

А. Д. Скорбун¹, М. І. Панасюк¹, Б. М. Сплошной², О. Ю. Зеленський²

¹ Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль

² Метрологічна служба ДСП "Чорнобильський спецкомбінат", Чорнобиль

ОСОБЛИВОСТІ ЕФЕКТИВНОСТЕЙ РЕЄСТРАЦІЇ СЦИНТИЛЯЦІЙНИХ ДЕТЕКТОРІВ ІЗ СВИНЦЕВИМ ЗАХИСТОМ

Досліджено енергетичні залежності ефективностей сцинтиляційних детекторів NaI(Tl), особливістю конструкції яких є наявність навколо кристала свинцевого екрана з алюмінієвою діафрагмою. Виявлено, що на відміну від звичайного зменшення ефективності із зростанням енергії ефективність досліджених детекторів зростає, починаючи з енергій ~ 1200 кеВ.

Ключові слова: гамма-випромінювання, детектор, ефективність, свинцевий екран.

Вступ

При виконанні досить стандартної процедури – визначення ефективності детекторів гамма-спектрометра, було виявлено нестандартну залежність їхньої ефективності від енергії.

Детектори, що далі будуть називатися ДЗ і Д4, були виготовлені фірмою "АтомКомплексПрилад" для проведення гамма-спектрометричних вимірювань у польових умовах. Це обумовило особливості їхньої конструкції (рис. 1). По-перше, їх можна використовувати для вимірювань під водою – детектор має міцний герметичний корпус. По-друге, з огляду на особливості ситуації в локальній зоні об'єкта "Укриття", детектори призначено для роботи у високих гамма-полях: окрім товстого корпусу детектора, кристали детекторів мають додаткові свинцеві екрани з алюмінієвими діафрагмами для проходу гамма-випромінювання. Детектори мають однакові конструкції і відрізняються, в основному, геометричними розмірами. Кристали детекторів – це циліндр NaI(Tl) діаметром 16 мм і висотою 20 мм. Схематичне зображення конструкції детектора та розташування джерела на ньому показано на рис. 2.

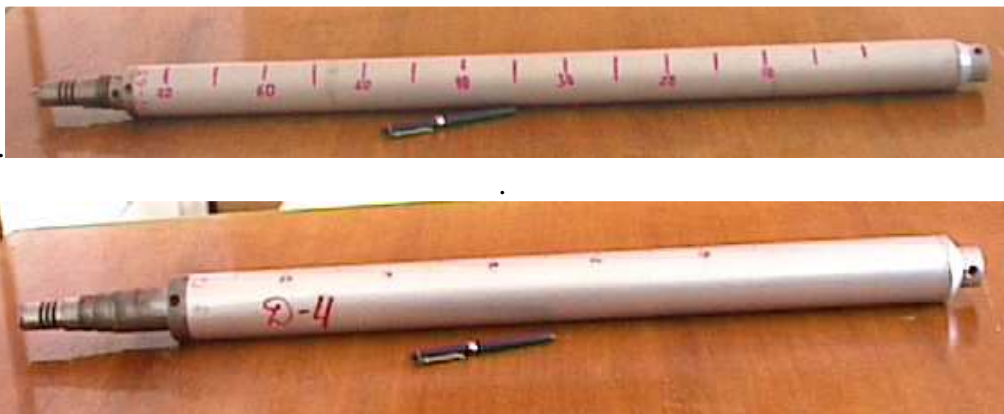


Рис. 1. Загальний вигляд детекторів ДЗ і Д4.

Нестандартна конструкція детекторів обумовила необхідність дослідження їхніх метрологічних параметрів. Усі спектри було одержано за допомогою аналізатора спектрів АБА-П з програмою обробки спектрів AkWin (також виробництва фірми "АтомКомплекс-Прилад").

Калібрування спектрометра по ефективності означає визначення його ефективності для кількох енергій гамма-випромінювання з наступною інтерполяцією результатів на інші значення енергій. Перше питання, що постає, – це наявність метрологічно атестованих джерел гамма-випромінювання. Як відомо, така характеристика детектора, як ефективність, визначається для певної геометрії вимірювань. Для точкового та об'ємного джерел це будуть

