

А. О. Каденко<sup>1</sup>, Н. Р. Дзисюк<sup>2</sup>, І. М. Каденко<sup>1</sup>, Г. І. Применко<sup>1</sup><sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ<sup>2</sup> Університет м. Уппсала, Швеція**ПЕРЕРІЗИ ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ (n, n'α) НА ЯДРАХ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ЕНЕРГІЇ НЕЙТРОНІВ 14,7 МеВ**

Представлено результати аналізу перерізів ядерних реакцій  $^{159}\text{Tb}(n, n'\alpha)^{155}\text{Eu}$ ,  $^{165}\text{Ho}(n, n'\alpha)^{161}\text{Tb}$ ,  $^{169}\text{Tm}(n, n'\alpha)^{165}\text{Ho}$  та  $^{176}\text{Yb}(n, n'\alpha)^{172}\text{Er}$  при енергії нейтронів у діапазоні (8 - 20) МеВ. Виконано порівняння величин даних перерізів між наявною експериментальною інформацією, оціненими ядерними даними та результатами теоретичних розрахунків із варіацією різних параметрів теоретичних моделей. Розрахунки виконано із використанням коду TALYS-1.2.

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

**Вступ**

На сьогоднішній день ядерні дані мають широкий спектр прикладних застосувань у різних галузях людської діяльності. Вимоги до якості таких даних підвищуються одночасно з технологічним розвитком та супутнім розширенням сфер їхнього застосування. Саме тому актуальність дослідження пов'язана з аналізом перерізів ядерних реакцій, що не втрачає своєї повноти, а, навпаки, набуває нового оберту, оперуючи сучасними модельними підходами до вивчення механізмів перебігу ядерних реакцій та структури атомного ядра. На жаль, унаслідок ряду причин не всі відкриті канали реакцій можуть бути вивченими експериментально. У такому разі комбінація наявних експериментальних даних, деяких логічних припущень та результатів розрахунків із застосуванням сучасних комп'ютерних кодів стають надійною основою для поглибленого розуміння ядерних процесів.

У даному дослідженні йдеться про перерізи ядерних реакцій на ядрах тербію, гольмію, тулію та ітербію. Ці елементи належать до групи рідкоземельних елементів (лантаноїдів) та характеризуються рядом специфічних властивостей. Прецизійне знання величини перерізу саме на цих елементах є необхідним з точки зору прикладного застосування при проектуванні конструкції та захисту термоядерних реакторів, модернізації вже існуючих ядерних установок, а також гамма-джерел, що використовуються в ядерній медицині [1].

Загалом дана робота є продовженням серії досліджень, що проводяться на кафедрі ядерної фізики [2]. Оперуючи високоінтенсивним нейтронним генератором та застосовуючи нейтронно-активаційний метод було визначено низку перерізів (n, x) при енергії нейтронів близько 14,7 МеВ.

Наразі в даній роботі представлено аналіз перерізів реакцій  $^{159}\text{Tb}(n, n'\alpha)^{155}\text{Eu}$ ,  $^{165}\text{Ho}(n, n'\alpha)^{161}\text{Tb}$ ,  $^{169}\text{Tm}(n, n'\alpha)^{165}\text{Ho}$  та  $^{176}\text{Yb}(n, n'\alpha)^{172}\text{Er}$ . Канал реакції (n, n'α) є відкритим при енергіях нейтронів 14 - 15 МеВ, але є менш дослідженим у порівнянні із традиційними (n, 2n), (n, p) та (n, α). Цей канал, як і (n, np), (n, np + d), (n, dn) та (n, 3n), належить до групи, яку іноді називають "рідкісними реакціями" [3]. Причина важливості знання саме таких перерізів полягає в тому, що вони є необхідними для тестування моделей ядерних реакцій та розуміння їхніх механізмів з метою коректності інтерпретації енергетичних та кутових розподілів, отриманих при вивченні емітованих частинок (гелію). Не менш важливим є вдосконалення теоретичних уявлень та розуміння механізму таких рідкісних реакцій, у тому числі підтвердження чи спростування того, що "кластерність" має з'являтися в дифузному шарі ядерної поверхні [3].

