

В. А. Лібман*, О. О. Грицай

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: vlibman@kinr.kiev.ua

МОДЕЛЮВАННЯ НОВОГО НЕЙТРОННОГО ФІЛЬТРА З ЕНЕРГІЄЮ 1,6 кеВ

На основі останньої версії бібліотеки оцінених ядерних даних ENDF/B-VIII.0 змодельовано новий інтерференційний нейтронний фільтр із середньою енергією 1,6 кеВ. Основні компоненти фільтра: скандій, нікель-60, залізо-54 та селен-80. Очікувані характеристики фільтра: середня енергія 1,6 кеВ, ширина нейтронної лінії на половині висоти 0,7 кеВ, чистота основної лінії 97 %, щільність потоку нейтронів $1,0 \cdot 10^6$ н·с⁻¹·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.

1. Вступ

До моделювання фільтра з середньою енергією 1,6 кеВ нас спонукали наступні 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 лабораторії нейтронної фізики відділу дослідницького ядерного реактора ІЯД НАН України цей діапазон перекривався фільтрами 1,9; 2,0; 3,4; 5,6 та 7,4 кеВ [1], і дуже бажано було додати в цей діапазон ще хоча б одну енергію. Моделювання цього фільтра виконувалося за допомогою програми Filter, версія 8 [2], дані про повні перерізи взаємодії нейтронів з ядрами розраховано за даними з бібліотеки оцінених ядерних даних ENDF/B-VIII.0 [3].

2. Моделювання фільтра

За основу цього фільтра було взято фільтр ФПН-2к із середньою енергією 1,9 кеВ, який

було модифіковано за допомогою ізотопу ⁸⁰Se. На рис. 1 наведено основну лінію фільтра ФПН-2к та повний переріз ⁸⁰Se, розрахований за даними бібліотеки оцінених ядерних даних (БО-ЯД) ENDF/B-VIII.0. У повному перерізі селену можна побачити досить глибокий (приблизно до 35 мб) інтерференційний мінімум при енергії 1,62 кеВ та досить інтенсивний максимум (~ 1337 б) при енергії 1,97 кеВ.

Якщо до фільтра ФПН-2к додати певну кількість ⁸⁰Se, основна лінія фільтра посунеться ліворуч у бік менших енергій, і ми одержимо новий більш «м'який» фільтр. Необхідна кількість ⁸⁰Se підбиралася виходячи з умови максимально можливого потоку нейтронів на виході фільтра при мінімальній його «забрудненості», тобто мінімальній інтенсивності «домішкових» ліній. Розрахунки проводились для таких кількостей ⁸⁰Se: 4, 8, 12, 20 та 30 г/см². На рис. 2 показано тільки початковий (4 г/см²) та остаточний (30 г/см²) варіанти змодельованого фільтра.

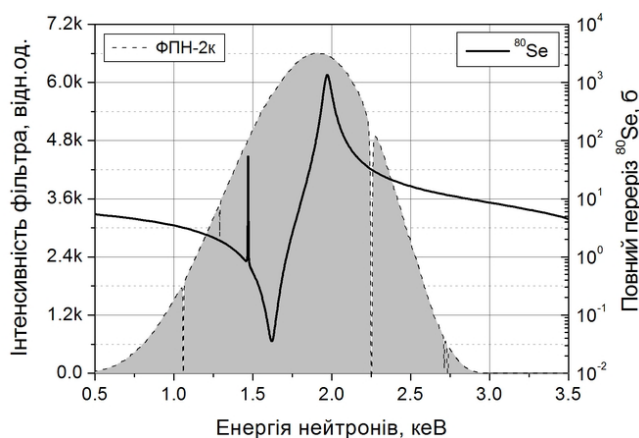


Рис. 1. Основна лінія фільтра ФПН-2к та повний переріз ⁸⁰Se.

