

## ДЕТЕКТОРИ НЕЙТРОНІВ НА ОСНОВІ НЕОРГАНІЧНИХ СЦИНТИЛЯТОРІВ

**В.Д. Рижиков, Б.В. Гриньов, І.М. Зеня, Е.К. Лисецька,  
Л.Л. Нагорна, Г.М. Онищенко, Л.О. Півень,  
М.Г. Старжинський**

Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України,  
пр.Леніна, 60, Харків, 61001  
e-mail: ns@isc.kharkov.com

Вивчена ефективність реєстрації нейтронів з енергіями  $E_n \sim 0,0025$  eВ -10 MeВ сцинтиляторами типу CWO, BGO, GSO, ZWO, які використовуються у складі систем виявлення радіоактивних речовин, що діляться. Обговорюється найбільш імовірний механізм реєстрації швидких нейтронів по реакції непружно-го розсіювання (n, n' $\gamma$ ) на ядрах сцинтилятора. Експериментально вимірювані значення ефективностей реєстрації порівнюються з модельними оцінками.

### Вступ

У теперішній час особлива увага приділяється питанням, пов'язаним з попередженням актів ядерного тероризму. Державні кордони багатьох країн обладнані контрольно-пропускними пунктами, що перешкоджають несанкціонованому переміщенню радіоактивних речовин (РР), що діляться, наприклад,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ . На цих пунктах також широко використовуються системи виявлення гамма-випромінювання на основі високочутливих органічних і неорганічних сцинтиляторів великого об'єму, а крім того, вони оснащені детекторами нейтронів на основі газових  $^3\text{He}$  лічильників [1,2].

Відомо, що практично усі РР (крім  $^{252}\text{Cf}$ ) є альфа-випромінювачами, тому, крім реакції спонтанного ділення, можливі реакції ( $\alpha$ , n) на ядрах домішок. Завдяки нейтронам із цих реакцій, нейтронам спонтанного ділення й космічним нейтронам РР є джерелом швидких нейтронів ділення. Спектри ділення речовин, що діляться, досить схожі [3].

Крім того, у випромінюванні РР спостерігається миттєве супутнє гамма-випромінювання, що випускається збудженими осколками в процесі їхнього

переходу в основний стан. Наприклад,  $^{235}\text{U}$  у середньому на один акт ділення випускає  $\sim 7$  гамма-квантів із середньою енергією 7,4 MeВ [4].

У зв'язку з тим, що ефективно ослаблення гамма-випромінювання в транспортному контейнері може бути легко виконане з використанням свинцевого захисту (наприклад, ступінь ослаблення потоку гамма-квантів для  $E \sim 8$  MeВ становить приблизно два порядки при товщині Pb  $\sim 10$  см), імовірність виявлення радіоактивних речовин, що діляться, у транспортних контейнерах по гамма-компоненті залишається невисокою. Швидкі нейтрони досить вільно проходять через 10-ти сантиметровий свинцевий захист, практично не послабляючись. Ступінь ослаблення потоку швидких нейтронів з енергією 2-4 MeВ становить приблизно два порядки при товщині свинцю близько 60 см.

Отже, РР на контрольно-пропускних пунктах з найбільшою ефективністю можуть бути виявлені тільки по швидких нейтронах ділення.

У роботі досліджується ефективність реєстрації нейтронів  $^{239}\text{Pu}$ -Ве-джерела в діапазоні енергій  $\sim 1$  eВ до 8 MeВ, серед-

ня енергія  $\sim 4,5$  MeV (теплові й швидкі) важкими оксидними сцинтиляторами ти-

пу CWO, BGO, GSO, ZWO.