**Розрахунки та аналіз перерізів ядерних реакцій**

На сьогоднішній день теорія ядерних реакцій суттєво розвинута в сенсі кількості запропонованих моделей та трактувань перебігу внутрішньо-ядерних процесів, однак її незавершеність виражена у відсутності універсальної моделі, що дозволяє описати перебіг реакцій на всіх стадіях. У даній роботі теоретичний розрахунок перерізів  $^{159}\text{Tb}(n, n'\alpha)^{155}\text{Eu}$ ,  $^{165}\text{Ho}(n, n'\alpha)^{161}\text{Tb}$ ,  $^{169}\text{Tm}(n, n'\alpha)^{165}\text{Ho}$  та  $^{176}\text{Yb}(n, n'\alpha)^{172}\text{Er}$  було виконано із залученням сучасного коду TALYS-1.2 [4]. Цей код дає можливість індивідуального підходу для розрахунку перерізу конкретної ядерної реакції шляхом варіювання необхідних параметрів. Спочатку розрахунок було виконано з набором параметрів за замовчуванням, що включає статистичну модель Хаузера - Фешбаха, екситонну модель для враху-

вання передрівноважної компоненти, при цьому переріз зворотної реакції розраховувався, використовуючи оптичну модель із локальною та глобальною параметризацією Конінга та Делароша (OMP) [5], що є автоматично скоригованою для деформованих ядер, які розглядаються в роботі.

$^{159}\text{Tb}(n, n'\alpha)^{155}\text{Eu}$ . Аналіз літературних джерел та найповнішої експериментальної бази ядерних даних EXFOR [6] до нещодавно показав наявність лише однієї експериментальної роботи Qaim [7], де автор указав верхню межу даного перерізу ( $< 0,3$  мб) при енергії нейтронів 14,7 МеВ. Складність експериментального вимірювання перерізу даної реакції пов'язана з малою величиною такого перерізу, що на фоні  $(n, 2n)$  та  $(n, \gamma)$  каналів є суттєво пригніченим. У роботі [7] вказується, що автори пропонують лише оцінку верхньої межі даного перерізу (межу детектування), пояснюючи це достатньо низькою роздільною здатністю бета-лічильників, які було використано для детектування наведеної активності. Згодом цей переріз було визначено нами та отримано його оцінку у  $(0,04 \pm 0,02)$  мб, деталі експерименту наведено в [2]. Значення цього перерізу є суттєво уточненим та відрізняється від верхньої оцінки майже на порядок. Зважаючи на похибку у 50 %, це вдалося зробити шляхом ретельного планування експерименту та проведенням вимірів на низькофоновоному антикомptonівському спектрометрі протягом тривалого часу експозиції.

На рисунку (а) представлено результат порівняння теоретично розрахованих функцій збудження реакції  $^{159}\text{Tb}(n, n'\alpha)^{155}\text{Eu}$ , отриманих з використанням програмного коду TALYS-1.2, двох експериментальних значень з бази експериментальних даних EXFOR, а також даних з бібліотек оцінених ядерних даних ENDF/B-VII.1 та JENDL-4.0.

