

ДІАГНОСТИКА СПЕКТРІВ ВИСОКОІНТЕНСИВНИХ ПОЛІВ НЕЙТРОНІВ

С.О. Каленик, О.Ю. Букі, І.Л. Семісалов, С.П. Гоков, С.С. Кочетов
National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”,
Kharkiv, Ukraine
E-mail: kaleha@ukr.net

Представлено результати розробки методики діагностики спектрів високоінтенсивних полів нейтронів. Для вирішення цієї задачі було виготовлено спектрометри та детектори нейтронів, розроблено, прораховано та виготовлено багато-кульовий нейтронний спектрометр активаційного типу. Проведено випробування його роботи у високоінтенсивних полях нейтронів у бункері лінійного прискорювача електронів ЛПЕ-300. Також було виготовлено та випробувано тестовий зразок нейтронного спектрометра реального часу на базі лічильників повільних нейтронів. Концепція побудови його роботи базується на обчислювальному відновленні спектра досліджуваного нейтронного потоку з використанням заздалегідь навченої нейронної мережі, за інформацією, що отримується від багато-детекторного блоку детектування.

1. ВСТУП

1.1. АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕНЬ

Безперервно зростаюча питома вага атомної енергетики у світовій та вітчизняній енергетиці та регулярне посилення норм радіаційної безпеки для підприємств атомної галузі, персоналу та населення наполегливо вимагають удосконалення приладового забезпечення моніторингу радіаційної обстановки на території цих підприємств і навколишньої місцевості та дозиметрії їх персоналу. Тим часом явно заглиблюється протиріччя між нормами радіаційної безпеки, що посилюються, та технічними можливостями існуючої апаратури контролю радіаційної обстановки, вимірювань іонізуючих випромінювань різних видів та дозиметрії. Парк контрольно-вимірювальних засобів, що використовуються для цих цілей, базується, переважно, на радіометричному методі вимірювання іонізуючих випромінювань. Більш прогресивний і достовірний спектрометричний метод використовується, головню, у лабораторній практиці та ядерно-фізичних дослідженнях. Основним недоліком радіометричного методу, який використовує інтегральний відгук детектора на вимірюваний потік випромінювання, є залежність відгуку детекторів не тільки від щільності вимірюваного потоку, а й від його енергії. Тому, якщо енергетичний спектр вимірюваного потоку випромінювання не відповідає спектру потоку тієї перевіркової установки, за якою він градувався і повірявся, то з'являються енергетичні похибки, які за своєю величиною можуть багаторазово перевершувати паспортні похибки приладу, визначені для потоку, створюваного на перевіркової установці. Величина цих похибок залежить від виду та енергетичного діапазону вимірюваних випромінювань, типу та конструктивних параметрів використовуваних детекторів, а також ступеня варіативності форми спектрів вимірюваних випромінювань. За сильної невідповідності спектра вимірюваного випромінювання спектра випромінювання тієї перевіркової установки, якою даний прилад калібрувався і повірявся, величина енергетичної погрішності може в рази, і навіть

десять разів перевищувати паспортну похибку даного приладу, що визначається на даній перевіркової установці. Причому, самі ці установки атестуються лише за активністю первинного, що використовується, джерела нейтронів і флюенсу створюваного ним потоку нейтронів, але не за спектром створюваного ними потоку.

Особливо складне становище склалося в галузі вимірювань та дозиметрії нейтронного випромінювання. Це визначається, по-перше, надзвичайно широким енергетичним діапазоном нейтронних потоків, з якими доводиться мати справу на практиці. Він простягається від сотих часток електронвольта до 20 МеВ, тобто на дев'ять порядків (для порівняння: енергетичний діапазон практично значимих гамма-випромінювань має ширину лише у два порядки: від 0,03 до 3 МеВ). У такому діапазоні енергій чутливість застосовуваних нейтронних детекторів змінюється в тисячі разів, що створює невизначеність результатів вимірювань. Навіть під час вимірювання щільності нейтронного потоку енергетичні похибки нейтронних радіометрів можуть у десятки разів перевершити паспортні значення їх похибок, визначених на конкретній перевіркової установці. Ще гірша ситуація з нейтронними дозиметрами, оскільки біологічна дія випромінювання визначається не щільністю потоку, а енергією випромінювання, що поглинула біологічна тканина, яка визначається енергетичним спектром випромінювання, що призводить до ще більшої невизначеності при вимірі дози. Тим часом, за проникаючою здатності та біологічній дії нейтронне випромінювання відноситься до найнебезпечніших. При достатній енергії нейтронів можливі ядерні реакції з вильотом з ядра протонів, альфа-часток, бета-часток та нейтронів, у результаті чого утворюються, зазвичай, радіоактивні ізотопи, і при їх розпаді випромінюються гамма-кванти. Це призводить до того, що крім разової дози в біологічній тканині виникають внутрішні джерела радіоактивності, тривалість дії яких визначається періодом напіврозпаду радіоактивних ізотопів, що утворилися.