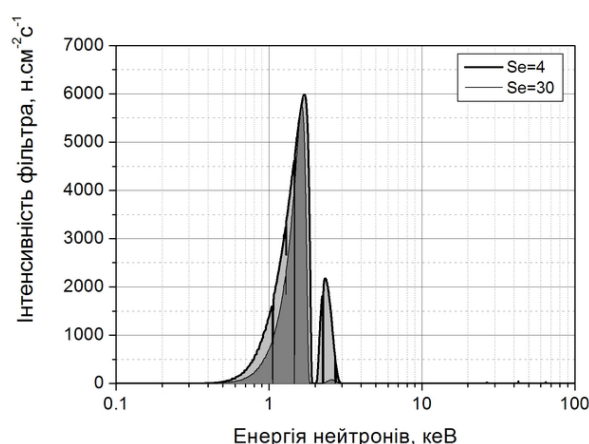


Рис. 2. Варіанти спектрів нового фільтра ФПН-1,6к для 4 та 30 г/см² товщини ⁸⁰Se.

3. Домішкові лінії у спектрі фільтра та боротьба з ними

У початковому спектрі фільтра ($4 \text{ г/см}^2 \text{ }^{80}\text{Se}$) присутні чотири групи домішкових ліній у діапазонах енергій $2 \div 3$, $25 \div 28$, $38 \div 43$ та $46 \div 66$ кеВ. Особливо небезпечною є перша група – у діапазоні $2 \div 3$ кеВ. І не тільки тому, що вона була досить інтенсивною (~20%), а ще й тому, що роздільна здатність лічильників нейтронів не дає змоги розрізнити цю лінію з основною лінією фільтра при енергії 1,6 кеВ. А це могло суттєво спотворити результати вимірювань, особливо при визначенні перерізів радіаційного захоплення нейтронів ядрами. Збільшення товщини ^{80}Se з 4 до 30 г/см^2 дало змогу суттєво зменшити внески домішкових ліній: так, для першої «домішкової» лінії (2,6 кеВ) внесок зменшився з 20 до 1,5%, але й 1,5% все ж таки забагато. Тому ми вирішили ще трохи «почистити» фільтр, послабивши цю лінію. Найбільш підходящим для цього виявився натрій, але оскільки металевий натрій є дуже хімічно активним, швидко окислюється, а з парами води з повітря утворює

дуже їдкий луг, довелося використовувати сіль натрію. Найбільш вдалим варіантом нам здалася сіль NaCl, яка стійка, не дуже гігроскопічна та доступна, а хлор майже не спотворює спектр. Як показали розрахунки, достатньо виявилось $2,165 \text{ г/см}^2 \text{ NaCl}$ (~1 см), щоб зменшити внесок цієї лінії з 1,5 до 0,2% (табл. 1).

Таблиця 1. Зміна внесків домішкових ліній при «нарощуванні» ^{80}Se та NaCl

| № лінії | Середня енергія, кеВ | Внесок лінії у потік, % | | |
|---------|----------------------|--|--|--|
| | | для $20 \text{ г/см}^2 \text{ }^{80}\text{Se}$ | для $30 \text{ г/см}^2 \text{ }^{80}\text{Se}$ | для $2,16 \text{ г/см}^2 \text{ NaCl}$ |
| 1 | 1,64 | 91,7 | 95,6 | 96,9 |
| 2 | 2,57 | 4,35 | 1,54 | 0,17 |
| 3 | 29,7 | 0,20 | 0,10 | 0,07 |
| 4 | 42,8 | 0,19 | 0,10 | 0,11 |
| 5 | 64,6 | 0,59 | 0,35 | 0,38 |

Зміну внесків домішкових ліній у потік нейтронів на виході фільтра та «очищення» основної лінії при нарощуванні ^{80}Se та додаванні NaCl можна побачити також на рис. 3 та 4.