При енергії налітаючих нейтронів близько 14 МеВ переріз реакції може бути чутливим до врахування/неврахування передрівноважних процесів. Тому для розрахунків функції збудження було використано двокомпонентну екситонну модель. З метою перевірки необхідності врахування саме цієї стадії реакції розрахунок було виконано для випадку, коли цей процес ураховано. У коді TALYS-1.2 одним із шляхів урахування передрівноважної компоненти у вихідному каналі реакції є використання наступного набору функцій, що відповідають трьом варіаціям екситонної моделі, а саме:

**(preeqmod 1)** – модель опису передрівноважних процесів 1: аналітичний вираз для імовірності переходів із матричним елементом, що

залежить від енергії. Даний матричний елемент є вільним параметром, що відповідає середньому матричному елементу залишкової взаємодії двох частинок (екситонів), який виникає при переходах між двома екситонними рівнями;

**(preeqmod 2)** – модель опису передрівноважних процесів 2: числовий вираз для імовірності переходів із матричним елементом, що залежить від енергії;

**(preeqmod 3)** – модель опису передрівноважних процесів 3: імовірність переходів з оптичною моделлю для розрахунків імовірності зіткнення.

Розраховані залежності з використанням перших трьох параметрів з набору функцій добре узгоджуються між собою, а також із розрахунком (параметри за замовчуванням **(default)**) та нашим експериментальним значенням. На рисунку (а) помітно, що хід залежності функції збудження, який відповідає випадку задіяння параметра **(preeqcomplex n)**, є заниженим по відношенню до експериментальних даних. Треба зазначити, що даний параметр відповідає моделі Кольбах [8] для реакцій підхвату, зриву та вибивання додатково до екситонної моделі.

Варто зауважити, що для розрахунку перерізу, коли у вихідному каналі утворюється такий кластер, як  $\alpha$ -частинка, опис лише з використанням екситонної моделі є недостатнім. Відомо, що для таких реакцій необхідно розрізняти також декілька механізмів: зрив, вибивання та розпад, що фактично є квазіпрямими каналами вильоту частинок і тому не покриваються екситонною моделлю. Це було підтверджено попереднім розрахунком. У TALYS-1.2 з цією метою включено феноменологічну модель Кольбаха, де переріз реакції представлено як суму екситонної моделі (EM) та ядерного переносу (NT) з особливим внеском, що описує механізм вибивання чи зриву

$$\frac{d\sigma_k^{PE}}{dE_k} = \frac{d\sigma_k^{EM}}{dE_k} + \frac{d\sigma_k^{NT}}{dE_k} + \frac{d\sigma_k^{KO}}{dE_k}. \quad (1)$$

Практично всі три процеси можуть бути оптимізованими при виконанні розрахунків шляхом їхнього підбору. З цією метою було використано параметри **(cknock)** та **(cstrip)**. Так, хід залежності з параметром **(cstrip a 0.5)** проходить значно нижче від основної групи кривих на рисунку (а-з), при цьому параметр **(cstrip)** зі значенням 0,5 дає змогу стверджувати, що в даному випадку ядерна реакція з імовірністю 0,5 може відбуватися за механізмом зриву.

Однак значно краще узгодження з експериментальними даними спостерігається при пара-

метрах (**cknock 1.4**) та (**cstrip 1**), що обрано як параметри за замовчуванням. На підставі підбору саме таких параметрів можна зробити прикінцевий висновок, що дана реакція при енергіях, що не дуже відрізняються від порогових, є більш чутливою до процесу вибивання в порівнянні із процесом зриву, при цьому розрахункові ймовірності кожного з них приблизно дорівнюють 0,5.

Розрахунок перерізу вимагає повного та чіткого визначення густини ядерних рівнів. У TALYS-1.2 реалізовано п'ять можливостей їхнього врахування, а саме:

**(ldmodel 1)** – модель Фермі-газу з постійною температурою, де головним припущенням є те, що збуджені стани окремих частинок, які, у свою чергу, формують збуджений стан ядра, характеризуються відсутністю колективних рівнів. Додатково до цього враховується модель сталої температури, де діапазон енергії збудження розділяється на частини, починаючи з енергії 0 MeV і до «співставленої енергії»  $E_M$ , де використовується закон «сталості температури». При енергії, вищій за енергію  $E_M$ , використовується модель Фермі-газу;

**(ldmodel 2)** – модель Фермі-газу із зворотним зміщенням. У даному випадку енергія зпарювання розглядається як параметр, що регулюється, і модель Фермі-газу використовується до 0 MeV;

