

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

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

## МОДЕЛЮВАННЯ НОВОГО НЕЙТРОННОГО ФІЛЬТРА З ЕНЕРГІЄЮ 5,6 кеВ

На основі останніх версій бібліотек оцінених ядерних даних (БОЯД) (ENDF/B-VII.1 та CENDL-3.1) змодельовано новий інтерференційний нейтронний фільтр із середньою енергією 5,6 кеВ. Основні компоненти фільтра:  $^{60}\text{Ni}$ , марганець, сірка та оксид церію. Очікувані характеристики фільтра: середня енергія 5,62 кеВ, ширина нейтронної лінії 1,73 кеВ, чистота основної лінії 84 %, щільність потоку нейтронів  $2 \cdot 10^5$  н/(с·см<sup>2</sup>). Експериментальна перевірка параметрів нового фільтра планується під час наступної кампанії роботи реактора ВВР-М.

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

## Вступ

До моделювання фільтра з середньою енергією 5,6 кеВ нас спонукали деякі обставини. Відомо, що діапазон енергій від 0,2 до 10 кеВ є діапазоном розділених резонансів, і тому чим детальніше ми зможемо дослідити цей діапазон, тим більше інформації про структуру атомних ядер можна здобути. У нашому відділі (відділ нейтронної фізики) цей діапазон перекривався фільтрами 1,9; 2,0; 3,4 та 7,4 кеВ, і дуже бажано додати в цей діапазон ще хоча б одну енергію. Моделювання цього фільтра виконувалося за допомогою програми *Filter*, версія 7 [1].

## Вибір основних компонентів фільтра

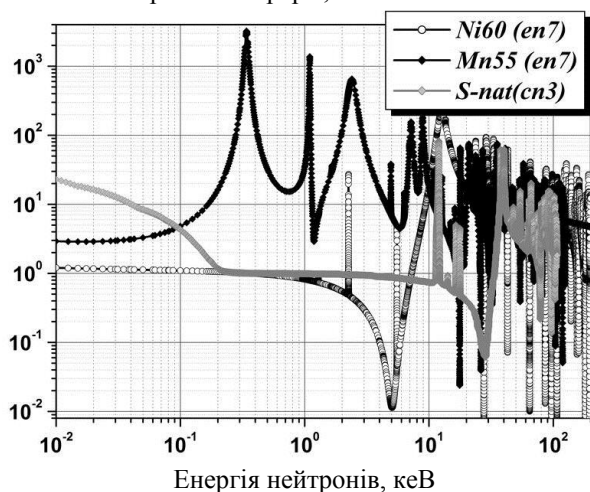
В основу цього фільтра було взято природний марганець та ізоотоп  $^{60}\text{Ni}$ . Якщо детально розглянути повні нейтронні перерізи цих матеріалів (рис. 1), можна побачити досить глибокий (при-

близно до 10 мб) інтерференційний мінімум в  $^{60}\text{Ni}$  при енергії 4,9 кеВ, але крім цього мінімуму у  $^{60}\text{Ni}$  є ще багато мінімумів - при енергіях 28, 43, 65, 86, 97, 107 тощо.

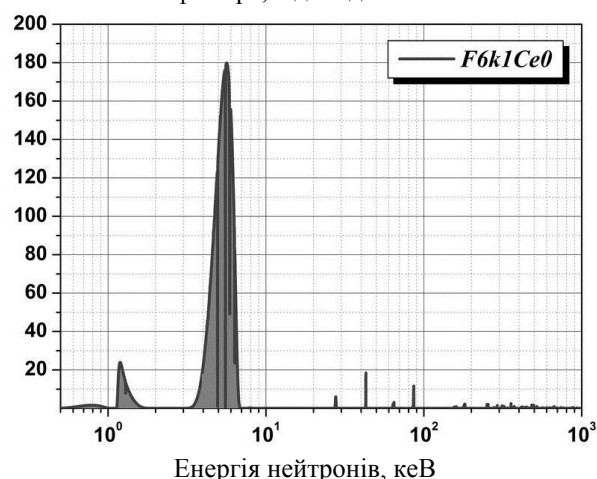
З цього рисунка видно, що більшість цих мінімумів може суттєво подавити невеликий ( $\sim 15$  г/см<sup>2</sup>) додаток марганцю (лінії 28, 43, 65 та 86 кеВ). А лінії з енергіями від 90 до 200 кеВ досить ефективно подавить сірка ( $\sim 38$  г/см<sup>2</sup>).

