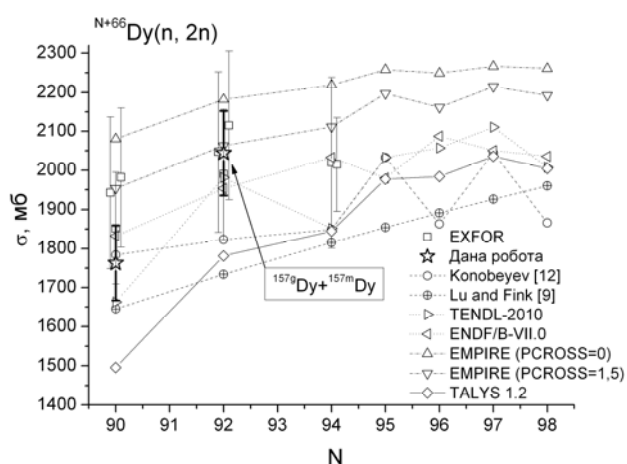


Рис. 1. Залежність перерізу реакції  $(n, 2n)$  від кількості нейтронів у материнському ядрі диспрозію. Також показано деякі залишкові ядра.

Розрахунки за програмним кодом EMPIRE 3.0 проводились з урахуванням передрівноважних процесів за екситонною моделлю (PCROSS = 1,5) та без урахування передрівноважних процесів (PCROSS = 0). Густина ядерних рівнів розраховувалась за підсиленою узагальненою надплинною моделлю ядра та використовувався глобальний оптичний потенціал Конінга - Делароша [26]. Розрахунки демонструють суттєву відмінність між результатами теоретичних розрахунків значень перерізів ядерних реакцій кодом EMPIRE 3.0 з PCROSS = 1,5 та без урахування передрівноважних процесів (PCROSS = 0) [7]. Урахування передрівноважної компоненти знижує величину перерізу реакції  $(n, 2n)$  за рахунок зростання ймовірності конкуруючих реакцій.

При розрахунках із застосуванням коду TALYS 1.2 було використано стандартний набір параметрів за домовленістю, а саме густина рівнів визначалась за моделлю Гільберта - Камерона, також використовувався глобальний оптичний потенціал Конінга - Делароша, а передрівно-

важні процеси обчислювалися за двокомпонентною екситонною моделлю.

Значення виміряного перерізу на ізотопі  $^{158}\text{Dy}$  в межах похибки збігається з наявними експериментальними даними, а значення виміряного середнього значення перерізу на ізотопі  $^{156}\text{Dy}$  є дещо меншим, однак збігається зі значенням, узятим із бібліотеки TENDL-2010 та розрахунками за кодом TALYS 1.2. Із збільшенням кількості нейтронів на ізотопах диспрозію спостерігається тенденція зростання величин перерізів реакції  $(n, 2n)$ .

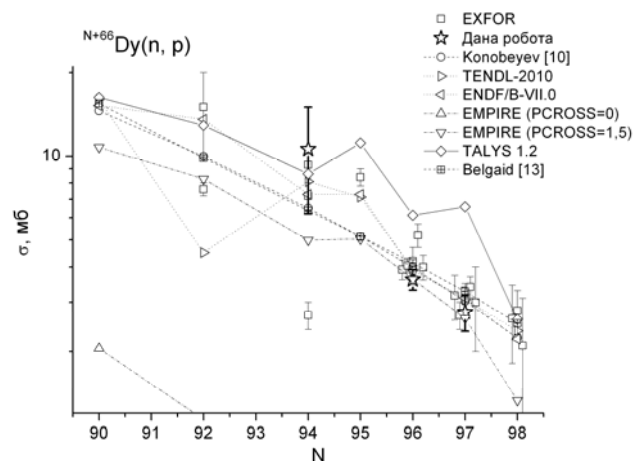


Рис. 2. Залежність перерізу реакції  $(n, p)$  від кількості нейтронів у материнському ядрі диспрозію.