**(ldmodel 3)** – узагальнена надплинна модель. У даній моделі беруться до уваги надпровідні парні кореляції відповідно до теорії Бардіна - Купера - Шриффера. Модель характеризується наявністю фазового переходу зі стану напровідності при малих енергіях, де парні кореляції мають сильний вплив на густину рівня, до діапазону високих енергій, що описується моделлю Фермі-газу. Таким чином, узагальнена модель надтекучості нагадує модель сталої температури за умови, що присутня відмінність у діапазоні низьких енергій;

**(ldmodel 4)** – мікроскопічні густини рівнів із таблиці Goriely. Дані густини рівнів було отримано на основі розрахунків Хартрі - Фока для енергій збудження до 150 MeV та значення спіну до 30;

**(ldmodel 5)** – мікроскопічні густини рівнів прийнято з таблиці Hilaire.

На рисунку (a) показано лише три з них, що мають відмінності по відношенню до розрахунку з параметром (**default**). Розрахунок з параметром (**ldmodel 5**) дає суттєво завищений результат по відношенню до експериментальних значень, що відповідає випадку мікроскопічних густин рівнів із таблиці Hilaire [9]. Випадок із застосуванням

узагальноної надплинної моделі занижує загальний хід функції збудження. У діапазоні (12 - 19) MeV поєднання моделі сталої температури із моделлю Фермі-газу (**ldmodel 1**), а також мікроскопічні дані густини рівнів із таблиці Goriely (**ldmodel 4**) описують даний переріз таким чином, що збігаються з розрахунком з параметром (**default**). Отже, на нашу думку, найкраще переріз даної реакції може бути описаним розрахунками з параметрами (**default**), (**ldmodel 2**), що використовуються для опису моделі Фермі-газу зі «зворотним зсувом», та (**ldmodel 3**), що використовує узагальнену модель надтекучості.

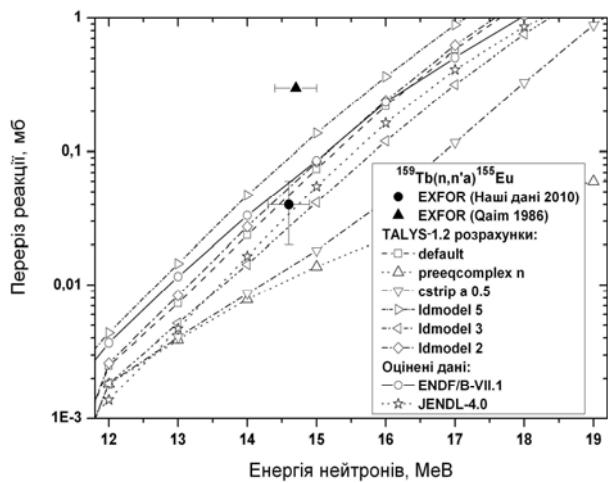
**$^{165}\text{Ho}(n, n'\alpha)^{161}\text{Tb}$** . Для даної реакції в EXFOR занесено лише одне виміряне значення перерізу для енергії нейтронів 14,7 MeV у вхідному каналі [7], що становить  $(180 \pm 60)$  мкб. Проведені нами розрахунки перерізу цієї реакції з параметрами, що найкращим чином описують переріз реакції  $^{159}\text{Tb}(n, n')^{155}\text{Eu}$ , дають змогу стверджувати, що експериментально виміряний переріз реакції  $^{165}\text{Ho}(n, n')^{161}\text{Tb}$ , як і в попередньому випадку, є завищеним щонайменше в декілька разів, а найоптимальнішими параметрами в TALYS для розрахунку цього перерізу є (**default**), (**ldmodel 2**) та (**ldmodel 3**), що й підтверджено гарною збіжністю з оціненими даними з JEFF-3.1/A (див. рисунок (б)). Саме тому найбільш достовірним значенням перерізу реакції  $^{165}\text{Ho}(n, n')^{161}\text{Tb}$  для енергії нейтронів 14,7 MeV мало б бути  $(30 \pm 8)$  мкб.