Оскільки всі ці компоненти мають невеликий переріз для теплових та епітеплових нейтронів, а також щоб запобігти активації компонентів (особливо марганцю), до складу фільтра необхідно додати  $^{10}\text{B}$ , що має великий переріз для теплових нейтронів та залежність перерізу від енергії нейтронів типу  $1/E^{1/2}$ . Таким чином, ці чотири компоненти дають змогу сформувавши попередній варіант фільтра з середньою енергією  $\sim 5,6$  кеВ (рис. 2).

Повний нейтронний переріз, б

Рис. 1. Повні нейтронні перерізи  $^{60}\text{Ni}$ , марганцю та сірки (ENDF/B-VII.1).

Інтенсивність фільтра, відн. од.

Рис. 2. Перший варіант фільтра з енергією  $\sim 6$  кеВ.

На рис. 3 показано основну лінію фільтра із середньою енергією 5,6 кеВ більш детально.

Розрахункові параметри фільтра: середня енергія основної лінії 5,6 кеВ, напівширина 1,7 кеВ, відносна чистота 81 %, очікувана щільність потоку нейтронів  $3,6 \cdot 10^5$  н/(см<sup>2</sup>·с). Параметри до-

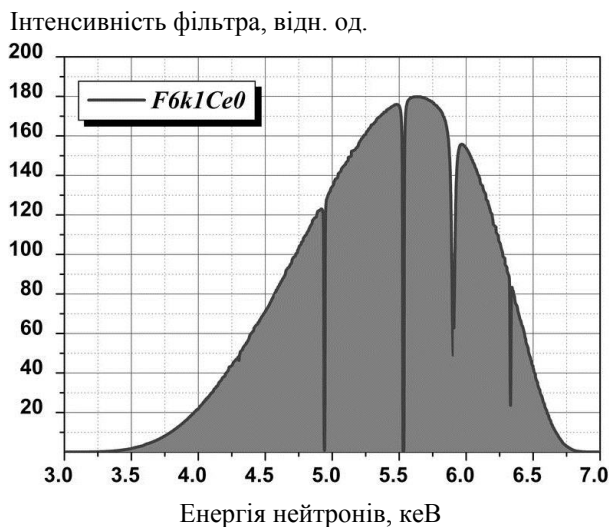


Рис. 3. Основна лінія фільтра.

мішкових ліній та їхній внесок у сумарний потік наведено в табл. 1.

Головним недоліком цього варіанта фільтра є наявність домішкових ліній, найбільш небажаними з яких є лінії 0,8 та 1,2 кеВ (рис. 4).

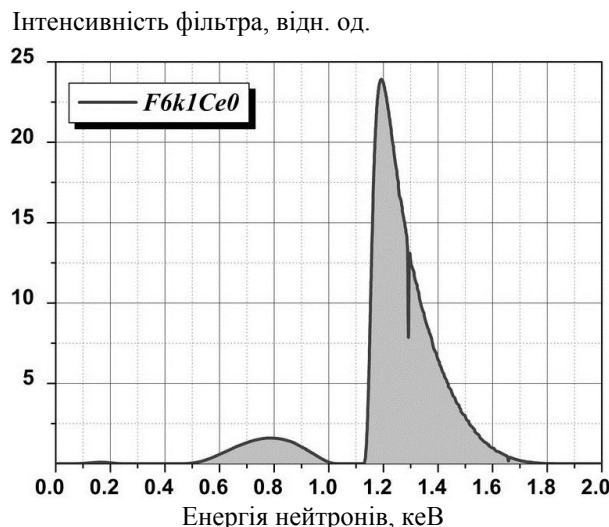


Рис. 4. Низькоенергетичні домішкові лінії.