© А. Д. Скорбун, М. І. Панасюк, Б. М. Сплошной, О. Ю. Зеленський, 2012

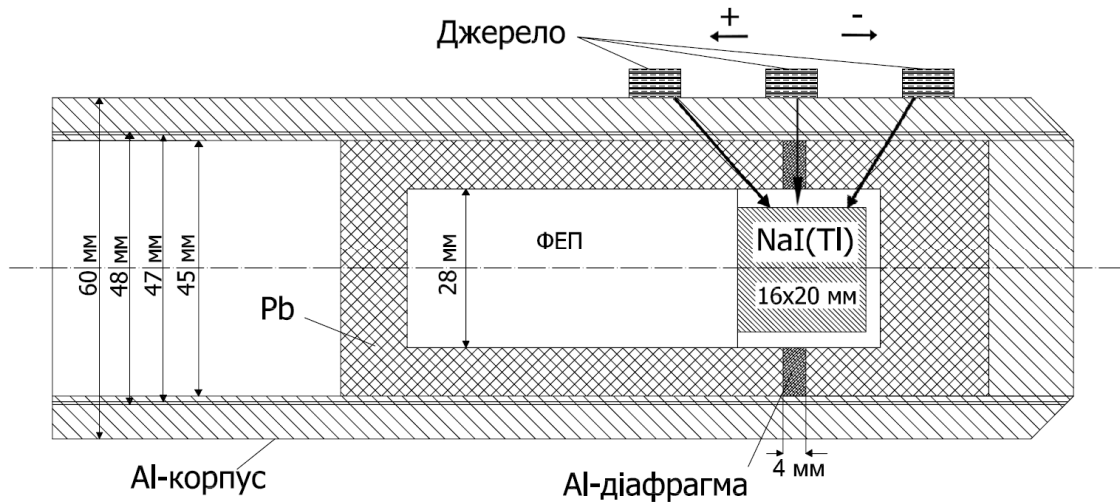


Рис. 2. Геометрія вимірювань ефективності для різних положень джерела відносно центра кристала. Стрілками з позначками "+" і "-" показано напрямок зміщення джерела від центра.

різні величини. Реально існуючі джерела – це набори ОСГИ, які можна використати лише як точкові джерела. Що стосується об'ємних джерел, які б забезпечували геометрію вимірювань, що реалізується при гамма-каротажі свердловин, то такі метрологічно атестовані джерела знайти досить складно.

Визначення ефективності з точковим джерелом. Ефективність детектора у піку повного поглинання (частка нерозсіяного випромінювання, що приймається детектором у заданій геометрії вимірювань) для даної енергії розраховувалася за формулою (МИ 1916-88):

$$\varepsilon_i = \frac{N_{E_i}}{\tau \cdot N_{зовн}} = \frac{S}{A \cdot I \cdot \tau}, \quad (1)$$

де $N_{зовн}$ – зовнішнє гамма-випромінювання в кут 4π (активність джерела із свідчення на джерело іонізуючого випромінювання); $S = N_{E_i}$ – число відліків, зареєстрованих за час набору спектра τ у каналах заданої лінії (площа лінії); A – активність джерела; I – квантовий вихід.

При цих вимірюваннях точкове джерело ОСГИ (^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{60}Co) розташовувалось безпосередньо на детекторі в місці розташування діафрагми. Результати вимірювань: спектр наведено на рис. 3, а графік ефективності – на рис. 4. Невизначеність (похибка) визначення площ ліній дається програмним забезпеченням спектрометра, залежить від якості набраного спектра й у нашому випадку становить 1 - 4 %.

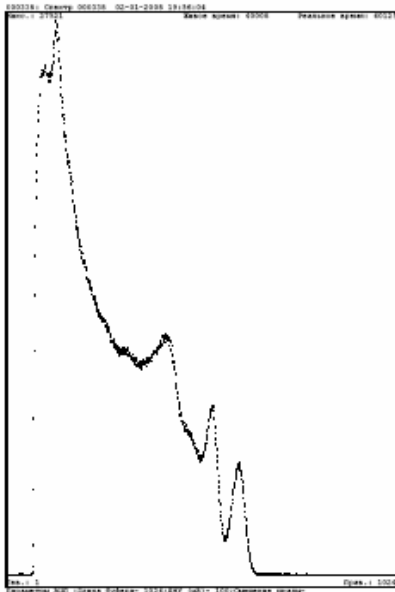


Рис. 3. Гамма-спектр ^{60}Co , одержаний на детекторі ДЗ.