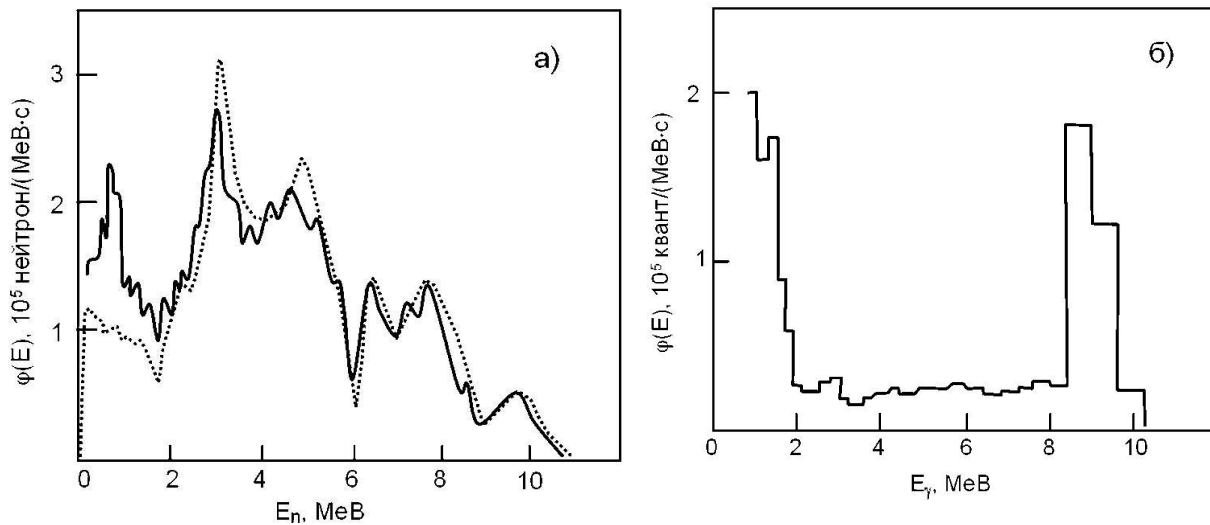


Рис. 1. Нейтронний спектр (а) і гамма-спектр (б) нейтронного джерела  $^{239}\text{Pu-Be}$ .

### Методика експерименту

В експериментах для одержання порівняльних характеристик ефективності реєстрації швидких і теплових нейтронів джерела  $^{239}\text{Pu-Be}$  неорганічними сцинтиляторами типу CWO, BGO, GSO, ZWO розмірами  $10 \times 10 \times 10$  мм, CWO –  $\varnothing 45 \times 42$  мм, CsI(Tl) –  $10 \times 10 \times 10$  мм, NaI(Tl) –  $\varnothing 15 \times 15$  мм, ZWO –  $24 \times 24 \times 22$  мм, а також сцинтилятором LiI(Eu) розміром  $\varnothing 12 \times 9$  мм, вибраним як реперний. Використовувалося плутоній-берилієве джерело  $^{239}\text{Pu-Be}$ , що забезпечує на відстані  $r = 300$  мм щільність потоку швидких нейтронів  $\varphi = 9,37$  нейтронів/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ) (без сповільнювача). При використанні поліетиленового сповільнювача у вигляді кулі діаметром 150 мм на відстані  $r = 300$  мм від джерела щільність потоку теплових нейтронів склала  $\varphi = 0,787$  нейтронів/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ). На рис.1 наведено нейтронний (а) і гамма-спектр (б) нейтронного джерела  $^{239}\text{Pu-Be}$ .

Ефективність нейтронного спектрометра експериментально визначається як відношення числа зареєстрованих нейтронів  $N_{\text{реєстр}}$  до числа нейтронів  $N$ , що

потрапили в датчик реєстратора за цей же самий час. При нормальному падінні випромінювання на кристал розмірами  $10 \times 10 \times 10$  мм ефективність визначається відношенням швидкості рахунку гамма-квантів у робочому вікні спектрометра до щільності потоку  $\varphi$  [частка/( $\text{с} \cdot \text{см}^2$ )], падаючих на детектор нейтронів. Якщо ймовірність реєстрації нормується на потік часток [частка/с], то говорять про чутливість детектора. Перехід від повного потоку  $N$  у тілесному куті  $4\pi$  ср [нейтрон/с] до щільності потоку  $\varphi$  [нейтрон/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ )] на відстані  $R$  здійснюється за формулою  $\varphi = N/4\pi R^2$ , де  $R$  – відстань від геометричного центра джерела до ефективного центра детектора. Ослабленням у повітрі й анізотропією джерела нехтуємо.

