

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}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 $2 \cdot 10^5 \text{ н}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$. 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

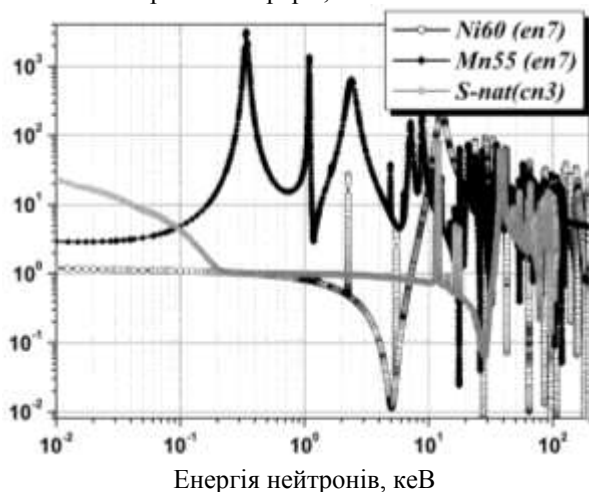
В основу цього фільтра було взято природний марганець та ізоотоп ^{60}Ni . Якщо детально розглянути повні нейтронні перерізи цих матеріалів (рис. 1), можна побачити досить глибокий (при-

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

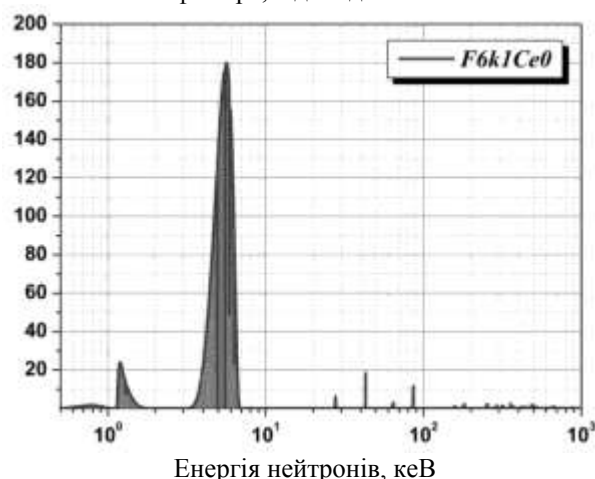
З цього рисунка видно, що більшість цих мінімумів може суттєво подавити невеликий ($\sim 15 \text{ г}/\text{см}^2$) додаток марганцю (лінії 28, 43, 65 та 86 кеВ). А лінії з енергіями від 90 до 200 кеВ досить ефективно подавить сірка ($\sim 38 \text{ г}/\text{см}^2$).

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}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 сформуванню попередній варіант фільтра з середньою енергією $\sim 5,6 \text{ кеВ}$ (рис. 2).

Повний нейтронний переріз, б

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

Інтенсивність фільтра, відн. од.

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

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/(см²·с). Параметри до-

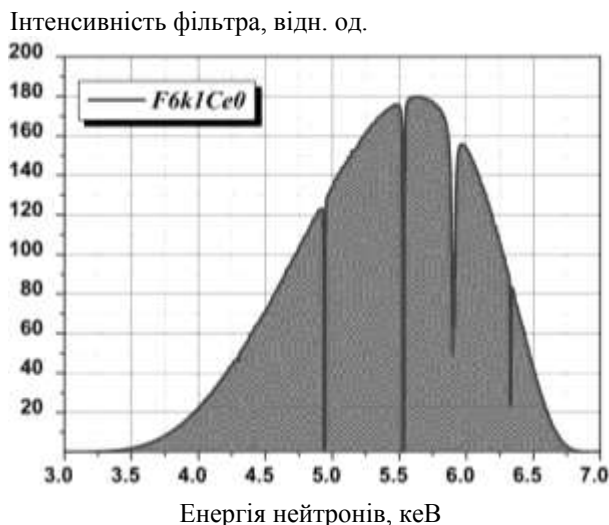


Рис. 3. Основна лінія фільтра.

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).

