

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

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

МЕТОД ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРОТИРІЧ
У БІБЛІОТЕКАХ ОЦІНЕНИХ ЯДЕРНИХ ДАНИХ

Новітні версії бібліотек оцінених ядерних даних (БОЯД) мають протиріччя, що стосуються даних про нейтронні перерізи. Щоб вирішити це протиріччя, ми пропонуємо метод експериментальної перевірки. Цей метод заснований на використанні фільтрованих пучків нейтронів (ФПН) і подальшому вимірюванні відповідного зразка. Основна ідея методу полягає в модифікації підходящого ФПН таким чином, щоб відмінності між нейтронними перерізами відповідно до різних БОЯД можна було виміряти. Метод демонструється на прикладі церію, який відповідно до останніх версій чотирьох БОЯД має істотно різні значення повного нейтронного перерізу.

Ключові слова: бібліотеки оцінених ядерних даних, фільтровані пучки нейтронів, чисельне моделювання, нейтронні перерізи.

Вступ

При моделюванні фільтрованого пучка нейтронів із середньою енергією 5,6 кеВ [1] ми, аналізуючи дані БОЯД у пошуках необхідного компоненту, виявили достатньо великі розбіжності між даними в повному нейтронному перерізі церію. Повний переріз ізотопу ¹⁴²Се, якого в природній суміші ізотопів 11,08 %, в діапазоні енергій 1 ÷ 2 кеВ перевищує 1000 б. Але дані бібліотек оцінених ядерних даних для цього ізотопу суттєво відрізняються. Ми проаналізували 6 останніх версій БОЯД: CENDL-3.1, ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2, JENDL-4.0, RUSFOND-2010 та TENDL-2012. Оцінені дані для ¹⁴²Се, наведені в бібліотеках JEFF-3.2 та RUSFOND-2010, є такими ж, як і в ENDF/B-VII.1, тому далі ми розглядатимемо тільки 4 БОЯД: CENDL-3.1, ENDF/B-VII.1, JENDL-4.0 та TENDL-2012 (рис. 1, табл. 1).

Згідно з ENDF/B-VII.1 та TENDL-2012 ¹⁴²Се має два сильні резонанси при енергіях ~1150 та ~1280 еВ, згідно з CENDL-3.1 та JENDL-4.0 – один резонанс при енергії ~1278 еВ. Відрізняються бібліотеки також положенням мінімумів. Так, згідно з ENDF/B-VII.1 глибокий мінімум ¹⁴²Се знаходиться при енергії 302,8 еВ (9,6 мб), згідно з CENDL-3.1 – при енергії 368,3 еВ (8,6 мб), згідно з JENDL-4.0 – при енергії 588,3 еВ (11,8 мб), а згідно з TENDL-2012 – при енергії 218,4 еВ (8,9 мб).

Відмінності в БОЯД для повного нейтронного перерізу ¹⁴²Се, на наш погляд, обумовлені тим, що на сьогодні існує лише 2 набори експериментальних даних - робота [2], виконана в 1958 р., та

робота [3], виконана в 1985 р. Однак робота [2] не містить детальних даних залежності σ_t від енергії нейтронів (діапазон усереднення значень перерізу 200 еВ, інтервал між значеннями 200 ÷ 400 еВ), у роботі [3] точність експериментальних даних в енергетичному діапазоні 700 еВ ÷ 1 кеВ дуже низька (від 10 до 100 %), тому при оцінці даних можливе використання різних варіантів оптичної моделі ядра та різних параметрів як оптичного потенціалу, так і щільності рівнів, що, звичайно, призводить до відмінностей в БОЯД. Так, наприклад, у бібліотеці ENDF/B-VII.1 використано сферичний варіант оптичного потенціалу [4], а в бібліотеці JENDL-4.0 – варіант зв'язаних каналів [5].