Об'єднана структурна схема проведених нами експериментів наведена на рис.2. Відстань між центрами джерела нейтронів і кристала становила 300 мм. Найбільш простим і розповсюдженим способом підвищення вибіркової нейтронного реєстратора до гамма-випромінювання є екранування його свинцем, оскільки довжина релаксації нейтронів у свинці значно більша, ніж

для гамма-квантів тієї ж енергії. Свинцевий захист товщиною 7 см послабляє гамма-випромінювання (широкий пучок) з енергією 5 MeV приблизно в 20 разів. Як захист від супутнього гамма-випромінювання джерела використовувався екран 4 зі свинцю товщиною 7 см, що брав участь у всіх експериментах. Інші компоненти, як то сповільнювач, кадмієвий і гадолінієвий екрани використовувалися в міру необхідності.

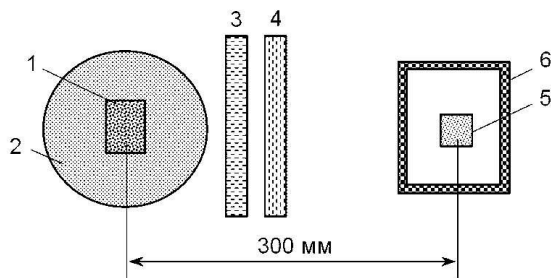


Рис. 2. Об'єднана структурна схема виконаних експериментів.

- 1 – джерело швидких нейтронів типу  $^{239}\text{Pu-Be}$  ( $\alpha, n, \gamma$ );
- 2 – сповільнювач із поліетилену,  $d = 6$  см;
- 3 – захисний екран, Cd,  $d = 2$  мм;
- 4 – захисний екран, Pb,  $d = 7$  см;
- 5 – кристал, що досліджується;
- 6 – захисна оболонка із окису гадолінію,  $d = 1$  см.

Оскільки середня відстань від вимірювального стенда до стін лабораторного приміщення (матеріал – цегла) становила близько 1 м, для ослаблення теплових нейтронів, розсіяних від задньої стіни приміщення лабораторії використовувався аркушевий кадмій 3 товщиною  $\sim 2$  мм, а для захисту від теплових нейтронів, розсіяних від бічних стін, – оболонка 6 з окису гадолінію товщиною 1 см. Додаткові теплові нейтрони “готувалися” поліетиленовою сферою,  $d = 6$  см.

У ході експериментів проводилася оцінка ефективності реєстрації й чутливості досліджуваних сцинтиляторів на основі важких оксидів до швидких нейтронів за допомогою детекторної системи сцинтилятор-ФЕП.

Крім того, були виконані виміри ефективності реєстрації теплових нейтронів методом кадмієвої і гадолінієвої різниці.

При цьому враховувалися як прямий потік теплових нейтронів (від джерела зі сповільнювачем), так і потік уповільнених нейтронів, що утворюються в результаті пружного розсіювання від навколишніх воднемістких предметів. Як ефективний поглинач теплових нейтронів використовувалися екрани з Cd й окису Gd.

Незважаючи на низьку середню енергію збудження ядер в експерименті ( $\sim 2,5$  MeV), існує кінцева ймовірність виникнення затриманих подій (часи затримки можуть досягати декількох мікросекунд), ініційованих нейтроном – збудження ізомерних рівнів, поява гамма-квантів радіаційного захоплення, виникнення електронів  $\beta$ -розпаду. З метою одержання однозначної відповідності між фактом взаємодії нейтрона й появою рахункового імпульсу в робочому вікні реєструючої системи, у проведених вимірах постійна часу інтегрування спектрометричного сигналу вибиралася для всіх сцинтиляторів однаковою й досить великою ( $\sim 30$  мкс).

У таблиці 1 наведені експериментальні значення середніх швидкостей лічби, які зареєстровані досліджуваними детекторами в шести різних експериментах. Робочий енергетичний діапазон спектрометра, що відповідає амплітудам для електронів, становив 20-300 keV.