Тут і далі для більшої наочності результатів значення перерізів для ізотопів рознесені в околі даного ізотопу. На рис. 2 демонструються та порівнюються значення перерізів реакції  $(n, p)$  на ізотопах диспрозію з експериментальними даними з EXFOR, систематичними залежностями [10, 13], а також із результатами теоретичних розрахунків та зі значеннями з бібліотек оцінених ядерних даних. Визначався переріз утворення ядер-продуктів реакції  $(n, p)$ , таких як  $^{160}\text{Tb}$ ,  $^{162}\text{Tb}$ ,  $^{163}\text{Tb}$ . Середнє значення на ізотопі  $^{160}\text{Dy}$  є трохи більшим, а на ізотопі  $^{162}\text{Dy}$  лежить трохи нижче існуючих експериментальних даних, але узгоджуються з ними в межах похибок. Внесок у переріз вильоту протонів реакції  $(n, p)$  на передрівноважній стадії є домінуючим. Значення перерізу реакції відрізняється в п'ять разів для випадку обчислень з та без урахування даного процесу. Урахування передрівноважних процесів призводить до значного підвищення перерізів реакції  $(n, p)$  за рахунок збільшення ймовірності вильоту протонів у результаті зростання на передрівноважній стадії середньої енергії вилітаючих протонів у порівнянні з кулонівським бар'єром. Переріз реакції  $(n, p)$  спадає зі збільшенням кількості нейтронів у материнському ядрі диспрозію. Перерізи, що були розраховані кодом

EMPIRE 3.0 з урахуванням передрівноважних процесів, значно краще узгоджуються з експериментальними даними, ніж розраховані значення кодом TALYS 1.2. Останні є завищеними у порівнянні з першими. Із систематик найбільш краще узгоджується з експериментальними даними систематика з роботи [10].

На рис. 3 зображено залежність перерізів реакцій  $(n, \alpha)$  від кількості нейтронів для ізотопів диспрозію. Для ядра  $^{164}\text{Dy}$  значення перерізу, виміряного у даній роботі, знаходиться між значеннями перерізів наявних експериментальних даних. Така неузгодженість експериментальних даних між собою, у свою чергу, ускладнює можливість створення оцінених баз ядерних даних та їхніх систематик і потребує подальшого аналізу. Усі бібліотеки оцінених ядерних даних та розрахунки за систематиками [14 - 16] дають занижене значення перерізу даної реакції у порівнянні з експериментальними даними. Для реакції  $(n, \alpha)$ , аналогічно до  $(n, p)$ , передрівноважні процеси є найбільш імовірними і внесок вильоту альфа-частинок на передрівноважній стадії значно збільшує величину перерізу даної ядерної реакції. Переріз реакції  $(n, \alpha)$  досить суттєво спадає зі збільшенням кількості нейтронів у материнському ядрі диспрозію.

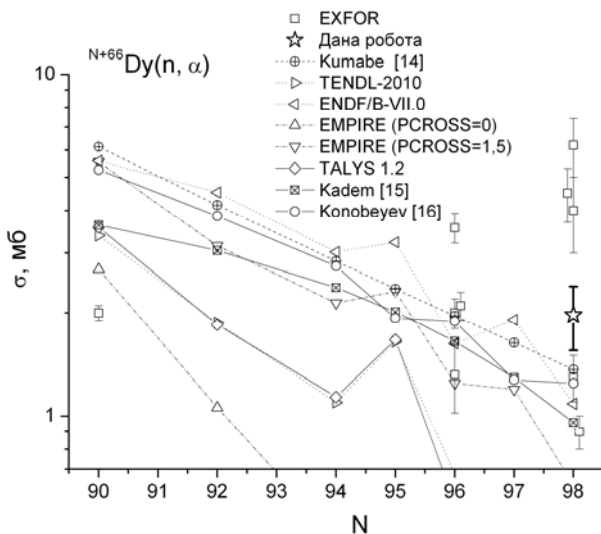


Рис. 3. Залежність перерізу реакції  $(n, \alpha)$  від кількості нейтронів у материнському ядрі диспрозію.

**Ядерні реакції на ербії.** Значення перерізів реакцій  $(n, 2n)$  на ізотопах ербію представлені на рис. 4. Спостерігається гарне узгодження виміряних нами значень перерізів з даними інших авторів, оціненими даними, результатами розрахунків (за кодом EMPIRE 3.0) та систематичними залежностями. Хід перерізу реакції  $(n, 2n)$  на ербії є аналогічним ходу перерізу реакції  $(n, 2n)$  на диспрозії.