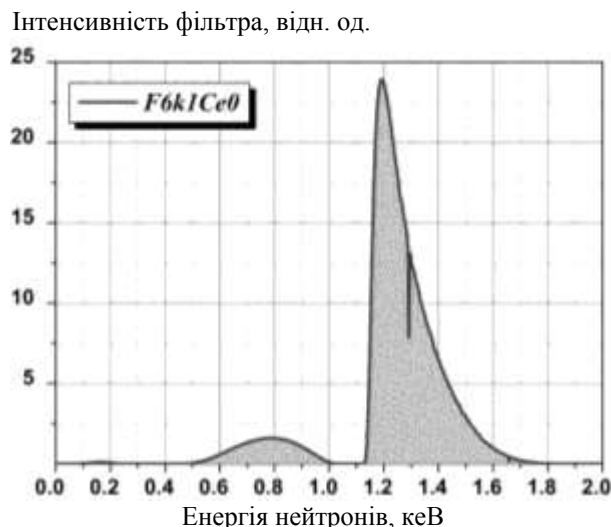


Рис. 4. Низькоенергетичні домішкові лінії.

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 ¹⁴²Ce (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 ¹⁴²Ce 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 ¹⁴²Ce 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 ~ 12 г/см² природного церію у склад фільтра суттєво зменшило внесок низькоенергетичних ліній, хоч зменшило і щільність потоку нейтронів майже в півтора раза (рис. 6 і 7).

Повний нейтронний переріз, б

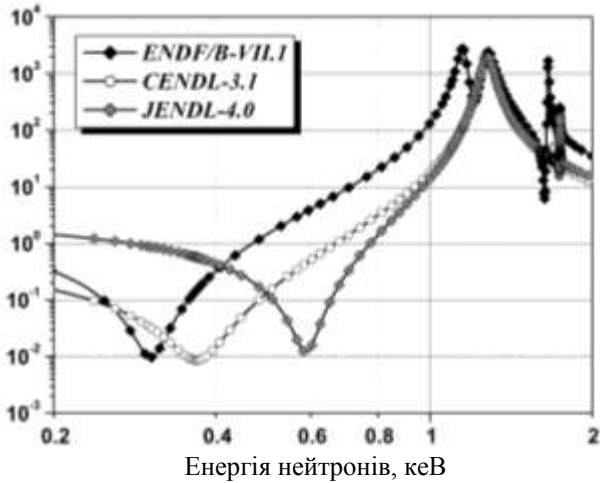


Рис. 5. Повний нейтронний переріз ^{142}Ce з різних БОЯД.

Інтенсивність фільтра, відн. од.

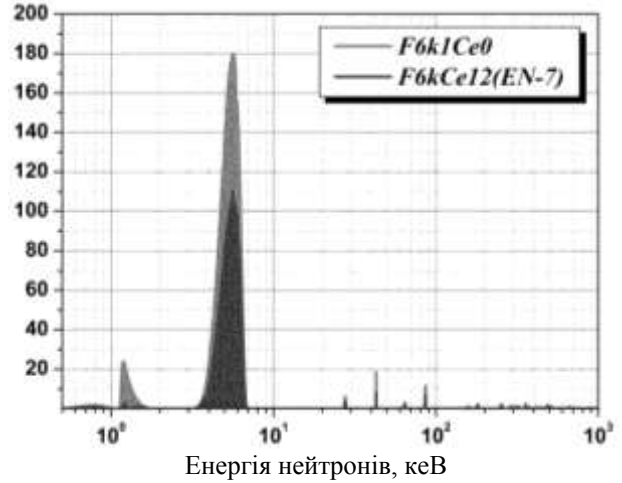
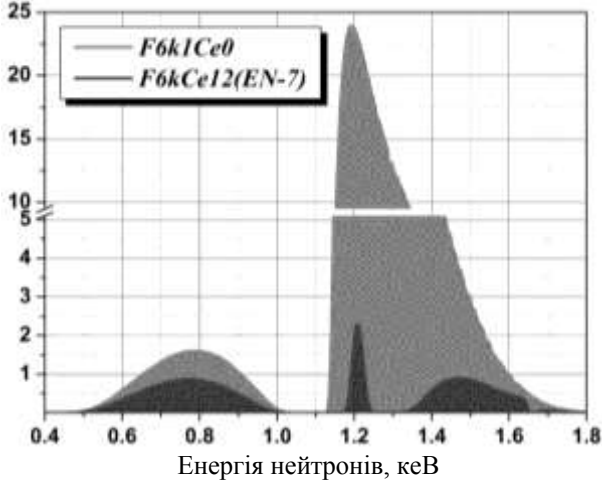