Швидкості лічби сумарного нейтронного потоку  $f_{\text{нз}}$  швидких і теплових нейтронів (розсіяних від навколишніх предметів), зареєстрованих досліджуваним сцинтилятором, наведені в колонці 2, табл. 1. В експерименті (рис.2) беруть участь нейтронне джерело 1, свинцевий послаблювач 4 і кристал 5. Сповільнювач 2, кадмієвий 3 і гадолінієвий 6 екрани не використовувалися.

Для одержання швидкостей лічби тільки від швидких нейтронів (колонка 3, табл.1) використовувався гадолінієвий екран 6, який забирає теплові нейтрони, розсіяні від стін. В експерименті беруть участь нейтронне джерело 1, свинцевий послаблювач 4, кристал 5, гадолінієвий

екран 6. Сповільнювач 2, кадмієвий екран 3 не використовувалися (див. рис.2).

Таблиця 1. Значення середніх швидкостей лічби залежно від умов експерименту для різних скінтіляторів.

1	2	3	4	5	6	7
Параметр	$f_{n\Sigma}$	$f_{n\Sigma}+Gd$	$f_{n\Sigma}+спов.$	$f_{n\Sigma}+спов.+Gd$	$f_{n\Sigma}+спов.+Cd$	$f_{n\Sigma}+спов.+Cd+Gd$
	ш/н (100%) + т/н (розс.)	ш/н (100%) - т/н (розс.) (є розс. т/н)	ш/н (90%) + 10% т/н (додали т/н)	ш/н (90%) + 10% т/н - т/н (Gd) (усунули частково т/н (Gd))	ш/н (90%) +10% т/н - т/н (Cd) (усунули частково т/н (Cd))	ш/н (90%) +10% т/н - т/н (Gd, Cd) (усунули повністю т/н (Gd, Cd))
GSO	5,49	3,58	7,49	4,4	6,11	3,53
BGO	5,63	3,61	7,4	4,29	5,57	3,35
CWO Ø45x42	5,54 99,94		7,67 111,39		5,47 89,79	
ZWO	6,58					
CsI(Tl)	4,48		5,56		4,17	
NaI(Tl)Ø15x15 S=2,25 см <sup>2</sup> S=1 см <sup>2</sup>	9,83 4,37		12,29 5,46		8,32 3,7	
LiI(Eu)	4,11	3,9	4,42	4,18	3,33	3,35
LiI по реакції	0,18	0,088	0,79	0,18	0,42	0,18

**Примітка:** ш/н (100%) + т/н (розс.)” означає швидкі нейтрони (100%) плюс розсіяні теплові нейтрони. Скорочення “ш/н (100%) - т/н (розс.)” означає швидкі нейтрони (100%) мінус розсіяні теплові нейтрони. Скорочення “ш/н (90%) + 10% т/н” означає зменшення потоку швидких нейтронів до 90% за рахунок поглинання сповільнювачем й 10% добавка потоку теплових нейтронів, обумовлена сповільнювачем.

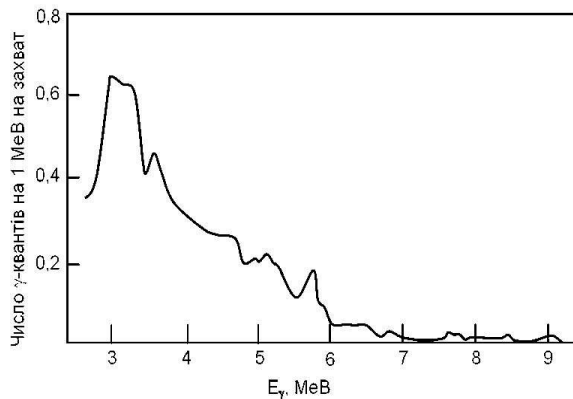


Рис.3. Спектр гамма-випромінювання, що випускається кадмієм при захопленні нейтронів.