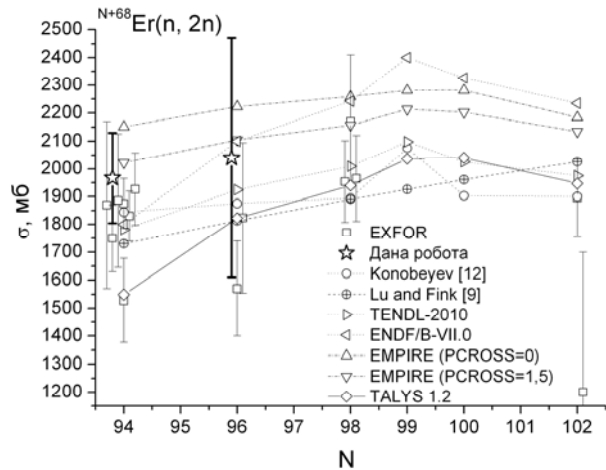


Рис. 4. Залежність перерізу реакції  $(n, 2n)$  від кількості нейтронів у материнському ядрі ербію.

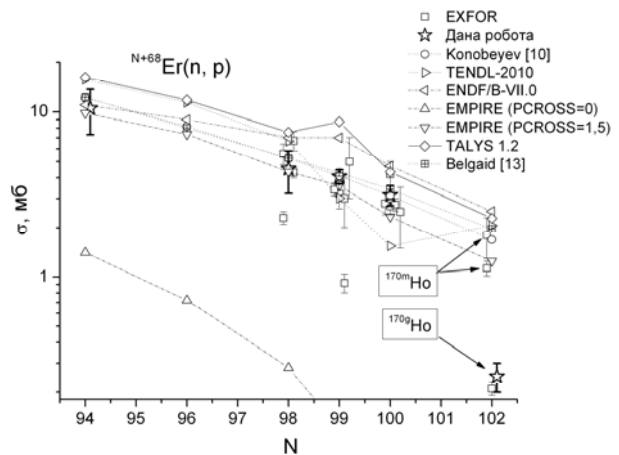


Рис. 5. Залежність перерізу реакції  $(n, p)$  від кількості нейтронів у материнському ядрі ербію. Також показано деякі залишкові ядра.

На рис. 5 представлено значення перерізів реакцій  $(n, p)$  на ізотопах ербію. Значення перерізів реакцій  $^{166}\text{Er}(n, p)^{166}\text{Ho}$  та  $^{167}\text{Er}(n, p)^{167}\text{Ho}$  були отримані з перерізів реакцій  $^{166,167}\text{Er}(n, x)^{166}\text{Ho}$  та  $^{167,168}\text{Er}(n, x)^{167}\text{Ho}$  після віднімання внеску перерізів конкуруючих ядерних реакцій  $^{167}\text{Er}(n, d + np)^{166}\text{Ho}$  та  $^{168}\text{Er}(n, d + np)^{167}\text{Ho}$ , які обчислювалися з відповідних систематичних залежностей з роботи [11]. Для ядра  $^{168}\text{Er}$  представлено переріз реакції  $(n, p)$  з утворенням основного стану ядра  $^{168}\text{Ho}$ , період напіврозпаду якого становить 2,99 хв. Для ядра  $^{162}\text{Er}$  представлено вперше виміряне значення перерізу  $^{162}\text{Er}(n, p)^{162}\text{Ho}$  [5], що було відсутнім у базі експериментальних даних EXFOR. Даний переріз добре узгоджується з розрахунками кодом EMPIRE 3.0 з урахуванням передрівноважних процесів, з результатами розрахунків за систематикою [10] та з даними з бібліотеки оцінених ядерних даних ENDF/B-VII.

Експериментальні значення перерізів реакцій на ядрах  $^{166}\text{Er}$ ,  $^{167}\text{Er}$ , виміряні різними авторами, трохи відрізняються і, загалом, розташовані між результатами обчислень за кодами

TALYS 1.2 та EMPIRE 3.0. Винятком є тільки два значення перерізу реакції на ядрах  $^{166}\text{Er}$ ,  $^{167}\text{Er}$ , що є дуже сильно заниженими у порівнянні з іншими даними.