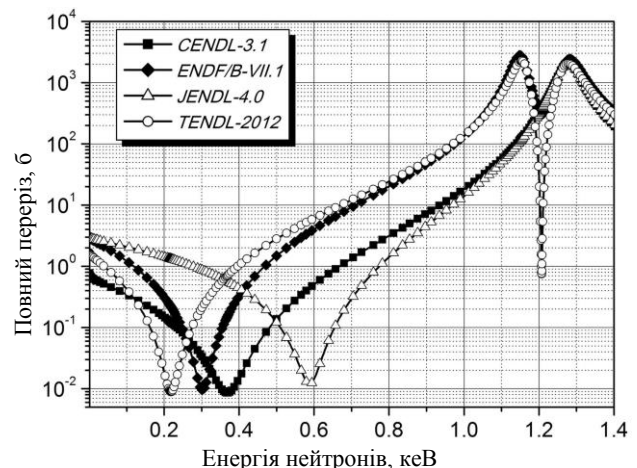


Рис. 1. Повний нейтронний переріз ¹⁴²Се згідно з різними БОЯД.

Щоб з'ясувати, яка з бібліотек ближча до істини та вирішити це протиріччя на користь однієї з БОЯД, нами пропонується метод експериментальної перевірки.

© В. А. Лібман, О. О. Грицай, С. П. Волковецький, 2016

Таблиця 1. Положення максимумів та мінімумів у повному перерізі ^{142}Ce згідно з різними БОЯД

БОЯД	CENDL-3.1	ENDF/B-VII.1	JENDL-4.0	TENDL-2012
Енергія 1-го резонансу, еВ		1 149,58		1 153,48
Переріз у 1-му резонансі, б		2 776,87		2 285,96
Енергія 2-го резонансу, еВ	1 277,64	1 281,48	1 277,00	1 279,24
Переріз у 2-му резонансі, б	2 059,5	2 413,0	2 058,1	2 061,3
Положення мінімуму, еВ	368,34	302,83	588,28	218,41
Переріз у мінімумі, мб	8,62	9,61	11,84	8,91

Суть методу

Суть методу, що пропонується, полягає в застосуванні ФПН із такими спектральними лініями, щоб усереднені за цими спектрами нейтронні перерізи давали відповідь на питання “дані якої БОЯД ближчі до істини”, і щоб їх можна було виміряти експериментально з достатньою достовірністю.

Ефективність методу буде продемонстровано на прикладі церію.

Моделювання та розрахунки

Завдяки великому перерізу ізотопу ^{142}Ce в максимумах можна припустити, що експериментальну перевірку резонансної структури перерізу в діапазоні енергій $1 \div 3$ кеВ можливо провести на природній суміші ізотопів церію або навіть на оксиді церію. Щоб перевірити це припущення, ми прорахували пропускання зразка з оксиду церію при використанні двох варіантів ФПН. Розрахунки перерізів оксиду церію CeO_2 та природного церію проводились за допомогою програми

MIXER із пакета PREPRO-2007 [6]. Для розрахунків повних нейтронних перерізів природного церію було вибрано дві БОЯД – ENDF/B-VII.1 та JENDL-4.0, бо лише в них є дані для всіх чотирьох ізотопів цезію. Розповсюдженість ізотопів цезію у природній суміші взято з [7]:

^{136}Ce	^{138}Ce	^{140}Ce	^{142}Ce
0,185 %	0,251 %	88,450 %	11,114 %

На рис. 2 зображено повні нейтронні перерізи природної суміші ізотопів церію в діапазоні енергій $0,4 \div 3,2$ кеВ, порашовані за даними ENDF/B-VII.1 та JENDL-4.0.

Базовим фільтром було вибрано скандієво-нікелевий фільтр (ФПН-2к), що дає змогу отримати ФПН з середньою енергією ~ 2 кеВ. Другий варіант ФПН, для якого було проведено розрахунки пропускань, формувався на основі базового фільтра, але модифікованого марганцем (ФПН-2кMn). Для розрахунків спектрів нейтронів після цих фільтрів використовувалась програма Filter-7 [8]. Розраховані спектри ФПН представлені на рис. 2 світло-сірими трикутниками.