**$^{169}\text{Tm}(n, n'\alpha)^{165}\text{Ho}$** . Для даної реакції експериментальні дані в базі EXFOR відсутні, оскільки у вхідному каналі реакції формується стабільне ядро, тому застосування нейтронно-активаційного методу є неможливим. Виходячи з вищевказаного та роблячи аналогічні припущення щодо параметрів (**default**), (**ldmodel 2**), (**ldmodel 3**) та (**cstrip a 0.5**) як найкращих для розрахунку значення перерізу даної реакції для енергії нейтронів 14,7 MeV, з рисунка (в) можна також зробити висновок, що найбільш достовірним значенням перерізу реакції  $^{169}\text{Tm}(n, n')^{165}\text{Ho}$  для енергії нейтронів 14,7 MeV має бути  $(115 \pm 35)$  мкб.

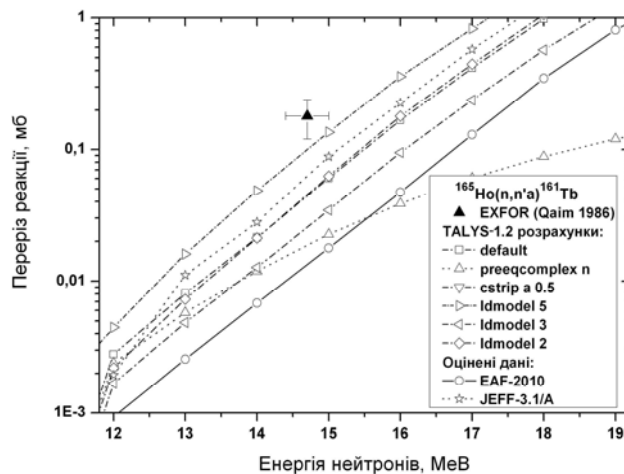
**$^{176}\text{Yb}(n, n'\alpha)^{172}\text{Er}$** . Опубліковано лише одну роботу з даними щодо даної ядерної реакції Qaim [7], де представлено експериментальне значення перерізу  $^{176}\text{Yb}(n, n')^{172}\text{Er}$  при енергії 14,7 MeV, що становить  $(0,14 \pm 0,07)$  мб. Нами також проведено незалежне вимірювання перерізу даної реакції та отримано значення  $(15 \pm 5)$  мкб, експериментальні умови щодо його вимірювання описано в [10]. Отриманий результат занесено до експериментальної бази ядерних даних EXFOR.

Таким чином, знов має місце відмінність виміряного раніше значення перерізу майже на порядок. Можливі чинники, що зумовлюють таку значну систематичну похибку, обговорено в [10].

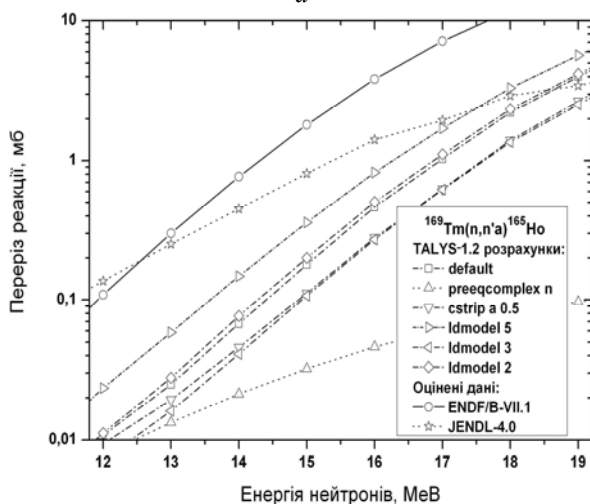
Результати порівняння виконаних теоретичних розрахунків з експериментальними даними для даної реакції представлено на рисунку (з).