Таблиця 1. Параметри домішкових ліній

Енергія домішкової лінії, кеВ	Напівширина, кеВ	Внесок, %
0,8 + 1,2	0,15	1,37
27,7	0,31	0,53
42,9	0,05	0,34
64,5	1,14	0,21
86,3	0,42	1,91
130÷1900		14,32

Головна небезпека наявності цих ліній в тому, що, оскільки залежність перерізу від енергії має характер  $1/v$ , то навіть невелика домішка нейтронів низьких енергій може призвести до значної похибки у визначенні перерізу. Відзначимо, що при вимірюванні повного нейтронного перерізу методом пропускання з використанням водневого лічильника внесок цих ліній, так само як і більш жорстких домішок, можна врахувати. Однак у діапазоні енергій нейтронів нижче 10 кеВ водневі лічильники працюють «невпевнено» через чутливість їх до гамма-випромінювання, а на гелієвому лічильнику розділити вклади ліній 1,2 та 5,6 кеВ неможливо. Для визначення перерізу активації такі домішки взагалі неприпустимі, бо внесуть дуже великі похибки через залежність  $1/v$ . Саме тому було розпочато пошук шляхів покращення цього фільтра, у першу чергу намагаючись позбутися домішкових ліній 0,8 та 1,2 кеВ.

### Боротьба з низькоенергетичними домішками та протиріччя БОЯД

Аналіз даних БОЯД допоміг знайти компоненту, що має великий переріз для нейтронів з енергією близько 1 кеВ, – це церій. Повний переріз ізотопу <sup>142</sup>Ce (його в природній суміші ізотопів 11,08 %) для цього діапазону енергій перевищує 1000 б. Але дані чотирьох найновіших бібліотек (ENDF/B-VII.1; JENDL-4.0; JEFF-3.2 та CENDL-3.1) для цього ізотопу суттєво відрізняються. Оскільки для цього ізотопу дані в JEFF-3.2 взято з ENDF/B-VII.1, надалі порівнюються дані тільки трьох БОЯД: ENDF/B-VII.1; JENDL-4.0 та CENDL-3.1 (рис. 5).

Як бачимо, згідно з ENDF/B-VII.1 <sup>142</sup>Ce має два сильні резонанси при енергіях 1150 та 1281,5 еВ, а 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 <sup>142</sup>Ce 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).

Для моделювання наступного варіанта фільтра ми вибрали дві БОЯД – ENDF/B-VII.1 та CENDL-3.1, бо тільки в них були дані для всіх чотирьох ізотопів церію і ми змогли програмою MIXER з пакета PREPRO-2007 [2] одержати переріз для природного церію. Додавання  $\sim 12$  г/см<sup>2</sup> природного церію у склад фільтра суттєво зменшило внесок низькоенергетичних ліній, хоч зменшило і щільність потоку нейтронів майже в півтора раза (рис. 6 і 7).

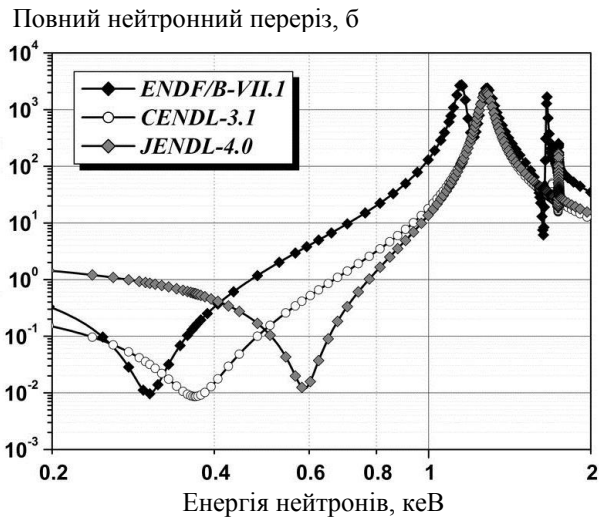


Рис. 5. Повний нейтронний переріз  $^{142}\text{Ce}$  з різних БОЯД.