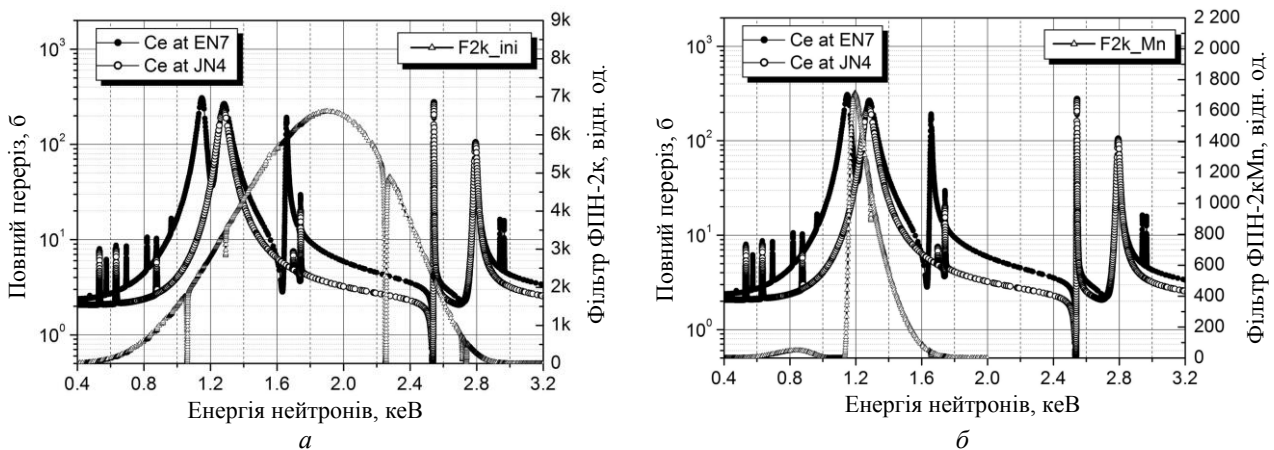


Рис. 2. Повний нейтронний переріз природного церію, розрахований за даними ENDF/B-VII.1 та JENDL-4.0, та основні нейтронні лінії ФПН-2к (а) та ФПН-2кMn (б).

Як видно з рис. 2, навіть для природної суміші ізотопів церію різниця між резонансними структурами перерізів у цих двох БОЯД достатньо значна, найбільша відмінність спостерігається на лівому краю нейтронної лінії ФПН-2к. Ми також перевірили, що спектри ФПН та усереднені за цими спектрами перерізи ^{140}Ce , розраховані за

даними бібліотек ENDF/B-VII.1 та JENDL-4.0, збігаються.

Ми «пропустили» змодельований ФПН-2к крізь зразок оксиду природного церію завтовшки $4,38$ г/см 2 ($3,56$ г/см 2 по церію), використавши повні нейтронні перерізи, розраховані за даними ENDF/B-VII.1 та JENDL-4.0. Одержані пропус-

кання становлять 0,6985 для ENDF/B-VII.1 та 0,7716 для JENDL-4.0, тобто різниця $\sim 10,5\%$ (рис. 3, а). Таку різницю можна помітити експериментально, бо вимірювання пропускання виконується з точністю не гірше 2%.

Для підвищення достовірності ми модифікували ФПН-2к марганцем (див. рис. 2, б). За нашими припущеннями для цього варіанта фільтра

(ФПН-2кMn) різниця в пропусканнях повинна бути більшою, бо на ширину нейтронної лінії цього варіанта ФПН попадає тільки один резонанс. Розрахункові пропускання становили 0,3856 для ENDF/B-VII.1 та 0,4778 для JENDL-4.0, тобто різниця в пропусканнях $\sim 24\%$ (див. рис. 3, б).