Щоб переконатися, що в нашому експерименті є незначна кількість розсіяних від навколишніх предметів теплових нейтронів, і що гадолінієвий екран ефективно послаблює ці нейтрони, були проведені кілька додаткових експериментів. На першому етапі в тій же самій геометрії

було додано до сумарного нейтронного потоку ще ~10% теплових нейтронів за допомогою встановлення пластикового сповільнювача навколо нейтронного джерела. У цьому експерименті (рис. 2) беруть участь нейтронне джерело 1, свинцевий послаблювач 4, кристал 5, сповільнювач 2. Кадмієвий 3 і гадолінієвий 6 екрани не використовувалися. Результати експерименту знаходяться у колонці 4.

Потім були прибрані з цього змішаного потоку нейтронів теплові нейтрони за допомогою лише одного гадолінієвого (колонка 5, табл.1) фільтра. Потім були прибрані з цього змішаного потоку нейтронів теплові нейтрони за допомогою тільки одного кадмієвого (колонка 6, табл.1) фільтра. На останньому етапі зі змішаного потоку нейтронів були усунуті теплові нейтрони за допомогою сумар-

ного Gd+Cd – фільтра (колонка 7, табл.1). Можна бачити, що гадолінієвий фільтр істотно послабив потік теплових нейтронів (колонка 5, табл.1), кадмієвий фільтр (колонка 6) виявився менш ефективним у порівнянні з гадолінієвим. Сумарний Gd+Cd – фільтр дав практично той же результат (колонка 7), що й окремо гадолінієвий (колонка 3). На підставі цих даних можна зробити висновок, що в експерименті, у якому наявне тільки джерело, свинцевий послаблювач і гадолінієвий фільтр (колонка 3), була незначна кількість розсіяних теплових нейтронів.

Cd-фільтр розташовувався на максимальній відстані від сцинтилятора, щоб не вносити додаткову похибку від вторинного гамма-випромінювання кадмію. Спектр гамма-випромінювання, що випускається кадмієм при захопленні нейтронів наведено на рис.3.

З використанням експериментальних даних, наведених у табл. 1, були оцінені як повні ефективності реєстрації змішаних потоків нейтронів, так і окремо для швидких і теплових нейтронів в еквівалентному енергетичному діапазоні для електронів (гамма-квантів) 20-300 кеВ. Результати оцінки приведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Результати вимірів ефективностей реєстрації потоків нейтронів різними сцинтиляторами в еквівалентному енергетичному діапазоні для електронів (гамма-квантів) 20-300 кеВ.

Сцинтилятор Параметр	LiI(Eu) Ø12x9	NaI(Tl) Ø15x15	CsI(Tl)	GSO	CWO	BGO	ZWO	LiI (по реакції Li(n,α))
	10x10x10 мм <sup>3</sup>							
Щільність, г/см <sup>3</sup>	4.08	3.67	4.51	6.71	7.9	7.13	7,87	4.08
Z <sub>ефф</sub>	52	51	54	59	66	75	61	
Повна ефективність реєстрації, %	44	47	48	59	59	60	70	1.9
Ефективність реєст- рації ш/н., %	41			47		43		1.9
Ефективність реєст- рації т/н, %	27			69	34			-

### Аналіз результатів

Експериментальні дані наведені в таблиці 2 свідчать про те, що повна ефективність реєстрації нейтронів, отримана для різних кристалів з використанням джерела швидких нейтронів (без сповільнювача) цілком корелює з ефективним атомним номером сцинтилятора й у діапазоні енергій реєстрації гамма-випромінювання 20-300 кеВ знаходиться в межах від 40 до 70 %. Цей результат узгоджується з даними, наведеними в [5], і не суперечить залежності перерізу непружного розсіювання нейтронів від атомного номера елемента, наведеному,

наприклад, у роботі [6].

Висока ефективність реєстрації швидких нейтронів оксидними сцинтиляторами, що досить слабо залежить від типу сцинтилятора, дозволяє залежно від поставленого завдання, використовувати оксидні сцинтилятори різного типу й розмірів з відповідними їм фотоприймальними пристроями. Наприклад, цілком перспективним є можливість створення малогабаритного детектора нейтронів для портативних приладів виявлення РР, використовуючи систему «сцинтилятор-фотодіод».