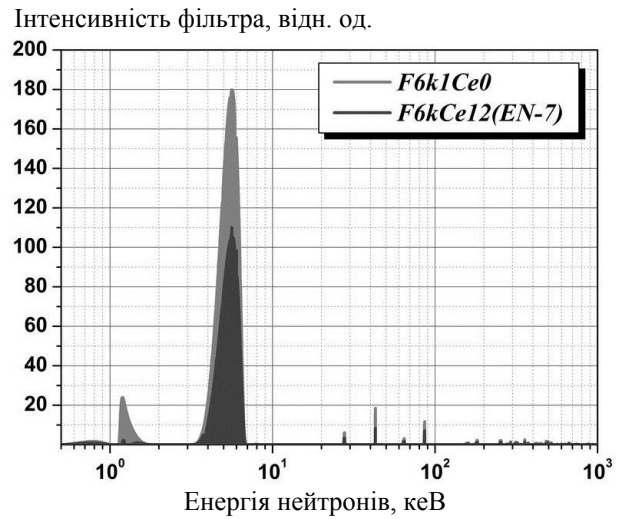


Рис. 6. Вплив церію на спектр фільтра.

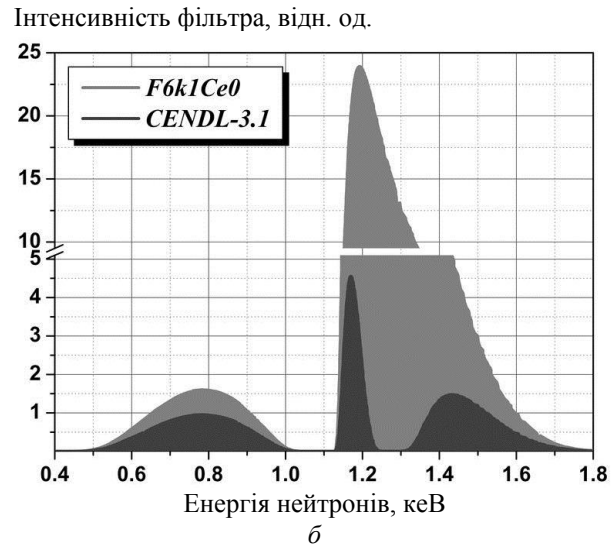
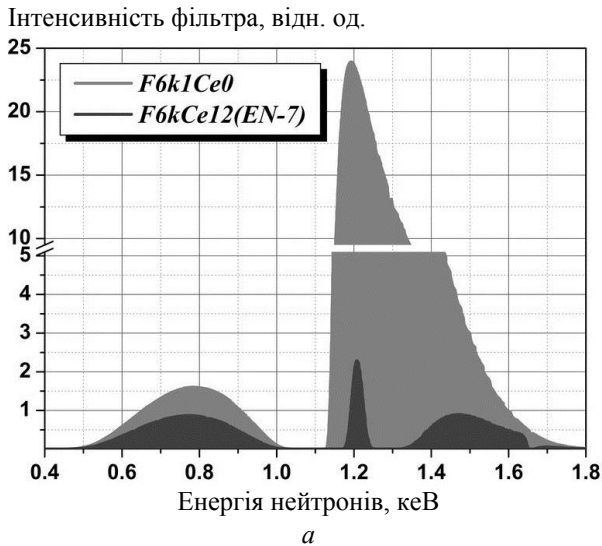


Рис. 7. Порівняння впливу церію на низькоенергетичну домішку спектра: *a* – згідно з ENDF/B-VII.1; *б* – згідно з CENDL-3.1.

Порівнюючи нижні частини рис. 7, можна побачити, що згідно з розрахунком за даними ENDF/B-VII.1 церій майже вдвічі сильніше давить домішкову лінію поблизу енергії 1,2 кеВ, ніж згідно з даними CENDL-3.1.