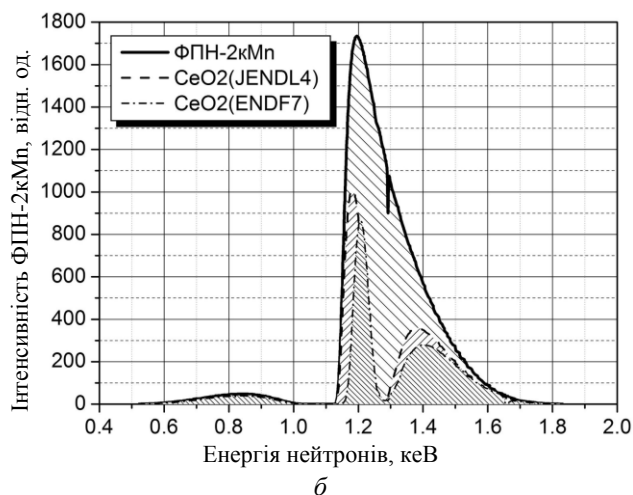
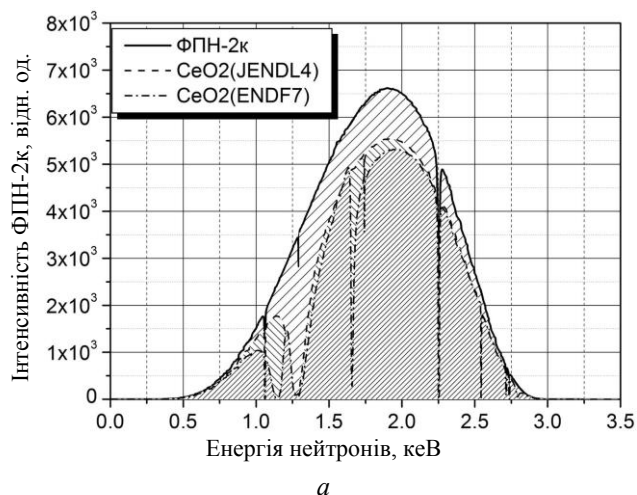


Рис. 3. Спектри нейтронів ФПН-2к та ФПН-2кMn, «пропущені» крізь $4,4 \text{ г/см}^2 \text{ CeO}_2$ (суцільна лінія – спектри після фільтрів, штрихова та штрих-пунктирна – спектри після проходження зразка при розрахунках за даними JENDL-4.0 та ENDF/B-VII.1 відповідно).

Результати розрахунків та обговорення

Зрозуміло, що завдання виміряти пропускання зразка з точністю краще 20% не викличе проблем. Оскільки обидва варіанти ФПН є низькоенергетичними, вимірювання планується провести за допомогою нейтронного спектрометра з ^3He -лічильником. Урахування ефективності реєстрації нейтронів ^3He -лічильником (урахування

перерізу реакції (n, p) на ^3He) майже не змінило різницю в пропусканнях для ФПН-2к (10,6% замість 10,5%), але ця різниця відчутно зросла для ФПН-2кMn (з 23,9 до 29,7%). Розрахунки пропускань виконувалися за допомогою програмного пакета ORIGIN шляхом інтегрування площі під основною лінією прямого пучка та пучка, що пройшов крізь зразок оксиду церію. Результати розрахунків зведено в табл. 2).

Таблиця 2. Результати розрахунків пропускання CeO_2 на різних варіантах фільтра

Фільтр	БОЯД	Пропускання Г	Різниця
ФПН-2к	JENDL-4.0	0,7716	
	ENDF/B-VII.1	0,6985	10,5%
ФПН-2к	JENDL-4.0	0,7719	
з урахуванням $\sigma(^3\text{He})$	ENDF/B-VII.1	0,6977	10,6%
ФПН-2кMn	JENDL-4.0	0,4778	
	ENDF/B-VII.1	0,3856	23,9%
ФПН-2кMn	JENDL-4.0	0,4428	
з урахуванням $\sigma(^3\text{He})$	ENDF/B-VII.1	0,3413	29,7%

Як видно з таблиці, використання модифікованого фільтра дозволяє з високою достовірністю відповісти на питання, в якій БОЯД резонансна структура перерізу ізоотопу ^{142}Ce є вірною. Однак слід зазначити, що недоліком ФПН-2кMn є суттєво нижча щільність потоку нейтронів по відношенню до ФПН-2к, що вимагатиме більшого часу на вимірювання.