Кардинальне вирішення цієї проблеми можливе лише при переході до спектрометричного методу вимірів нейтронних випромінювань. Але завдання виміру енергетичного спектра довільних нейтронних потоків у режимі реального часу надзвичайно складне, тому що нейтронне випромінювання є побічно іонізуючим, але, на відміну від гамма-випромінювання (яке теж є непрямо іонізуючим), не створює вторинних заряджених частинок, енергія яких однозначно пов'язана з енергією нейтронів, що породили їх (гамма-кванти за рахунок фотоэффекту всю свою енергію передають фотоелектронам, енергія яких і вимірюється у гамма-спектрометрах). Існуючі лабораторні методи вимірювання енергетичного спектра нейтронного випромінювання не відповідають вимогам оперативності, реалізуються з використанням складного та дорогого обладнання та вимагають кваліфікованого персоналу. Багаторазові спроби приладової реалізації нейтронних спектрометрів через зазначені складнощі наводили лише до створення експериментальних зразків приладів, що знайшли застосування лише у дослідницької практиці.

У цій роботі досліджується можливість створення промислового спектрометра-дозиметра нейтронного випромінювання шляхом використання кількох паралельно працюючих нейтронних детекторів з різними спектральними характеристиками, що спільно перекривають весь енергетичний діапазон вимірюваних нейтронних потоків, з обчислювальним відновленням спектра вимірюваного випромінювання за їх відгуками на вимірюваний потік.

1.2. СТУПІНЬ РОЗРОБЛЕНОСТІ ПРОБЛЕМИ

Для реалізації ідеї багатодетекторного нейтронного спектрометра-дозиметра реального часу необхідно мати детектори з різноманітними та достовірно відомими спектральними характеристиками. Але нейтронні детектори, що випускаються, не атестуються за спектральною чутливістю. Ба більше того, не існує жодних методів їх експериментального визначення, ні технологій їхнього примусового варіювання. Це – одна з головних причин того, що ідея багатодетекторного нейтронного спектрометра досі не була реалізована.

2. БАГАТОКУЛЬОВИЙ НЕЙТРОННИЙ СПЕКТРОМЕТР АКТИВАЦІЙНОГО ТИПУ

Для проведення досліджень із прикладної нейтронної фізики створено дослідницький зразок кульового нейтронного спектрометра Боннера активаційного типу (БКНСБ-А). Прилад є модифікацією запропонованого в роботі [1] спектрометра, а його відмінність від останнього полягає у способі реєстрації нейтронів. У початковій конструкції спектрометра Боннера нейтрони реєструються в результаті ядерної реакції з виходом зарядженої частинки (наприклад, $n + {}^{10}\text{B} \Rightarrow {}^7\text{Li} + \alpha + 2,79 \text{ MeV}$), яка в скінтіляторі викликає світловий спалах, що реєструється ФЕУ (фотоелектричним умножувачем), спектро-

метром скінтіляційного типу. В активаційному спектрометрі нейтрони поглинаються розташованою всередині кулі таблеткою, утворюючи в ній радіоактивний ізотоп. Подальше вимірювання радіоактивності таблетки показує кількість нейтронів, що потрапили на неї. Основна перевага БКНСБ-А полягає у можливості його застосування у потужних нейтронних полях, тоді як застосування спектрометра скінтіляційного типу обмежене швидкістю спрацьовування електроніки та її радіаційною стійкістю. Як приклад, використання БКНСБ-А можна навести іспанську роботу [2], у якій за допомогою такого приладу проводилось вимірювання нейтронних полів у експериментальних залах прискорювачів частинок.