Які ж дані ближчі до істини? Оскільки розраховані за цими двома бібліотеками спектри відрізняються переважно тільки цими домішковими лініями, нами пропонується один із варіантів перевірки за допомогою вимірювань на залізі. На рис. 8 разом з лініями фільтра, що різняться, показаний переріз активації заліза згідно з даними BROND-2.2. Резонанс заліза при енергії ~1,15 кеВ частково перекриває лінію 1,2 кеВ, яка повинна виникати за версією CENDL-3.1 і майже не перекриває ту ж саму лінію за версією ENDF/B-VII.1. Порівняння експериментально одержаного значення перерізу активації заліза з розрахованими значеннями, усередненими по

обох варіантах спектрів фільтра (за допомогою програми GROUPEE з пакета PREPRO-2007 [2]), може дозволити вирішити питання на користь однієї з бібліотек.

Перерізи активації заліза, усереднені по спектрах фільтра, розрахованих із використанням CENDL-3.1 та ENDF/B-VII.1, різняться приблизно на 20 %, тобто на величину, яку можна перевірити на експерименті.

### Оцінка щільності потоку нейтронів на виході фільтра

Оцінка щільності потоку нейтронів проводилась таким чином: спектр нейтронів реактора моделювався набором із трьох функцій –  $\Phi_{th}(E_n) + \Phi_{res}(E_n) + \Phi_{fis}(E_n)$ . Ця модель нейтронного спектра реактора досить близька до нейтронного спектра на виході з активної зони реактора типу ВВР-М.

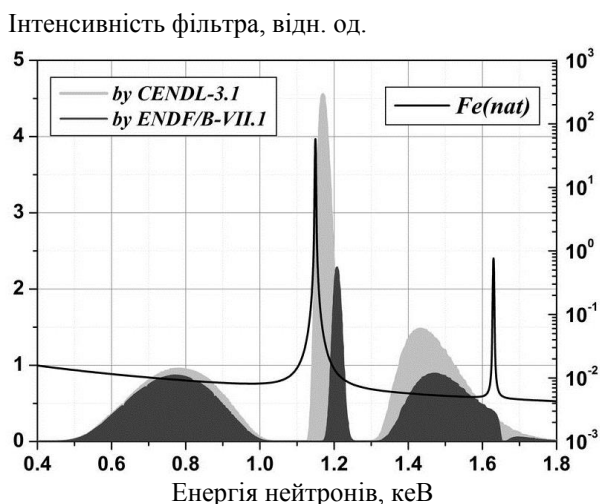


Рис. 8. Домішкові лінії фільтра поблизу 1,2 кеВ за версіями CENDL-3.1 та ENDF/B-VII.1, а також переріз активації заліза згідно з BROND-2.2.

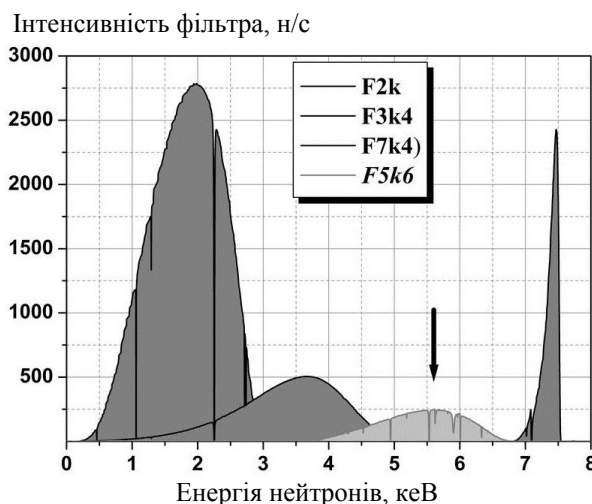


Рис. 9. Місце нового фільтра в наборі існуючих у діапазоні до 10 кеВ.

Тут:  $\Phi_{th}(E_n)$  – розподіл Максвелла в діапазоні енергій від 0 до 4 кТ ( $kT = 0,0253 \text{ eV} \equiv 300K$ );  $\Phi_{res}(E_n)$  – розподіл  $1/E_n$  в діапазоні енергій від 4 кТ до 67 кеВ;  $\Phi_{fis}(E_n)$  – розподіл поділу в діапазоні енергій від 67 кеВ до 20 МеВ.