Експериментальна перевірка методу (перші результати)

У березні 2015 р., коли реактор нарешті запрацював, ми виготовили фільтр ФПН-2кMn, установили його у 2-й горизонтальний канал реактора ВВР-М та провели першу серію вимірювань пропускання зразків оксиду церію.

Зразки оксиду церію

Із порошку оксиду церію марки ЦО-1 було виготовлено 2 зразки в контейнерах із сплаву САВ-1Т. Сумарна товщина донечь контейнерів

0,8 та 0,9 мм відповідно. Внутрішній діаметр контейнерів 28 мм, товщина засипки 11,6 та 17,7 мм. Детальні характеристики зразків наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Параметри зразків оксиду церію

Маркування	Маса, г	Діаметр, мм	Товщина, мм	Об'єм, см ³	Густина, г/см ³	Площа, см ²	Концентрація, г/см ²
Ce1	10,06	28,00	11,60	7,14	1,41	6,16	1,634
Ce2	15,54	28,00	17,70	10,90	1,43	6,16	2,524

Процедура вимірювань

Із цими зразками ми провели 100 стандартних серій вимірювань. Склад серії: прямий пучок (DB); пучок, перекритий поліетиленом (PE); пучок, перекритий зразком Ce1 (Ce1); пучок, перекритий зразком Ce1 та поліетиленом (Ce1P); пучок, перекритий зразком Ce2 (Ce2); пучок, перекритий зразком Ce2 та поліетиленом (Ce2P); пучок,

перекритий зразками Ce1 та Ce2 (Ce12); пучок, перекритий зразками Ce1, Ce2 та поліетиленом (Ce12P). Тобто в умовних позначеннях програми вимірювань одна серія виглядала так: DB PE Ce1 Ce1P Ce2 Ce2P Ce12 Ce12P або в кодах РУР (регістр управління реле, який відповідає за переміщення зразків) – 0 1 2 3 4 5 6 7. Схему експерименту наведено на рис. 4.

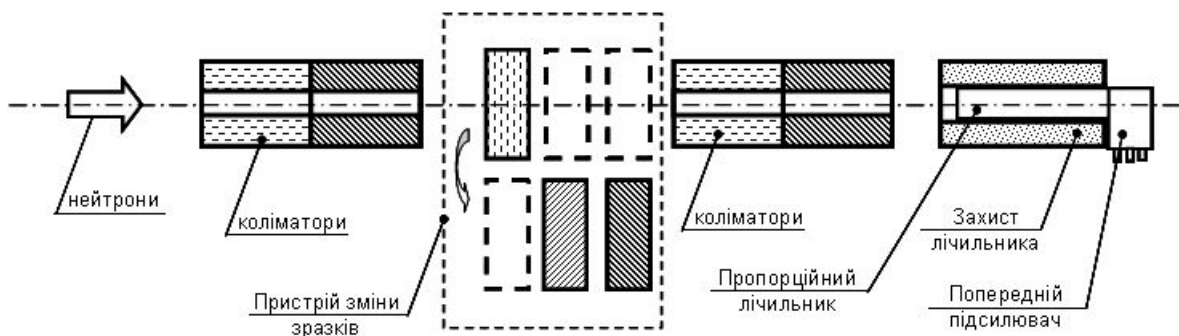


Рис. 4. Схема експерименту.

Час вимірювання однієї позиції 55 с, час зміни зразків 5 с. Процедура вимірювання серіями дозволила нам відмовитись від монітора потоку нейтронів, бо короткострокові коливання потужності реактора або разові збої апаратури не дадуть суттєвого внеску в загальну статистику, а довгострокові зміни дадуть внесок в усі вимірювання в межах серії. Середня кількість серій (циклів) в одному вимірюванні 20.