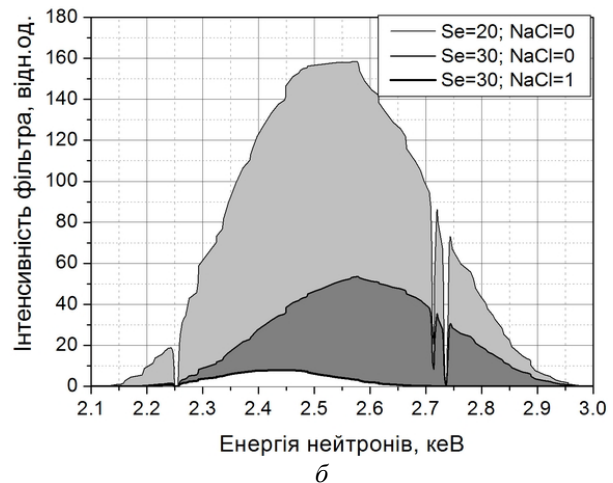
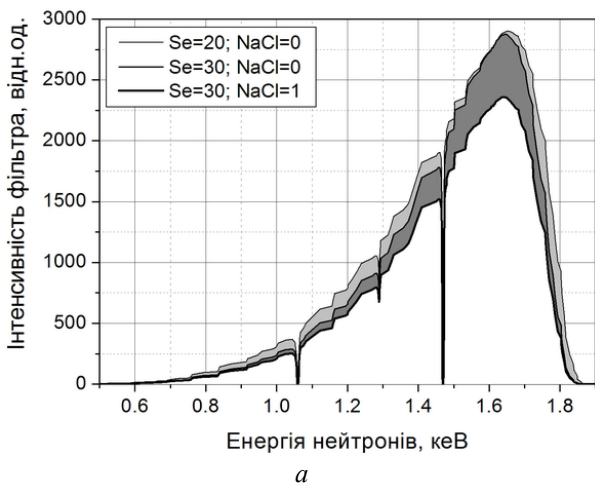


Рис. 3. Співвідношення інтенсивностей основної (а) та першої домішкової ліній (б) для трьох варіантів фільтра: 20 і $30 \text{ г/см}^2 \text{ }^{80}\text{Se}$ та остаточного $+2,17 \text{ г/см}^2 \text{ NaCl}$.

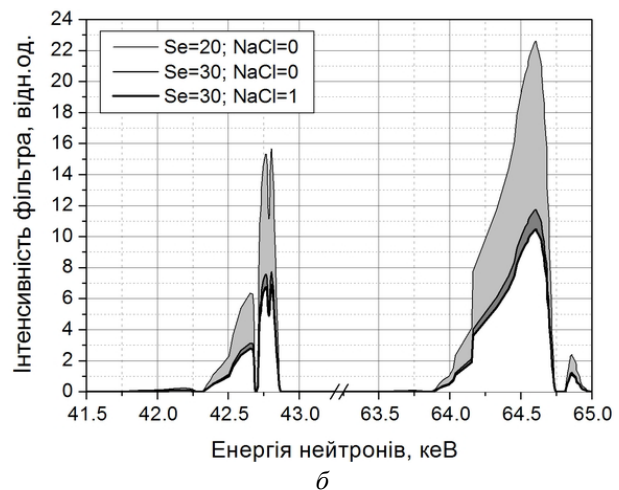
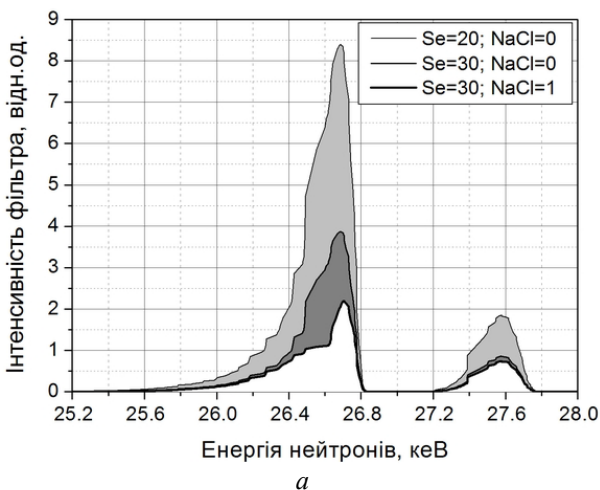


Рис. 4. Співвідношення інтенсивностей другої (а), третьої та четвертої (б) груп домішкових ліній для трьох варіантів фільтра: 20 і $30 \text{ г/см}^2 \text{ }^{80}\text{Se}$ та остаточного $+2,17 \text{ г/см}^2 \text{ NaCl}$.