Значення перерізів реакцій ( $n, \alpha$ ) на ізотопах ербію демонструються на рис. 6. Визначався переріз утворення ядер-продуктів реакції ( $n, \alpha$ ), таких як  $^{165}\text{Dy}$ ,  $^{167}\text{Dy}$ , при чому переріз реакції для ядра-продукту  $^{165}\text{Dy}$  виміряно як окремо у метастабільному  $^{165\text{m}}\text{Dy}$  і в основному  $^{165\text{g}}\text{Dy}$  станах, так і разом  $^{165\text{m}}\text{Dy} + ^{165\text{g}}\text{Dy}$ . Для ядра  $^{168}\text{Er}$  сумарний переріз реакції ( $n, \alpha$ ) складається з перерізу утворення метастабільного стану ядра  $^{165\text{m}}\text{Dy}$ , період напіврозпаду якого 1,257 хв, з подальшим розпадом в основний стан ядра  $^{165}\text{Dy}$  та перерізом утворення самого ядра  $^{165}\text{Dy}$ . У подальшому ядро  $^{165}\text{Dy}$  зазнає бета-розпаду з періодом напіврозпаду 2,334 год.

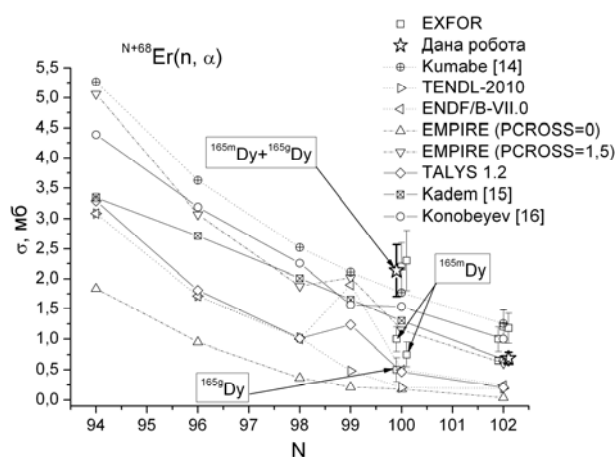


Рис. 6. Залежність перерізу реакції ( $n, \alpha$ ) від кількості нейтронів у материнському ядрі ербію. Також показано деякі залишкові ядра.

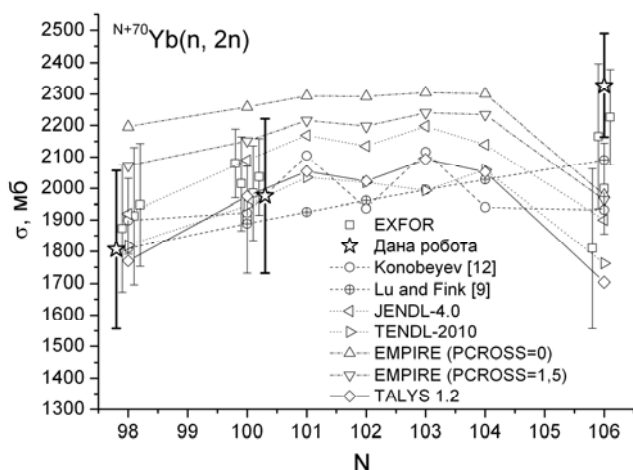


Рис. 7. Залежність перерізу реакції ( $n, 2n$ ) від кількості нейтронів у материнському ядрі ітербію.

На рис. 9 демонструються значення перерізів реакцій ( $n, \alpha$ ) на ізотопах ітербію. Експериментальні дані узгоджуються з результатами теоретичних розрахунків за кодом EMPIRE 3.0 та систе-

Виміряне значення сумарного перерізу з утворенням ядра  $^{165}\text{Dy}$  узгоджується з експериментальними даними.

**Ядерні реакції на ітербії.** На рис. 7 представлено залежність значень перерізів реакцій ( $n, 2n$ ) від кількості нейтронів для ізотопів ітербію. Визначався переріз утворення ядер-продуктів реакції ( $n, 2n$ ), таких як  $^{168}\text{Yb}$ ,  $^{170}\text{Yb}$ ,  $^{176}\text{Yb}$ . Спостерігається прийнятне узгодження експериментальних ядерних даних на ізотопах  $^{168}\text{Yb}$  та  $^{170}\text{Yb}$  з різного типу розрахунками, окрім обчислень без урахування передрівноважних процесів. Для ядра  $^{176}\text{Yb}$  існують розходження між експериментальними та оціненими середніми значеннями перерізу реакції.