Нейтронні спектри вимірювалися спектрометром на базі ³He-лічильника LND-2527. До складу спектрометра входили також зарядово-чутливий попередній підсилювач ПУВ, спектрометричний підсилювач БУИ-3К та власне спектрометр, зібраний з окремих блоків у крейті КАМАК. Склад спектрометра: блок АЦП польського виробництва марки 712, блок РУР, блок керування пам'яттю типу 157.2, блок інкрементної пам'яті типу 154.03 та блок контролера типу КК, через який крейт зв'язувався з персональним комп'ютером (ПК) типу 386DX40. ПК здійснював керування вимірюваннями за допомогою програми ZV1m_6h, розробленої В. Зеркіним.

Режими апаратури: високовольтне живлення ³He-лічильника здійснювалось від блока БНВ-31, HV = 2,3 кВ; коефіцієнт підсилювання БУИ-3К – $k = 1 \cdot 100 \cdot 0,5$, постійна формування фронту $\tau_{fr} = 1$ мкс. Пізніше ми дослідили вплив постійної фронту на якість спектрів і в подальшому плануємо використовувати $\tau_{fr} = 2$ мкс. Ми також прийшли до висновку, що для лічильника LND-2527 краще використовувати HV = 2,1 кВ, що менше спотворює спектри.

Обробка результатів вимірювань

Накопичені спектри оброблялися за такою процедурою: спочатку в усі спектри вводилася поправка на мертвий час; на наступному етапі спектри відповідних позицій зразків склалися; далі від спектрів, накопичених без перекриття поліетиленом, поканално віднімалися спектри, накопичені з перекриттям поліетиленом, тобто віднімався зовнішній фон.

Подальша обробка виконувалася за сумою нейтронної частини спектра, за якою розрахову-

валося пропускання кожного зразка та їхні суми $T_S(\text{Ce1})$, $T_S(\text{Ce2})$, $T_S(\text{Ce12})$.

Одержані значення пропускань порівнювали з пропусканнями цих зразків, розрахованими за даними БОЯД ENDF/B-VII.1 та JENDL-4.0 за допомогою програми Filter7.1. Метод розрахунку був таким: розраховувалися нейтронні спектри базового фільтра ФПН-2кМп та базового фільтра

з додаванням матеріалу зразків Ce1, Ce2 та Ce1+Ce2. Такі розрахунки було виконано за даними обох бібліотек (рис. 5). Далі, за допомогою програмного пакета ORIGIN, розраховувалися суми спектрів за двома діапазонами: діапазоном основної лінії $\sim 1,2$ кеВ та всім спектром. За одержаними сумами розраховувались вищезгадані пропускання.