Несподіваним результатом є зростання ефективності для високоенергетичної лінії ^{60}Co відносно низькоенергетичної лінії (як відомо, ефективність як сцинтиляційного, так і напівпровідникового детекторів зменшується з ростом енергії випромінювання [1]). Цей результат багаторазово перевірявся й не є похибкою експерименту. Оскільки лінії ^{60}Co в одному й тому ж спектрі реєструються від одного й того ж джерела, у виразі (1) для ефективності змінюються лише площі цих ліній: S_1 – площа лінії 1173 кеВ, S_2 – площа лінії 1332 кеВ. Тобто фактично спостерігаються зміни відносної інтенсивності ліній. Підкреслимо, що оскільки порівнюються лінії одного й того ж спектра, то при цьому знімається питання про похибки експери-

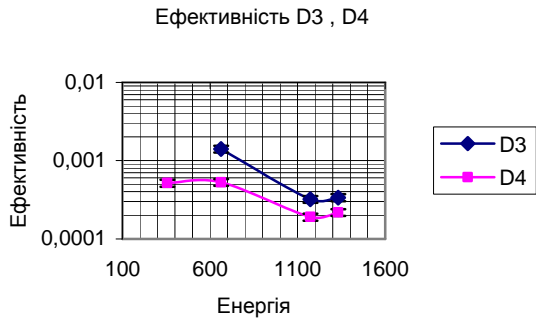


Рис. 4. Криві ефективності для детекторів Д3 і Д4 з джерелами ОСГИ.

результаті виявлено, що із збільшенням зміщення джерела від центра кристала (від діафрагми) ефективність і для низькоенергетичної лінії ^{60}Co і для високоенергетичної зменшується. Результати (рис. 6) аналогічних вимірювань із джерелом ^{137}Cs (лінія 662 кеВ) підтверджують логічний висновок, що ефективність зменшується у зв'язку із збільшенням шляху, який гамма-випромінювання проходить у свинцевому екрані.

І, нарешті, для перевірки гіпотези про вплив конструкції захисту на залежність ефективності від енергії було проведено прямий експеримент. Детектор Д3 було розібрано, видалено захист і джерело (^{60}Co з набору ОСГИ) розміщено практично на кристалі. Е такій геометрії експерименту співвідношення S_1/S_2 виявилось більшим одиниці й рівним 1,03.

Визначення ефективності реєстрації в об'ємній геометрії. Одержані вище результати вимірювання ефективності свердловинних детекторів із точковим джерелом непридатні для використання (розрахунків активності ґрунтів) при вимірюваннях у свердловинах, де джерелом є радіоактивно забруднений ґрунт, тобто в об'ємній геометрії. Тому було проведено також вимірювання ефективності для об'ємних джерел.

Однак, як уже згадувалося, метрологічних джерел гамма-випромінювання, які б відповідали геометрії вимірювань у свердловинах, не існує. А особливий інтерес з точки зору перевірки одержаної нестандартної залежності ефективності реєстрації від енергії викликає поведінка кривої ефективності в області енергій, вищих за 1300 кеВ. В якості першого наближення до об'ємного джерела було використано метрологічні джерела для фантому людини з радіонуклідами ^{137}Cs і ^{60}Co , що являють собою стрижні з епоксидної смоли з рівномірно розподіленими в них радіонуклідами (див. фото і схему геометрії вимірювань на рис. 7), а також порошок хімічно чистого КСІ, який є стандартним джерелом для радіонукліда ^{40}K з енергією випромінювання 1460 кеВ. Об'єм порошка КСІ дорівнював об'єму фантомів, його

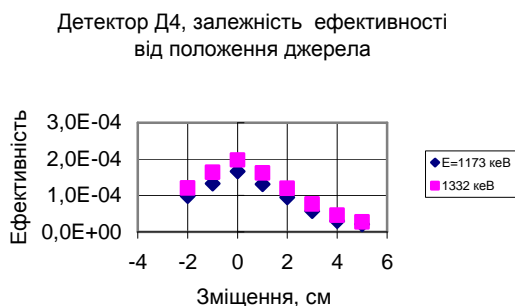


Рис. 5. Залежність ефективності для енергій 1173 і 1332 кеВ (лінії ^{60}Co) від величини джерела від центра кристала (діафрагми). Детектор Д4.

менту, які пов'язані з відтворенням точної геометрії експерименту, чутливістю чи нестабільністю приладів тощо.

Нестандартна залежність ефективності детектора від енергії випромінювання стимулювала проведення додаткових експериментів. Можливою причиною появи цього ефекту може бути наявність екрана навколо детектора. Тому було досліджено залежність ефективності від розташування джерела випромінювання ^{60}Co відносно центра кристала детектора (діафрагми).