Спочатку було зроблено 5 поліетиленових куль різного діаметру. Потім, після первинних випробувань, спектрометр було розширено до 10 куль діаметром від 50 до 245 мм (Рис. 1). У центрі кожної кулі знаходиться пігулка (циліндр діаметром 4 мм, та висотою 2 мм) з індію. В ізотопі ${}^{115}\text{In}$ (його зміст у природньому індію 95,7%) високий перетин поглинання теплових нейтронів – 190 барн. Внаслідок поглинання нейтрона ядром ${}^{115}\text{In}$ утворюється радіоактивний ізотоп ядра ${}^{116m}\text{In}$, основний канал розпаду якого: ${}^{116m}\text{In} + \beta^- (T_{1/2}=54,3 \text{ хв}) \Rightarrow {}^{116}\text{Sn} + \gamma 16,9 \text{ кеВ}$ [4].

Таблетки з індію мають форму циліндра заввишки 0,2 см і діаметром 0,4 см. Ці розміри обрані так, щоб 80...90% теплових нейтронів поглиналося, а поглинання в ній випромінюваних гамма-квантів розпаду було невелике.



Рис. 1. 10-кульовий нейтронний спектрометр

Після виготовлення додаткових куль нейтронного спектрометра і розрахунку їх функцій відгуку (Рис. 2), маємо 10-кульовий нейтронний спектрометр активаційного типу, за допомогою якого з'явилась можливість досліджувати спектр нейтронів з енергетичним діапазоном від теплових до приблизно 10 MeV. Саме у цьому діапазоні лежить спектр нейтронів з нейтроно-продукуючої мішені (ε-гамма-n-конвертор) на лінійному прискорювачі електронів.

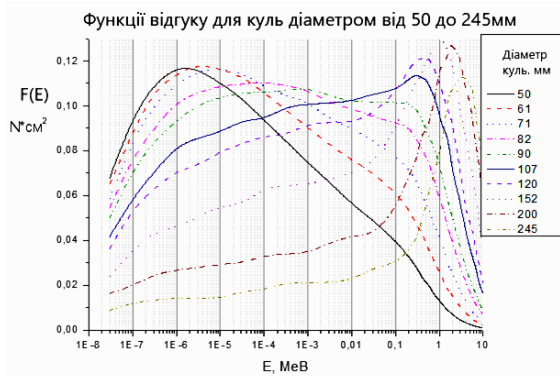


Рис. 2. Функції відгуку 10-кульового нейтронного спектрометра

Для проведення експериментів з дослідження енергетичного розподілу нейтронів з е-гамма-нейтронного конвертора було застосовано пучок електронів з 30 MeV виходу лінійного прискорювача електронів ЛПЕ-300. Під час першого експерименту енергія електронів з прискорювача була рівною $E_e=12$ MeV, під час другого експерименту – $E_e=15$ MeV. Після виводу пучка з прискорювача він потрапляв на набірний е-гамма-нейтронний конвертор (Рис. 3), який складався з кількох танталових та кількох свинцевих пластин. Сумарна товщина танталу 0,8 см (2 радіаційні довжини), свинцю – 3 см (6 радіаційних довжин). У танталових пластинах електронний пучок породжував гальмівні фотони, які в цих пластинах і в пластинах свинцю генерують нейтрони. Між пластинами танталу та свинцю був проміжок повітря. Збоку на конвертор ставився обдув. Оскільки, якщо цього не зробити, то конвертор міг розплавитись під дією електронного пучка. Кулі нейтронного спектрометра встановлюються так, що на них потрапляють нейтрони, які випромінює конвертор під кутом 90° до пучка електронів. Щоб на результати вимірювань менше впливали нейтрони, які розсіялися на сусідніх кулях, кулі розміщували подалі одна від одної, так що відстань між центрами найближчих куль було не менше подвоєної суми їх радіусів. Схема експерименту з дослідження енергетичного спектра нейтронів наведена на Рис. 3.

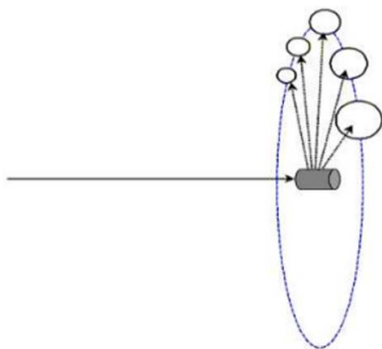


Рис. 3. Схема експерименту

Після встановлення спектрометру навколо джерела нейтронів включався прискорювач електронів. Електрони з $E_e=12$ MeV у конверторі конвертувались у нейтрони, розлітались у різні