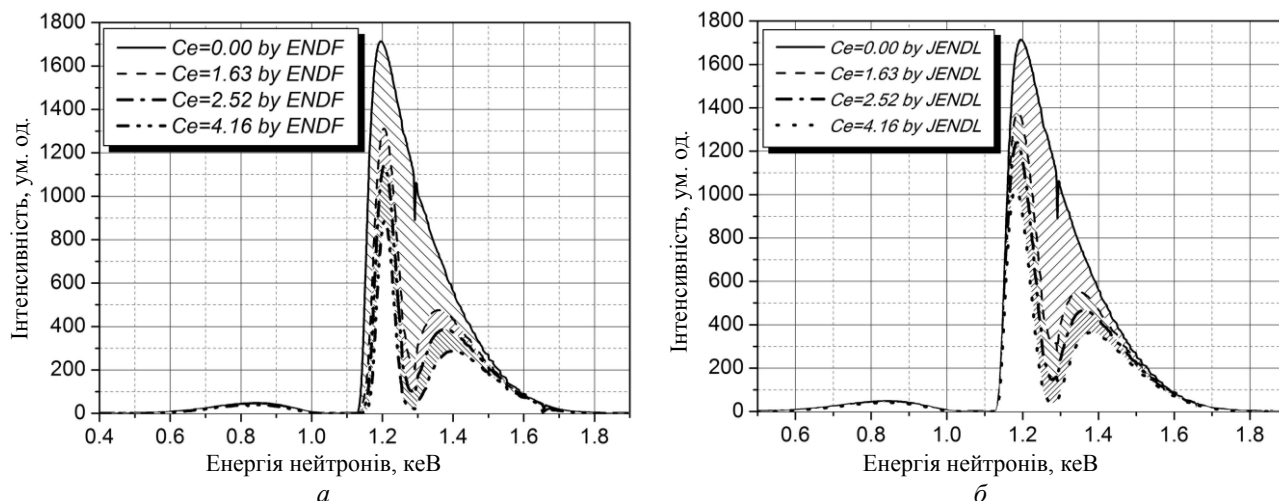


Рис. 5. Спектри фільтра ФПН-2кМп (діапазон основної лінії), розраховані за даними ENDF/B-VII.1 (а) та JENDL-4.0 (б).

Усі розраховані та виміряні пропускання зведено в табл. 4, а також, для полегшення порівняння, показано на рис. 6.

Таблиця 4. Пропускання зразків оксиду церію за результатами вимірювань та за даними БОЯД

Зразок	T	ΔT	δT	T(JENDL)	T(ENDF)
Ce1	0,6931	0,0131	1,89 %	0,6781	0,5898
Ce2	0,5981	0,0125	2,10 %	0,5726	0,4708
Ce1+2	0,4683	0,0094	2,02 %	0,4407	0,3339

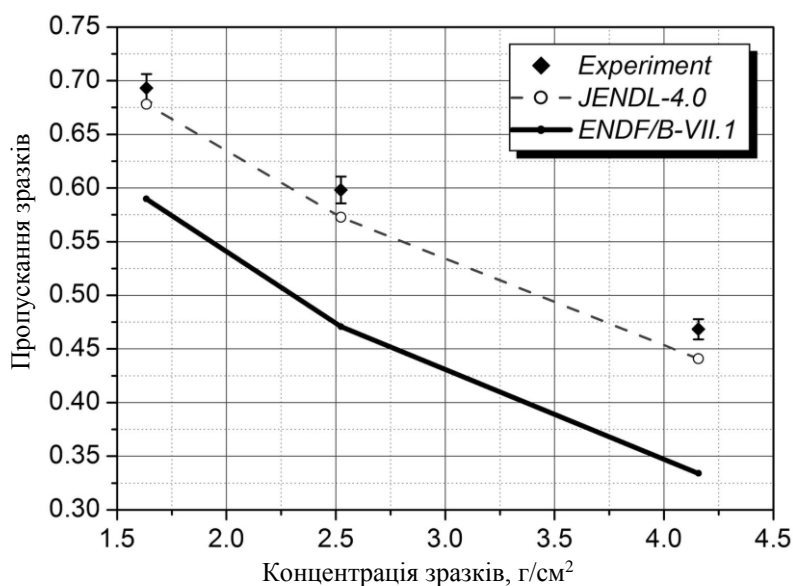


Рис. 6. Експериментальне пропускання зразків оксиду церію за результатами вимірювань та розраховане за даними БОЯД.

Висновки

За результатами перших вимірювань можна зробити попередні висновки: запропонований