На рис. 8 представлено значення перерізів реакцій ( $n, p$ ) на ізотопах ітербію. Значення перерізів ядерних реакцій  $^{172}\text{Yb}(n, p)^{172}\text{Tm}$  та  $^{173}\text{Yb}(n, p)^{173}\text{Tm}$  визначалися з реакцій  $^{172,173}\text{Yb}(n, x)^{172}\text{Tm}$  та  $^{173,174}\text{Yb}(n, x)^{173}\text{Tm}$  відповідно способом, аналогічним тому, що й для зразка ербію. Результати обчислень загалом узгоджуються з наявною експериментальною інформацією за винятком ізотопу на парно-непарному ядрі  $^{173}\text{Yb}$  [4]. Виміряне значення перерізу реакції ( $n, p$ ) на  $^{173}\text{Yb}$  знаходиться між результатами розрахунків за кодами TALYS 1.2 та EMPIRE 3.0. Для ядра  $^{172}\text{Yb}$  також представлено нове значення перерізу  $^{172}\text{Yb}(n, p)^{172}\text{Tm}$  [6], що відсутнє в базі експериментальних даних EXFOR. Даний переріз лежить ближче до розрахунків кодом EMPIRE 3.0 з урахуванням передрівноважних процесів та близький до систематик [10] і [13].

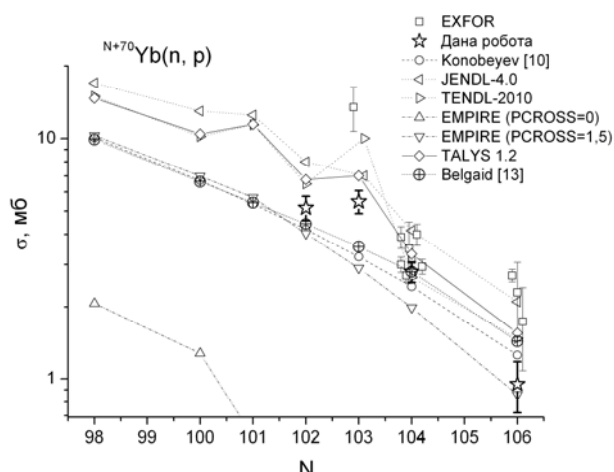


Рис. 8. Залежність перерізу реакції ( $n, p$ ) від кількості нейтронів у материнському ядрі ітербію.

матиками з [15] і [16]. Значення перерізу, обчислене за кодом TALYS 1.2 та із бібліотек оцінених ядерних даних, є меншим порівняно з експериментальними результатами.

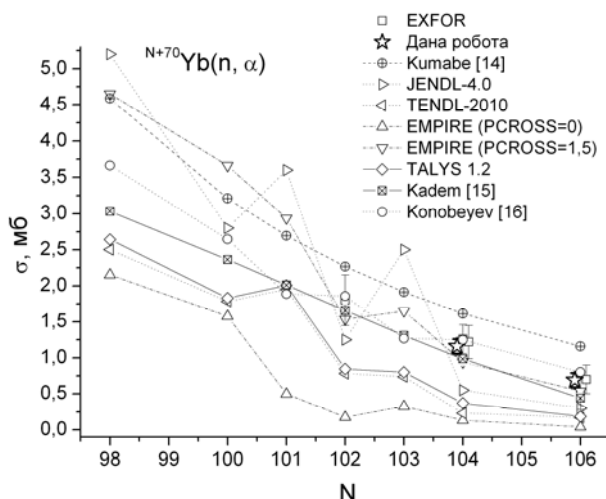


Рис. 9. Залежність перерізу реакції  $(n, \alpha)$  від кількості нейтронів у материнському ядрі ітербію.

### Висновки

Виміряно перерізи ядерних реакцій  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$  та  $(n, 2n)$  на ядрах диспрозію, ербію та ітербію при енергії нейтронів  $14,6 \pm 0,2$  MeV.

Результати було порівняно з наявною експериментальною інформацією з бази ядерних да-

них EXFOR, оціненими ядерними даними ENDF/B-VII.0, JENDL-4.0, TENDL-2010 та розрахунками за кодами EMPIRE 3.0, TALYS 1.2 і систематиками різних авторів. У більшості ситуацій виміряні результати узгоджуються в межах похибок з наявними експериментальними даними. Розраховані значення перерізів за кодом EMPIRE 3.0 з урахуванням передрівноважних процесів краще описують експериментальні дані, ніж значення величини перерізів, розраховані кодом TALYS 1.2 з параметрами за домовленістю. Урахування передрівноважної компоненти зменшує величину перерізу реакції  $(n, 2n)$ , обчисленої тільки з урахуванням утворення компунд-ядра, а для перерізу реакцій  $(n, p)$  та  $(n, \alpha)$  призводить до його значного підвищення. З обчислень за систематиками найбільш узгоджуються з експериментальними даними результати розрахунків за виразами з робіт [10, 12 - 16].