Площа під спектром нормувалася на  $10^9 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{с})$ , вихідні значення інтенсивності фільтрованих нейтронів (фактично у відносних одиницях) порівнювались з аналогічними результатами розрахунків для фільтрованих пучків, інтенсивність яких була відома з експерименту. Така методика застосовувалась нами і раніше, і експериментальна перевірка показала, що відмінність

між попередньо оціненою інтенсивністю і визначеною надалі експериментально лежить у межах декількох одиниць одного порядку.

### Остаточний варіант фільтра

У табл. 2 наведено склад та розраховані параметри варіантів фільтра згідно з даними цих двох БОЯД. Експериментальна перевірка параметрів нового фільтра планується на наступному етапі (під час наступної кампанії роботи реактора ВВР-М). На рис. 9 показано спектр нового фільтра в порівнянні з існуючими.

Таблиця 2. Склад та параметри розрахованих варіантів фільтра

Нуклід (БОЯД)	$^{10}\text{B}$ , г/см <sup>2</sup> (en7)	$^{10}\text{B}$ , г/см <sup>2</sup> (en7)	$^{60}\text{Ni}$ , г/см <sup>2</sup> (jn4)	S, г/см <sup>2</sup> (en6)	Mn, г/см <sup>2</sup> (jn4)	Al, г/см <sup>2</sup> (en7)	$^{16}\text{O}$ , г/см <sup>2</sup> (jn3)	Ce, г/см <sup>2</sup>	Середня енергія, кеВ	Напіширина, кеВ	«Чистота», %	Щільність потоку, н/(см <sup>2</sup> ·с)
Без Ce	3,10	0,545	213,21	54,00	14,84	0,54	0	0	5,63	1,68	80,9	$3,6 \cdot 10^5$
+ Ce по ENDF/B-VII.1									5,62	1,73	83,9	$2,0 \cdot 10^5$
+ Ce по CENDL-3.1							2,79	12,21	5,62	1,74	84,0	$2,0 \cdot 10^5$

Примітка. en7 = ENDF/B-VII.1; en6 = ENDF/B-VI; jn4 = JENDL-4.0; jn3 = JENDL-3.3

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. <http://ukrncd.kinr.kiev.ua/FILTER-7.html>
2. <https://www-nds.iaea.org/public/endl/prepro2007/>

**В. А. Либман, Е. А. Грицай, С. П. Волковецкий**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВОГО НЕЙТРОННОГО ФИЛЬТРА С ЭНЕРГИЕЙ 5,6 кэВ**

На основе последних версий библиотеки оцененных ядерных данных (ENDF/B-VII.1 и CENDL-3.1) смоделирован новый интерференционный нейтронный фильтр со средней энергией 5,6 кэВ. Основные компоненты фильтра:  $^{60}\text{Ni}$ , марганец, сера и оксид церия. Ожидаемые характеристики фильтра: средняя энергия 5,62 кэВ, полуширина нейтронной линии 1,73 кэВ, чистота основной линии 84 %, плотность потока нейтронов  $2 \cdot 10^5$  н/(с·см<sup>2</sup>). Экспериментальная проверка параметров нового фильтра планируется во время ближайшей кампании работы реактора ВВР-М.

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

**V. A. Libman, O. O. Gritzay, S. P. Volkovetsky**

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

### **MODELING OF THE NEW NEUTRON FILTER WITH 5.6 keV ENERGY**

New filtered neutron beam with the average energy of 5.6 keV was simulated using the latest versions of the evaluated nuclear data libraries ENDF/B-VII.1 and CENDL-3.1. The main components of this new filter are:  $^{60}\text{Ni}$ , manganese, sulfur, and cerium oxide. Expected filter characteristics are: the average energy is 5.62 keV; neutron line width at half maximum is 1.73 keV; the purity of the main line is 84 %; the neutron flux is  $2 \cdot 10^5$  n/(s·cm<sup>2</sup>). Experimental testing of the parameters of this new filter will be produced during the next campaign of the reactor WWR-M.

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

Надійшла 03.12.2014

Received 03.12.2014