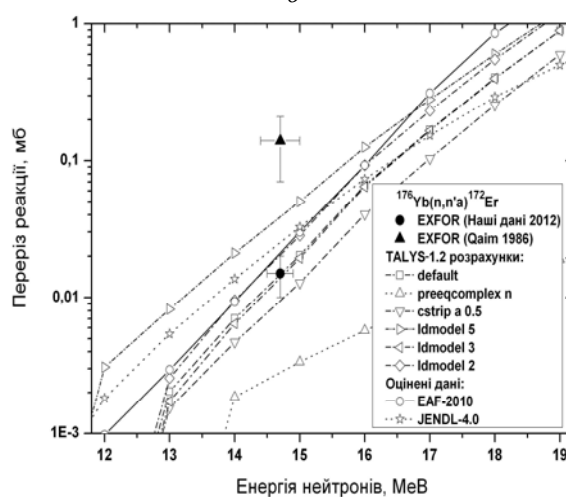
а



б



в



г

Перерізи ядерних реакцій:

а -  $^{159}\text{Tb}(n, n')^{155}\text{Eu}$ ; б -  $^{165}\text{Ho}(n, n')^{161}\text{Tb}$ ; в -  $^{169}\text{Tm}(n, n')^{165}\text{Ho}$ ; г -  $^{176}\text{Yb}(n, n')^{172}\text{Er}$ .

Як і вище, знову спостерігається гарне узгодження результатів розрахунків із TALYS 1.2 для параметрів (default), (Idmodel 2), (Idmodel 3) та (cstrip a 0.5) з нашими експериментальними даними та даними з бібліотеки оцінених ядерних даних EAF-2010.

### Висновки

Теоретично розраховано перерізи ядерних реакцій  $^{159}\text{Tb}(n, n')^{155}\text{Eu}$ ,  $^{165}\text{Ho}(n, n')^{161}\text{Tb}$ ,  $^{169}\text{Tm}(n, n')^{165}\text{Ho}$  та  $^{176}\text{Yb}(n, n')^{172}\text{Er}$  при енергіях нейтронів у діапазоні (8 - 20) MeV. Розрахунок виконано для п'яти випадків параметрів густини рівнів (Idmodel 1 - 5) з метою аналізу застосовності окремих моделей. На конкретному прикладі із чотирьох розглянутих реакцій можна зробити висновок, що в даному випадку ядерної

реакції (n, n') на елементах рідкоземельної групи доцільним є застосування узагальненої надплинної (Idmodel 2) та моделі Фермі-газу зі зворотним зміщенням (Idmodel 3) моделей густини ядерних рівнів.

При розгляді реакції з вильотом  $\alpha$ -частинки необхідно враховувати механізм її утворення, що напряму пов'язано з процесами зриву, вибивання та підхоплення, як це реалізовано в коді TALYS-1.2, та може бути тестованим користуючись параметром (cstrip).