У цілому для оцінки перерізів досліджуваних реакцій у даній області масових чисел ядер можуть бути рекомендовані розрахунки за кодом EMPIRE 3.0.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Capote R., Herman M., Obložinský P. et al. RIPL - Reference Input Parameter Library for Calculation of Nuclear Reactions and Nuclear Data Evaluations // Nuclear Data Sheets. - 2009. - Vol. 110. - P. 3107 - 3214; see RIPL-3 web site at <http://www-nds.iaea.org/RIPL-3/>.
2. Forrest R.A. Data requirements for neutron activation Part I: Decay data // Fusion Engineering and Design. - 2006. - Vol. 81. - P. 2143 - 2156.
3. Koning A.J., Blomgren J., Jacqmin R. et al. Nuclear data for sustainable nuclear energy // JRC Scientific and Tech. Rep. - 2009. - EUR23977EN.
4. Cross section information storage and retrieval system (EXFOR) II National Nuclear Data Center (NNDC) / Brookhaven National Laboratory, USA. - <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor00.htm>.
5. Дзисюк Н.Р., Каденко А.О., Каденко І.М., Применко Г.І. Перерізи ядерних реакцій  $(n, x)$  на ізотопах диспрозію та ербію // Ядерна фізика та енергетика. - 2011. - Т. 12, № 2. - С. 137 - 144.
6. Дзисюк Н.Р., Каденко А.О., Каденко І.М., Применко Г.І. Перерізи ядерних реакцій  $(n, x)$  на ізотопах диспрозію, ербію та ітербію // Науковий вісник Ужгородського університету. - 2011. - Т. 29. - С. 150 - 161.
7. Herman M., Capote R., Carlson B.V. et al. EMPIRE 3.0: Nuclear Reaction Model Code System for Data Evaluation // Nuclear Data Sheets. - 2007. - Vol. 108. - P. 2655 - 2715. <http://www.nndc.bnl.gov/empire/>
8. Koning A.J., Hilaire S. and Duijvestijn M.C. TALYS-1.0 // Proc. of the Int. Conf. on Nucl. Data for Science and Technology - ND2007 (Nice, France, April 22 - 27, 2007) / Eds. O. Bersillon, F. Gunsing, E. Bauge, R. Jacqmin, S. Leray. - EDP Sciences, 2008. P. 211 - 214. <http://www.talys.eu/home/>
9. Lu Wen-deh., Fink R.W. Applicability of constant nuclear temperature approximation in statistical-model calculation of reaction cross-sections at 14.4 MeV for medium Z nuclei // Physical Review. - 1971. - C4. - P. 1173.
10. Broeders C.H.M., Konobeev A.Yu. Semi-empirical systematic of  $(n, p)$  reaction cross-section at 14.5, 20 and 30 MeV // Nuclear Physics. - 2006. - Vol. A 780. - P. 130 - 145.
11. Konobeyev A.Yu., Korovin Yu.A. Use of systematics to estimate neutron reaction cross-sections // Atom energy. - 1998. - Vol. 85, No. 2. - P. 556 - 563.
12. Konobeyev A.Yu., Korovin Yu.A. Semi-empirical systematic of  $(n, 2n)$  reaction cross-section at 14.5 MeV // Il Nuovo Cimento. - 1999. - Vol. 112 A. - No. 9. - P. 1001 - 1012.
13. Belgaid M., Tassadit A., Kadem F. et al. Semi-empirical systematics of  $(n, p)$  reaction cross sections at 14.5 MeV neutron energy // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 2005. - Vol. B 239. - P. 303 - 313.
14. Fujino Y., Hyakutake M., Kumabe I. Activation cross section of zirconium and Molybdenum isotopes for 14.6 MeV neutrons // Bull. Inst. Chem. Res. - 1982. - Vol. 60, No. 2. - P. 205 - 207.
15. Kadem F., Belgaid M., Amokrane M. Systematic studies of  $(n, \alpha)$  reaction cross-section at 14.5 MeV // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 2008. - Vol. B 266. - P. 3213 - 3220.
16. Konobeyev A. Yu., Fisher U., Broeders C.H.M. Improved systematic of  $(n, \alpha)$  reaction cross-section