боки від конвертора і частина з них потрапляла на кулі спектрометра. Опромінення тривало 60 хв. Після цього індієві таблетки, які знаходились у кожній з куль спектрометра діставались та поміщались почергово у гамма-спектрометр Canberra. За його допомогою визначалась наведена активність кожної з таблеток індію. Через кілька днів коли активність індієвих таблеток спала на кілька порядків, було проведено такий самий експеримент, тільки енергія прискорювача, а відповідно і електронів, що налітають на конвертор, була $E_e=15$ MeV. Після опромінення таблеток так само вимірювались їх наведена активність за допомогою гамма-спектрометра Canberra. Далі результати вимірювання обох експериментів оброблялись і за методикою, що описана у роботі [3] проводилось відновлення спектра нейтронів, що потрапили на нейтронний спектрометр активаційного типу. Результати відновлення спектра наведено на Рис. 4.

Відновлені спектри

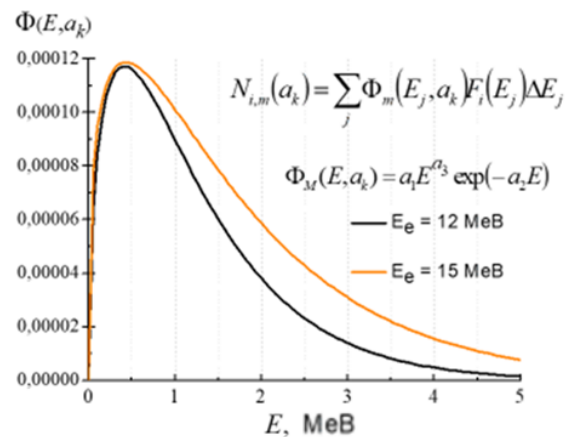


Рис. 4. Відновлений спектр нейтронів з е-гамма-п-конвертора

3. СПЕКТРОМЕТР НЕЙТРОНІВ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Для пришвидшення вимірювання спектра нейтронів було запропоновано та виготовлено макет спектрометра нейтронів реального часу. Блок детектування спектрометра являє собою поліетиленову трикутну призму з 10 циліндричними отворами діаметром 2 мм, у середину яких є можливість помістити 10 лічильників повільних нейтронів ЛНП-11(СНМ-11). Розмір нижньої прямокутної основи – 30х30 см, верхньої робочої поверхні – 6х30 см. Вся призма з усіх боків, окрім робочої вершини, оточена захистом від нейтронів. Захист являє собою восьмисантиметрові пластини з борваного поліетилену. Фото виготовленого макету без захисту та з вставленим у верхній отвір лічильником теплових нейтронів ЛНП-11 наведено на Рис. 5.

Окрім блоку детектування існують ще блок живлення, блок інтегратора, куди сходяться всі сигнали з лічильників та персональний комп'ютер з мікроконтролером (плата з'єднання інтегратора з

персональним комп'ютером). Персональний комп'ютер з мікроконтролером – блок керування.