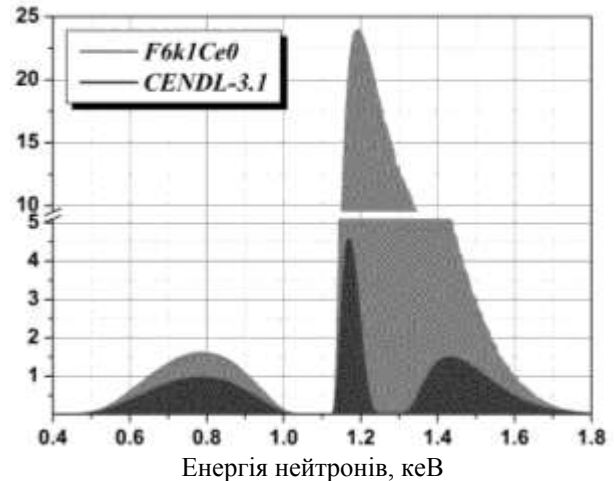
Рис. 6. Вплив церію на спектр фільтра.

Інтенсивність фільтра, відн. од.



а

Інтенсивність фільтра, відн. од.



б

Рис. 7. Порівняння впливу церію на низькоенергетичну домішку спектра: а – 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 $\sim 1,15$ 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 варіантів 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.

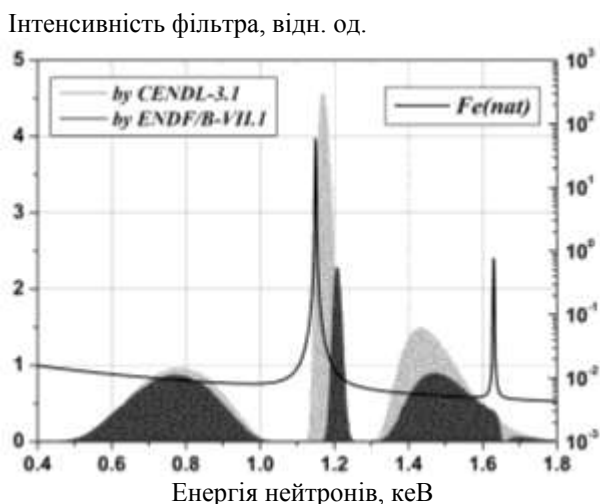


Рис. 8. Домішкові лінії фільтра поблизу 1,2 кеВ за версіями CENDL-3.1 та ENDF/B-VII.1, а також переріз активації заліза згідно з BROND-2.2.

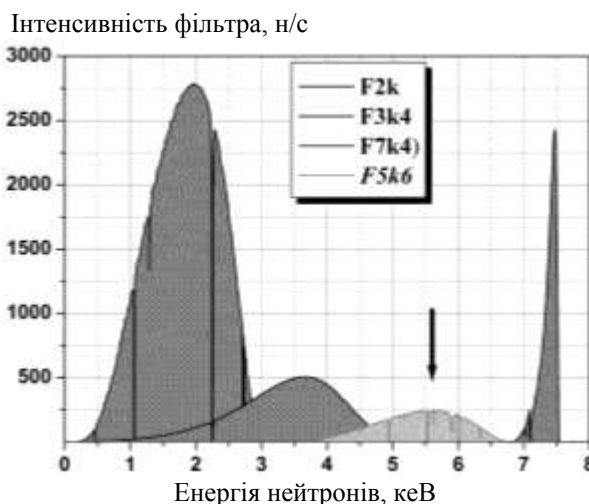


Рис. 9. Місце нового фільтра в наборі існуючих у діапазоні до 10 кеВ.

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 $10^9 \text{ н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, 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}B , г/см ² (en7)	^{10}B , г/см ² (en7)	^{60}Ni , г/см ² (jn4)	S, г/см ² (en6)	Mn, г/см ² (jn4)	Al, г/см ² (en7)	^{16}O , г/см ² (jn3)	Se, г/см ²	Середня енергія, кеВ	Напіширина, кеВ	«Чистота», %	Щільність потоку, н/(см ² ·с)
Без Се	3,10	0,545	213,21	54,00	14,84	0,54	0	0	5,63	1,68	80,9	$3,6 \cdot 10^5$
+ Се по ENDF/B-VII.1									5,62	1,73	83,9	$2,0 \cdot 10^5$
+ Се 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://ukrnc.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}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·см²). 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}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·cm²). 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