Також можливе створення достатньо малогабаритних детекторів, використо-

вуючи систему «сцинтилятор-ФЕП» для стаціонарних систем виявлення. Наприклад, заміна традиційно застосовуваних у цей час детекторних систем на основі лічильників  $^3\text{He}$  зі сповільнювачем для виявлення нейтронів чотирма детекторами на основі оксидного сцинтилятора CWO  $\text{Ø}40 \times 40$  мм дозволяє зберегти необхідні параметри виявлення нейтронів при істотному зменшенні габаритів і ваги детек-

тора.

Одночасне використання цих детекторів для виявлення гамма-випромінювання дозволяє істотно, приблизно на два порядки, збільшити ймовірність виявлення трансуранових матеріалів за рахунок підвищення чутливості детектора в діапазоні малих енергій гамма-випромінювання [7].

Таблиця 3. Результати оцінки ймовірності реєстрації гамма-квантів в еквівалентному енергетичному діапазоні для електронів (гамма-квантів) (20-300 кеВ) при реєстрації швидких нейтронів на ядрах сцинтиляторів GSO, BGO, CWO, ZnWO з урахуванням поширеності ізотопів.

Ізотоп	Поширеність, %	Імовірність реєстрації
Ge-70	20,5	0,063
Ge-72	27,4	0,102
Ge-73	7,7	0,074
Ge-74	36,5	0,133
Ge-76	7,7	0,032
<b>Усього по елементу:</b>		<b>0,404</b>
Cd-110	12,5	0,047
Cd-111	12,8	0,051
Cd-112	24,0	0,097
Cd-113	12,2	0,121
Cd-114	28,7	0,134
Cd-116	7,5	0,032
<b>Усього по елементу:</b>		<b>0,481</b>
Gd-155	14,7	0,146
Gd-156	20,47	0,076
Gd-157	15,68	0,125
Gd-158	24,87	0,077
Gd-160	21,9	0,108
<b>Усього по елементу:</b>		<b>0,533</b>
W-182	26,4	0,090
W-183	14,4	0,141
W-184	30,6	0,179
W-186	28,4	0,180
<b>Усього по елементу:</b>		<b>0,591</b>
Zn-64	48,6	0,114
Zn-66	27,9	0,061
Zn-68	18,8	0,050
<b>Усього по елементу:</b>		<b>0,225</b>

Особливо перспективним є застосування цих детекторів у пішохідних системах виявлення, де забезпечуються високі параметри виявлення гамма-випромінювання в області високих енергій (300-3000 кеВ) без використання органічних скінтіляторів великого об'єму, і одночасного ефективного виявлення трансуранових матеріалів і джерел швидких нейтронів.

Оскільки основний внесок (до 80 %) у гамма-випромінюванні, що виникає в скінтіляторі в результаті взаємодії нейтронів з речовиною скінтілятора, перебуває в діапазоні енергій 20-300 кеВ, то з'являється можливість досить упевненої ідентифікації нейтронного випромінювання на фоні гамма-випромінювання середніх і високих енергій з застосуванням захисту зі свинцю й відповідного алгоритму обробки первинних даних.

Відомо [8,9], що оксидні скінтілятори CWO й GSO мають високу (до 67%) ефективність реєстрації теплових і резонансних нейтронів. Тому повну ефективність реєстрації нейтронів детекторами з використанням цих скінтіляторів у системах виявлення можна істотно підвищити за рахунок підвищення ефективності реєстрації теплових нейтронів, помістивши детектор у сповільнювач, про що свідчать дані, наведені в колонках 3 й 4 таблиці 1. Використання джерела нейтронів зі сповільнювачем (що еквівалентно розміщенню детектора в сповільнювач) істотно збільшує ефективність реєстрації нейтронів (наприклад, до 80 % для детектора на основі GSO). Порівняльні виміри залежності чутливості детекторів від розміру скінтілятора показали, що при товщині скінтілятора (CWO) більше 10 мм, чутливість детектора зростає пропорційно площі детектора, а не об'єму скінтілятора.