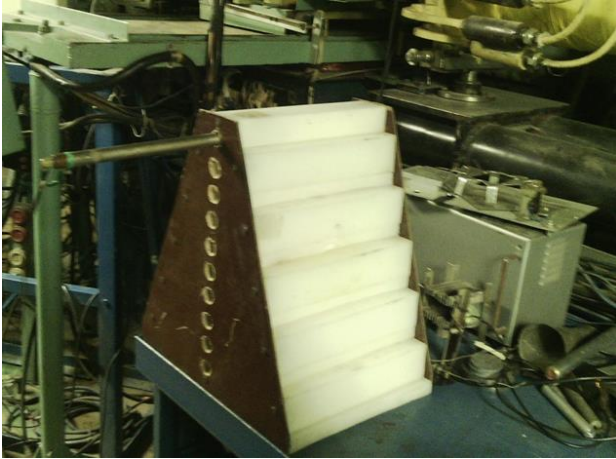


Рис. 5. Фото нейтронного спектрометра реального часу

Нейтрони, що потрапляють на захист спектрометра, уповільнюються у поліетилені до теплових енергій, після чого захоплюються бором і не потрапляють всередину спектрометра. У бора дуже високий переріз захоплення теплових нейтронів. Отже, спектрометр реєструє тільки ті нейтрони, які потрапляють до спектрометра через вершину (робочу поверхню призми). При потраплянні нейтронів на цей спектрометр, вони будуть сповільнюватися до теплових та реєструватись лічильниками ЛНП-11. Оскільки до кожного з лічильників нейтрон повинен пройти різний шлях, а значить втратити різну кількість енергії, то ефективність реєстрації у кожного лічильника буде залежати від енергій нейтронів, що налітають на піраміду. Низькоенергетичні нейтрони будуть із більшою вірогідністю реєструватись лічильниками, що розташовані вище, ближче до вершини піраміди (входу), а високоенергетичні – нижче, оскільки їм потрібно більше зіткнень для того щоб втратити енергію до теплової рівноваги. Знаючи кількість зареєстрованих нейтронів і залежність реєстрації кожного лічильника від енергії нейтронів, що налітають на спектрометр (функції відгуку лічильників), є можливість відновити спектр цих нейтронів. Наразі проводяться експерименти з цим прибором, та розробляється модель та її програмна реалізація, за допомогою якої будуть розраховані функції відгуку кожного з лічильників. А вже з їх допомогою з'явиться можливість відновлювати спектр нейтронів, що потрапили на спектрометр. Задача аналогічна відновленню спектра нейтронів, що реєструвались багатокільовим спектрометром нейтронів активаційного типу. До того ж є ідея автоматизації процесу відновлення спектра за допомогою персонального комп'ютера та нейронної мережі, яку потрібно буде навчити розпізнавати різні типи

нейтронних спектрів і відновлювати їх. І якщо це вдасться, то з'явиться можливість одразу, під час вимірювання спектра нейтронів, за допомогою спектрометра нейтронів реального часу бачити відновлений спектр нейтронів. Наступним кроком може стати проектування і розробка тестової мобільної версії спектрометра, щоб з'явилась можливість проводити дослідження не тільки в лабораторних умовах, але й з виїздом на місцевість.

ВИСНОВКИ

Створено дослідний зразок 10-кульового нейтронного спектрометра активаційного типу і проведені його випробування в потоці нейтронів з e, γ, n -конвертора, встановленого на лінійному прискорювачі електронів, та у полі нейтронів з плутоній-берилієвого джерела. Визначено робочий діапазон енергій спектрометра – $3 \cdot 10^{-5}$ до 10 MeV. Для різних куль спектрометра знайдені значення ефективності реєстрації нейтронів. Зважаючи на те, оцінена мінімальна щільність потоку нейтронів, яку може вимірювати спектрометр. Відновлено спектри нейтронів з e -гамма-нейтронного конвертора під дією електронів різних енергій, та спектр нейтронів з плутоній-берилієвого джерела. Показано, що при використанні гамма-детектора спектрометр абсолютно не чутливий до фонового гамма-випромінювання.

Запропонована, прорахована, розроблена та апробована методика дослідження енергетичного розподілу нейтронного потоку виглядає дуже перспективною разом із використанням заздалегідь навченої нейронної мережі, що базується на обчислювальному відновленні спектра на основі даних з блоку детектування. Наразі йде робота над поєднанням, встановленням зв'язку та обміном інформацією між блоком детектування і блоком управління.

Запропонована методика може бути використана у затребуваному та швидкозростаючому напрямку ядерної медицини для проведення контролю як інтенсивності, так і енергетичного спектра потоку нейтронів, необхідних для проведення нейтрон-захватної терапії.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. R.L. Blamblett, R.J. Ewing, T.W. Bonner. A new type of neutron spectrometer // *Nuclear instrument and methods*. 1960, v. 9, p. 1-12.
2. F. Fernández, K. Amgarou, C. Domingo, et al. Neutron spectrometry in a PAT cyclotron with a Bonner sphere system // *Radiation Protection Dosimetry*. 2007, v.126, N 1-4, p. 371-375.
3. А.Ю. Буки, А.С. Мазманишвили. Стохастический анализ измерений пятишарового спектрометра Боннера // *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2017, №55, (1276).

DIAGNOSTICS OF HIGH-INTENSITY NEUTRON FIELDS SPECTRA

S.O. Kalenyk, O.Yu. Buky, I.L. Semysalov, S.P. Gokov, S.S. Kochetov

The paper presents the results of the development of a methodology for diagnosing spectra of high-intensity neutron fields. To solve this problem, spectrometers and neutron detectors were manufactured, an activation-type multi-sphere neutron spectrometer was developed, calculated and manufactured. Its operation was tested in high-intensity neutron fields in the bunker of the LINAC-300 linear electron accelerator. A test sample of a real-time neutron spectrometer based on slow neutron counters was also manufactured and tested. The concept of its operation is based on the computational reconstruction of the spectrum of the studied neutron flux using a pre-trained neural network, according to information received from the multi-detector detection unit.