4. Остаточний варіант фільтра та його можливе використання

Склад остаточного варіанта фільтра представлено в табл. 2, а спектр – на рис. 5.

Таблиця 2. Остаточний склад фільтра

| Компонент | Кількість, г/см ² | Бібліотека |
|------------------|------------------------------|---------------|
| ¹⁰ B | 0,204 | ENDF/B-VIII.0 |
| ¹¹ B | 0,0359 | ENDF/B-VIII.0 |
| Sc | 105,7 | ENDF/B-VIII.0 |
| ⁶⁰ Ni | 80,21 | ENDF/B-VIII.0 |
| ⁵⁴ Fe | 19,63 | ENDF/B-VIII.0 |
| ⁸⁰ Se | 30,02 | ENDF/B-VIII.0 |
| NaCl | 2,17 | ENDF/B-VIII.0 |

Таким чином, за результатами розрахунків остаточний варіант нового фільтра при товщинах ⁸⁰Se 30 г/см² та NaCl 2,17 г/см² вийшов з такими параметрами: середня енергія 1,6 кеВ; напівширина основної лінії 0,7 кеВ; чистота основної лінії 97 %; очікувана щільність потоку нейтронів $1,0 \cdot 10^6$ н·см⁻²·с⁻¹.

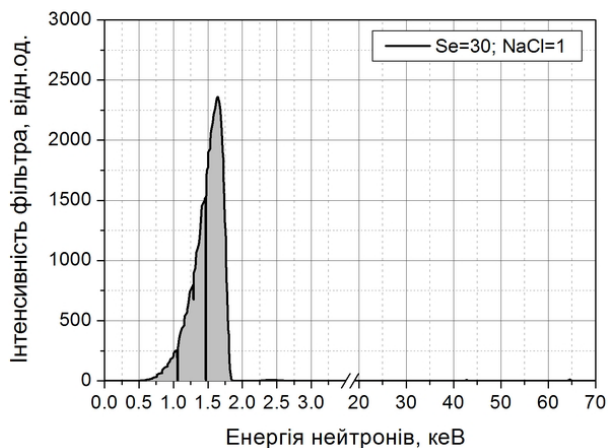


Рис. 5. Спектр остаточного варіанта фільтра ФПН-1,6к.

Місце нового фільтра на лінійці наших фільтрів у діапазоні енергій 0,2 ÷ 10 кеВ показано на рис. 6.

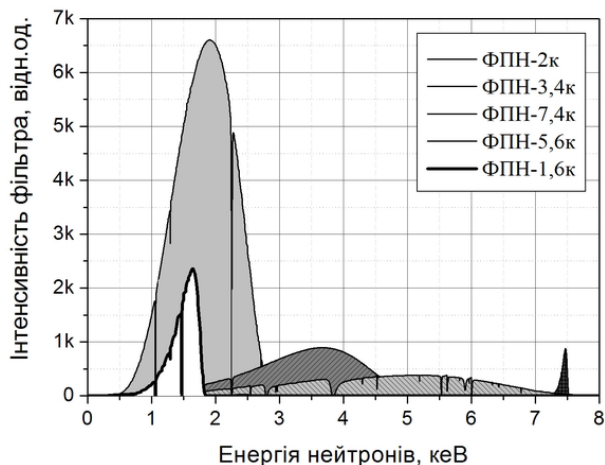


Рис. 6. Місце нового фільтра на лінійці «м'яких» фільтрів.

Тобто фільтр вийшов хоч і достатньо вузький, але досить «чистий». Щільність потоку нейтронів теж не дуже висока, але достатня для проведення експериментів з визначення повних перерізів взаємодії нейтронів з ядрами різних ізотопів, наприклад для з'ясування протиріч у БОЯД відносно повного перерізу взаємодії нейтронів з ядрами марганцю (рис. 7), для якого ENDF/B-VIII.0 дає ~ 36 б при енергії резонансу 1658 кеВ, а CENDL-3.1 [4] – приблизно 181 б при тій самій енергії.