метод можна вважати дієвим; дані БОЯД JENDL-4.0 ближче до «істини» (тобто до експериментальних результатів), ніж дані ENDF/B-VII.1.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лібман В.А., Грицай О.О., Волковецький С.П. Моделювання нового нейтронного фільтра з енергією 5,6 кеВ // Ядерна фізика та енергетика. - 2015. - Т. 16, № 1. - С. 85 - 89.
2. Newson H.W., Block R.C., Nichols P.F. s- and p-wave neutron spectroscopy. Part II. Even-even nuclei // Annals of Physics. - 1959. - Vol. 8. - P. 211 - 222.
3. Ohkubo M. et al. Proc. Int. Conf. on Nucl. Data for Basic and Applied Science. - Santa-Fe, New Mexico, 1985. - Vol. 2. - P. 1623.
4. URL: http://ukrnc.kinr.kiev.ua/!!!site_ukrnc/DATA/ENDF-7_1/058_Ce_142
5. URL: http://ukrnc.kinr.kiev.ua/!!!site_ukrnc/DATA/JENDL-4.0/058_Ce_142
6. URL: <https://www-nds.iaea.org/public/endl/prepro2007>
7. URL: <http://www.nndc.bnl.gov/wallet/wc8.html>
8. Gritzay O.O., Vakulenko M.M. Development of the code for filter calculation // Proc. of the 4-th Int. Conf. "Current Problems of Nuclear Physics and Atomic Energy" (Kyiv, 3 - 7 Sept. 2012). - Kyiv, 2013. - P. 426 - 429.

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

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

**МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРОТИВОРЕЧИЙ
В БИБЛИОТЕКАХ ОЦЕНЕННЫХ ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ**

В новейших версиях библиотек оцененных ядерных данных (БОЯД) содержатся противоречия о ходе нейтронных сечений. Для разрешения этих противоречий нами предлагается метод экспериментальной проверки. Метод основан на использовании фильтрованных пучков нейтронов с последующим измерением соответствующих образцов. Основная идея метода состоит в модификации подходящего фильтрованного пучка нейтронов таким образом, чтобы отличия нейтронных сечений по данным различных БОЯД можно было измерить. Метод демонстрируется на примере церия, который в соответствии с последними версиями четырех БОЯД имеет существенно различные значения полного сечения взаимодействия нейтронов с этим ядром.

Ключевые слова: библиотеки оцененных ядерных данных, фильтрованные пучки нейтронов, численное моделирование, сечения взаимодействия нейтронов.

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

Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

**METHODS OF EXPERIMENTAL SETTLEMENT OF CONTRADICTIONING DATA
IN EVALUATED NUCLEAR DATA LIBRARIES**

The latest versions of the evaluated nuclear data libraries (ENDLs) have contradictions concerning data about neutron cross sections. To resolve this contradiction we propose the method of experimental verification. This method is based on using of the filtered neutron beams and following measurement of appropriate samples. The basic idea of the method is to modify the suited filtered neutron beam so that the differences between the neutron cross sections in accordance with different ENLs become measurable. Demonstration of the method is given by the example of cerium, which according to the latest versions of four ENLs has significantly different total neutron cross section.

Keywords: evaluated nuclear data libraries, filtered neutron beams, numerical simulation, neutron cross section.

REFERENCES

1. Libman V.A., Grytsai O.O., Volkovets'kyi S.P. // Yaderna fizyka ta enerhytyka (Nucl. Phys. At. Energy). - 2015. - Vol. 16, No. 1. - P. 85 - 89. (Ukr)
2. Newson H.W., Block R.C., Nichols P.F. s- and p-wave neutron spectroscopy. Part II. Even-even nuclei // Annals of Physics. - 1959. - Vol. 8. - P. 211 - 222.
3. Ohkubo M. et al. Proc. Int. Conf. on Nucl. Data for Basic and Applied Science. - Santa-Fe, New Mexico, 1985. - Vol. 2. - P. 1623.
4. URL: http://ukrnc.kinr.kiev.ua/!!!site_ukrnc/DATA/ENDF-7_1/058_Ce_142
5. URL: http://ukrnc.kinr.kiev.ua/!!!site_ukrnc/DATA/JENDL-4.0/058_Ce_142
6. URL: <https://www-nds.iaea.org/public/endl/prepro2007>
7. URL: <http://www.nndc.bnl.gov/wallet/wc8.html>
8. Gritzay O.O., Vakulenko M.M. Development of the code for filter calculation // Proc.s of the 4-th Int. Conf. "Current Problems of Nuclear Physics and Atomic Energy" (Kyiv, 3 - 7 Sept., 2012). - Kyiv, 2013. - P. 426 - 429.

Надійшла 17.03.2016

Received 17.03.2016