- at 14.5 MeV // Applied Radiation and Isotopes. - 2009. - Vol. 67. - P. 357 - 361.
17. *Levkovskii V.N.* Systematics of (n, p) and (n,  $\alpha$ ) cross section // Atomnaya Energiya. - 1979. - Vol. 47, No. 3. - P. 200 - 202.
  18. *Кузнецов Р.А.* Активационный анализ - М.: Атомиздат, 1974. - 344 с.
  19. *Применко Г.И., Майданюк В.К., Неплюев В.М. и др.* Генератор 14 МэВ нейтронов с потоком  $5 \cdot 10^{11} \text{ c}^{-1}$  // Приборы и техника эксперимента. - 1989. - № 6. - С. 39 - 41.
  20. *Briesmeister J.F.* MCNP - a general Monte Carlo N-particle transport code. Los Alamos National Laboratory Report. - 1997. - Vol. LA-12625-M.
  21. *Dzysiuk N., Kadenko I., Koning A.J., Yermolenko R.* Cross sections for fast-neutron interaction with Lu, Tb and Ta isotopes // Physical Review. - 2010. - Vol. C81. - 014610.
  22. *Drosog M.* DROSG-2000, codes and database for 59 neutron source reactions, documented in the IAEA report IAEA-NDS-87 Rev. 8 (January 2003), received from the IAEA Nuclear Data Section.
  23. *Agrawal H.M., Pepelnik R.* Determination of the mean neutron energy using the Zr/Nb and the Ni method // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. - 1995 - Vol. A366. - P. 349 - 353.
  24. *Filatenkov A. A., Chuvaev S.V.* Systematic Measuring of Activation Cross-sections at Energy of Neutrons about 14 MeV // Preprint RI-252. - 1999. - P. 80.
  25. *Каденко І.М., Плюйко В.А.* Основи методів оцінок статистичних даних та функцій їх розподілу: Навчальний посібник. - К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2003. - С. 25 - 31.
  26. *Koning A.J., Delaroche J.P.* Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200 MeV // Nuclear Physics. - 2003. - Vol. A713. - P. 231.

**А. Н. Горбаченко, Н. Р. Дзисюк, А. А. Каденко,  
И. Н. Каденко, В. А. Плюйко, Г. И. Применко**

### **ИЗМЕРЕНИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЕЧЕНИЙ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ (n, p), (n, $\alpha$ ), (n, 2n) НА ИЗОТОПАХ ДИСПРОЗИЯ, ЭРБИЯ И ИТТЕРБИЯ**

Представлены результаты измерений сечений ядерных реакций (n, p), (n,  $\alpha$ ), (n, 2n) на изотопах диспрозия, эрбия и иттербия при энергии нейтронов  $14,6 \pm 0,2$  МэВ и их сравнение с имеющейся экспериментальной информацией, оцененными ядерными данными и теоретическими расчетами. Измерения проводились нейтронно-активационным методом. При теоретическом расчете использованы коды TALYS 1.2 и EMPIRE 3.0, а также эмпирические и полуэмпирические систематики оценок сечений ядерных реакций.

*Ключевые слова:* сечение ядерных реакции, нейтронно-активационный метод, механизмы ядерных реакций.

**О. М. Gorbachenko, N. R. Dzysiuk, A. O. Kadenko,  
I. M. Kadenko, V. A. Plujko, G. I. Primenko**

### **MEASUREMENT AND THEORETICAL ANALYSIS OF CROSS SECTIONS NUCLEAR REACTION (n, p), (n, $\alpha$ ), (n, 2n) ON ISOTOPES OF DYSPROSIUM, ERBIUM AND YTTERBIUM**

Cross section of the nuclear reactions (n, p), (n,  $\alpha$ ), (n, 2n) were measured on isotopes of dysprosium, erbium and ytterbium at the neutron energies  $14.6 \pm 0.2$  MeV. They were compared with available experimental data, evaluated nuclear data and the results of theoretical calculations. Cross sections were measured within neutron-activation method. Theoretical calculations of the nuclear cross sections reaction were performed with the use of EMPIRE 3.0 and TALYS 1.2 codes as well as by empirical and semi-empirical systematics.

*Keywords:* nuclear reaction cross section, neutron-activation analysis, the nuclear reaction mechanisms.

Надійшла 16.05.2012

Received 16.05.2012