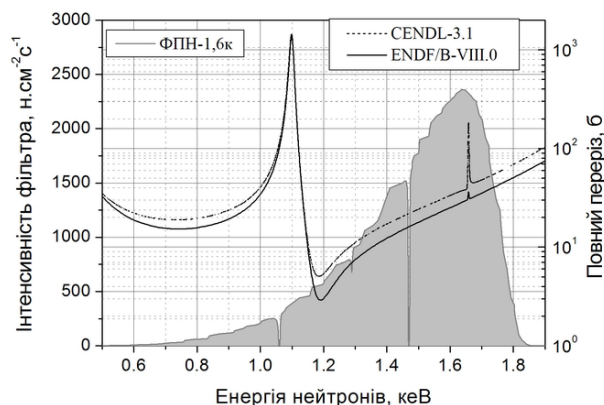


Рис. 7. Повний нейтронний переріз марганцю згідно з ENDF/B-VIII.0 і CENDL-3.1 та лінія ФПН-1,6к.

Крім того, новий фільтр може бути корисним для дослідження перерізів захоплення нейтронів ядрами в окремих резонансах, особливо для таких ізотопів, як ⁵²Cr, ⁵⁷Fe або той же марганець. Так, у ⁵²Cr та у ⁵⁷Fe до нейтронної лінії попадає один резонанс, а у марганцю – два (Рис. 8) і вимірювання гамма-спектрів радіаційного захоплення нейтронів в окремому резонансі може дати додаткову інформацію про параметри резонансу.

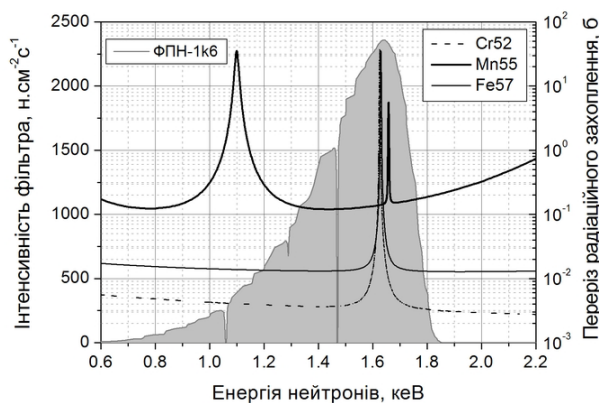


Рис. 8. Переріз радіаційного захоплення нейтронів марганцем, ⁵²Cr та ⁵⁷Fe згідно з ENDF/B-VIII.0 та лінія ФПН-1,6к.

Експериментальна перевірка фільтра ФПН-1,6к та уточнення його параметрів буде можливою при наступному циклі роботи реактора ВВР-М.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Neutron filtered beam technique at the Kyiv Research Reactor (KRR). [nian Nuclear Data Center.](#)
2. Програмний пакет FILTER. Український центр ядерних даних / FILTER Software Package. Ukrainian Nuclear Data Center. [Index of /public/download-endf/ENDF-B-VIII.0ENDF/B-VIII.0.](#)
3. [Index of /public/download-endf/CENDL-3.1/sublib.](#)
4. [Index of /public/download-endf/CENDL-3.1/sublib.](#)

V. A. Libman*, O. O. Gritzay

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

*Corresponding author: vlibman@kinr.kiev.ua

SIMULATION OF A NEW NEUTRON FILTER WITH AVERAGE ENERGY 1.6 keV

A new interference neutron filter with an average energy of 1.65 keV was modeled based on the latest version of the evaluated nuclear data library ENDF/B-VIII.0. The main components of the filter: scandium, nickel-60, iron-54, and selenium-80. We expect the following characteristics of this new filter: the average energy 1.6 keV, the mainline FWHM 0.7 keV, purity of the mainline 97 %, the neutron flux density $1.0 \cdot 10^6 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$. Experimental verification of the new filter parameters is planned during the next campaign of the WWR-M reactor.

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

Надійшла/Received 10.03.2021