Оксидні скінтілятори містять у своєму складі наступні ядра: BGO - Bi, Ge, O; GSO - Ge, S, O; CWO - Cd, W, O; ZWO - Zn, W, O; ZnSe - Zn, Se. У роботі [10] проаналізовані енергетичні рівні стабільних ядер, що входять до складу

оксидних скінтіляторів з урахуванням їх поширеності, ймовірностей переходів в основний стан, які можуть реєструватися при нейтронному порушенні  $^{239}\text{Pu}$ -Be джерела:  $^{70}\text{Ge}$ ,  $^{72}\text{Ge}$ ,  $^{73}\text{Ge}$ ,  $^{74}\text{Ge}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ;  $^{110}\text{Cd}$ ,  $^{111}\text{Cd}$ ,  $^{112}\text{Cd}$ ,  $^{113}\text{Cd}$ ,  $^{114}\text{Cd}$ ,  $^{116}\text{Cd}$ ;  $^{155}\text{Gd}$ ,  $^{156}\text{Gd}$ ,  $^{157}\text{Gd}$ ,  $^{158}\text{Gd}$ ,  $^{160}\text{Gd}$ ;  $^{182}\text{W}$ ,  $^{183}\text{W}$ ,  $^{184}\text{W}$ ,  $^{186}\text{W}$ ;  $^{76}\text{Se}$ ,  $^{77}\text{Se}$ ,  $^{78}\text{Se}$ ,  $^{80}\text{Se}$ ,  $^{81}\text{Se}$ ,  $^{64}\text{Zn}$ ,  $^{66}\text{Zn}$ ,  $^{68}\text{Zn}$ ,  $^{209}\text{Bi}$ ,  $^{28}\text{Si}$ . Результати аналізу використовуються для побудови моделі процесу взаємодії й уточнення алгоритму реєстрації швидких нейтронів. Модель оцінює ймовірність появи гамма-відгуку на один нейтрон у робочому вікні спектрометра (20-300 кеВ). Залежність перетину фотоефекта від заряду ядра приймалася рівною  $\sigma \sim Z^{4.2}$ . При аналізі середня енергія нейтронів  $^{239}\text{Pu}$ -Be джерела приймалася рівною 4,5 МеВ. Енергія збудження ядер при цьому приймалася рівною  $\sim 2,5$  МеВ.

У табл. 3 наведені оцінені ймовірності реєстрації гамма-квантів в еквівалентному енергетичному діапазоні для електронів (гамма-квантів) (20-300 кеВ) при реєстрації швидких нейтронів з реакції (n, n' $\gamma$ ) на деяких ядрах скінтіляторів GSO, BGO, CWO, ZWO з урахуванням поширеності ізоотопів.

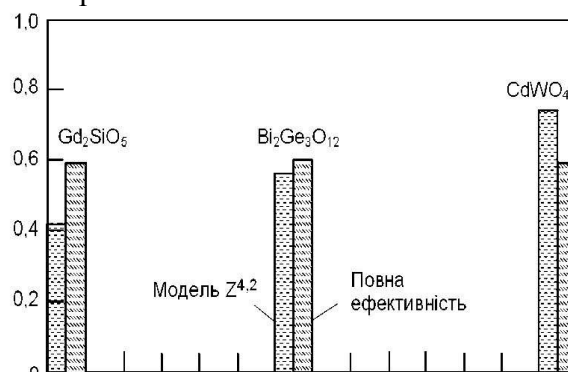


Рис. 4. Результати порівняння оціненої та експериментальної ефективності реєстрації швидких нейтронів оксидними скінтіляторами.

На рис. 4 порівнюються результати оціненої й експериментальної ефективностей реєстрації швидких нейтронів деякими оксидними скінтіляторами. Задовільне узгодження експериментальних даних з модельними вказує на те, що реєстрація швидких нейтронів оксидними

сцинтиляторами здійснюється в основному на основі механізмів непружного розсіювання.

### Висновки

Результати експерименту підтверджують можливість одержання високої ефективності реєстрації швидких нейтронів при використанні (n, n' $\gamma$ )-реакцій як основного механізму взаємодії з ядрами оксидних сцинтиляторів.