Результати теоретичних розрахунків було порівняно з наявною експериментальною інформацією та оціненими ядерними даними ENDF/B-VII.1. Отримано оцінки для перерізів ядерних реакцій  $^{165}\text{Ho}(n, n')^{161}\text{Tb}$  -  $(30 \pm 8)$  мкб та  $^{169}\text{Tm}(n, n')^{165}\text{Ho}$  -  $(115 \pm 35)$  мкб при енергії нейтронів 14,7 MeV.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Mason D.L., Battista J.J., Barnett R.B. et al.* Ytterbium-169: Calculated physical properties of a new radiation source for brachytherapy // *Medical Physics*. - 1992. - Vol. 19, No. 3. - P. 695 - 703.
2. *Dzysiuk N., Kadenko I., Koning A.J., Yermolenko R.* Cross sections for fast-neutron interaction with Lu, Tb and Ta isotopes // *Physical Review C*. - 2010. - Vol. C81. - P. 014610-1 - 014610-8.
3. *Bramlitt E.T., Fink R.W.* Rare nuclear reactions induced by 14.7-MeV neutrons // *Physical Review*. - 1963. - Vol. 131, No. 6. - P. 2649 - 2663.
4. *Koning A.J., Hilaire S., Duijvestijn M.* TALYS-1.0, A nuclear reaction program, NRG-1755 ZG Petten, The Netherlands, 2008 // <http://www.talys.eu>
5. *Koning A.J., Delaroche J.P.* Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200 MeV // *Nuclear Physics A*. - 2003. - Vol. 713. - P. 231 - 310.
6. Cross section information storage and retrieval system (EXFOR), National Nuclear Data Center (NNDC), Brookhaven National Laboratory, USA // <http://www.nndc.bnl.gov>
7. *Qaim S.M.* A study of (n, nα) reaction cross sections at 14.7 MeV // *Nuclear Physics A*. - 1986. - Vol. 458, No. 2. - P. 237 - 245.
8. *Kalbach C.* Preequilibrium reactions with complex particle channels // *Physical Review C*. - 2005. - Vol. 71. - P. 034606-1 - 034606-23.
9. *Goriely S., Hilaire S., Koning A.J.* Improved microscopic nuclear level densities within the Hartree-Fock-Bogoliubov plus combinatorial method // *Physical Review C*. - 2008. - Vol. 78. - P. 064307-1 - 064307-14.
10. *Dzysiuk N., Kadenko A., Kadenko I., Primenko G.* Measurement and systematic study of (n, x) cross sections for dysprosium (Dy), erbium (Er), and ytterbium (Yb) isotopes at 14.7 MeV neutron energy // *Phys. Rev. C*. - 2012. - Vol. 86. - P. 034609-1 - 034609-10.

**А. А. Каденко, Н. Р. Дзисюк, И. Н. Каденко, Г. И. Применко**

**СЕЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ (n, n'α) НА ЯДРАХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЭНЕРГИИ НЕЙТРОНОВ 14,7 МэВ**

Представлены результаты анализа сечений ядерных реакций  $^{159}\text{Tb}(n, n'\alpha)^{155}\text{Eu}$ ,  $^{165}\text{Ho}(n, n'\alpha)^{161}\text{Tb}$ ,  $^{169}\text{Tm}(n, n'\alpha)^{165}\text{Ho}$  и  $^{176}\text{Yb}(n, n'\alpha)^{172}\text{Er}$  при энергии нейтронов в диапазоне (8 - 20) МэВ. Выполнено сравнение величин данных сечений с имеющейся экспериментальной информацией, оцененными ядерными данными и результатами теоретических расчетов с вариацией параметров теоретических моделей. Расчеты выполнены с применением кода TALYS-1.2.

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

**A. O. Kadenko, N. R. Dzysiuk, I. M. Kadenko, G. I. Primenko**

**CROSS SECTIONS OF (n, n'α) NUCLEAR REACTION ON REAR EARTH ELEMENTS AT 14.7 MeV NEUTRON ENERGY**

Cross sections of nuclear reactions  $^{159}\text{Tb}(n, n'\alpha)^{155}\text{Eu}$ ,  $^{165}\text{Ho}(n, n'\alpha)^{161}\text{Tb}$ ,  $^{169}\text{Tm}(n, n'\alpha)^{165}\text{Ho}$  and  $^{176}\text{Yb}(n, n'\alpha)^{172}\text{Er}$  for incident neutron energy region (8 - 20) MeV are presented. Comparison of the nuclear cross sections data with available experimental information, evaluated nuclear data and theoretical calculation results with the variation of different parameters of the theoretical models was performed. Theoretical calculations were executed with TALYS-1.2 code.

*Keywords:* cross section, activation technique, mechanism of nuclear reactions.

Надійшла 29.11.2013

Received 29.11.2013