Висока ефективність реєстрації швидких нейтронів оксидними сцинтиляторами, що досить слабо залежить від типу сцинтилятора, дозволяє залежно від поставленого завдання, використовувати оксидні сцинтилятори різного типу й розмірів з відповідними їм фотоприймальними пристроями. Перспективною є

можливість створення малогабаритного детектора нейтронів для портативних приладів виявлення радіоактивних речовин, використовуючи систему «сцинтилятор-фотодіод» та малогабаритних детекторів для стаціонарних систем виявлення на основі системи «сцинтилятор-ФЕП».

Особливо перспективним є застосування цих детекторів у пішохідних системах виявлення, де забезпечуються високі параметри виявлення гамма-випромінювання в області високих енергій (300-3000 кеВ) без використання органічних сцинтиляторів великого об'єму, і одночасного ефективного виявлення трансуранових матеріалів і джерел швидких нейтронів.

### Література

1. А.В.Горев, А.Б.Громов, А.И.Иванов и др. Устройство для обнаружения радиоактивных материалов. Заявка на изобретение № 98101348/25 (1998) 4 с.
2. Jt.C.Scromswold, B.D.Milbrath, D.L.Stephens, L.C.Todd, F.L.Hansen, R.T.Kouzes, "Field Test of a NaI(Tl)-Based Vehicle@ Portable Monitor", Pucefic Nothwest National Laboratory, USA, IEEE Conference, Rome (2004) p.17.
3. Е.Л.Столярова. Нейтронные спектрометры и их применения в прикладных задачах. М.: Атомиздат (1969) 240 с.
4. И.В.Гордеев, Д.А.Кардашев, А.В.Мальшев. Справочник по ядерно-физическим константам для расчетов реакторов. М.: Атомиздат (1960) 280 с.
5. B.V.Grinev, V.R.Lubinsky, V.G.Senchishin, V.N.Lebedev, V.V.Nekrasov, L.A.Piven', Tu.A. Borodenko, "Radiometric system for detection of gamma- and neutron radiation", Patent of Ukraine No. 80455, G01T1/00, 3/00. Publ. 25.09.07, Bull.No.15.
6. M.Anelli, G.Battistoni, S.Bertolucci at al., "Measurement and simulation of the neutron response and detection efficiency of a Pb-scintillating fiber calorimeter", NIM, A580 (2007) pp. 368-372.
7. В.В.Некрасов, Л.А.Пивень, А.Ф.Коваль, Ю.А.Бороденко, В.Г.Сенчишин. Стационарная таможенная система обнаружения делящихся и радиоактивных материалов на основе комбинированного блока детектирования. «Восточно-европейский журнал передовых технологий», №4/2 (16), (2005).
8. V.Ryzhikov, L.Nagorna, S.Burachas, L.Piven', E.Danshin, O.Zelenskaya, V.Chernikov, "Detection of Thermal and Resonance Neutrons Using Oxide Scintillators", IEEE Transactions On Nuclear Science, vol. 47, No. 6, December (2000).
9. V.D.Ryzhikov, S.F.Burachas, V.G.Volkov et al. Neutron flux measurements using "scintillator-photodiode-preamplifier system and new types scintillators. - Proceeding of International



Conference "Neutrons in Research and Industry". (Crete, Greece 1996), p. 586-595.

10. C. Michael Lederer and Virginia S. Shirley, Table of Isotopes, 7th Edition Editors, Both of Lawrence Berkeley Laboratory (1978) 1632 p

## **NEUTRON DETECTORS BASED ON INORGANIC SCINTILLATORS**

**V.Ryzhikov, B.Grinyov, I.Zenya, E.Lysetska, L.Nagornaya,  
G.Onyshchenko, L.Piven', N.Starzhinskiy**

Institute for Scintillation Materials NAS of Ukraine, 60 Lenin Ave., 61001,  
Kharkov, Ukraine  
e-mail: ns@isc.kharkov.com

Efficiency of detection of neutrons with energies  $E_n \sim 0,0025$  eV-10 MeV by scintillators of CWO, BGO, GSO, ZWO types, which are used in systems for detection of fissionable radioactive substances, is studied. The most probable mechanism of fast neutron detection is discussed, based on inelastic scattering reaction ( $n, n'\gamma$ ) on the scintillator nuclei. The experimentally measured detection efficiency values are compared to model estimations.