Схему розташування показано на рис. 2, а результати вимірювань - на рис. 5. У ре-

зультаті виявлено, що із збільшенням зміщення джерела від центра кристала (від діафрагми) ефективність і для низькоенергетичної лінії ^{60}Co і для високоенергетичної зменшується. Результати (рис. 6) аналогічних вимірювань із джерелом ^{137}Cs (лінія 662 кеВ) підтверджують логічний висновок, що ефективність зменшується у зв'язку із збільшенням шляху, який гамма-випромінювання проходить у свинцевому екрані.

І, нарешті, для перевірки гіпотези про вплив конструкції захисту на залежність ефективності від енергії було проведено прямий експеримент. Детектор Д3 було розібрано, видалено захист і джерело (^{60}Co з набору ОСГИ) розміщено практично на кристалі. Е такій геометрії експерименту співвідношення S_1/S_2 виявилось більшим одиниці й рівним 1,03.

Визначення ефективності реєстрації в об'ємній геометрії. Одержані вище результати вимірювання ефективності свердловинних детекторів із точковим джерелом непридатні для використання (розрахунків активності ґрунтів) при вимірюваннях у свердловинах, де джерелом є радіоактивно забруднений ґрунт, тобто в об'ємній геометрії. Тому було проведено також вимірювання ефективності для об'ємних джерел.

Однак, як уже згадувалося, метрологічних джерел гамма-випромінювання, які б відповідали геометрії вимірювань у свердловинах, не існує. А особливий інтерес з точки зору перевірки одержаної нестандартної залежності ефективності реєстрації від енергії викликає поведінка кривої ефективності в області енергій, вищих за 1300 кеВ. В якості першого наближення до об'ємного джерела було використано метрологічні джерела для фантому людини з радіонуклідами ^{137}Cs і ^{60}Co , що являють собою стрижні з епоксидної смоли з рівномірно розподіленими в них радіонуклідами (див. фото і схему геометрії вимірювань на рис. 7), а також порошок хімічно чистого КСІ, який є стандартним джерелом для радіонукліда ^{40}K з енергією випромінювання 1460 кеВ. Об'єм порошка КСІ дорівнював об'єму фантомів, його

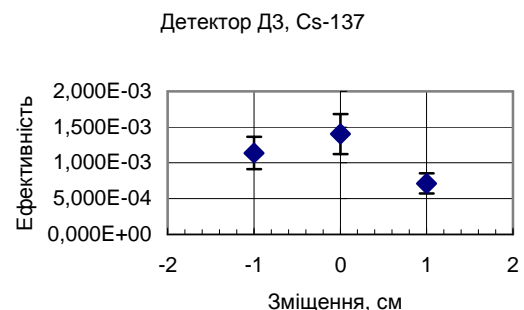


Рис. 6. Залежність ефективності для енергії 662 кеВ (лінія ^{137}Cs) від величини зміщення джерела від діафрагми. Детектор Д3.

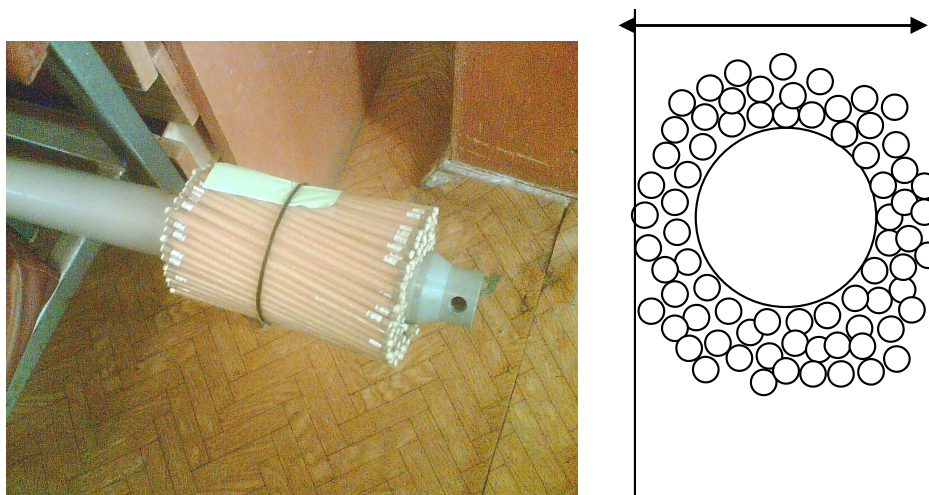


Рис. 7. Геометрія вимірювань із джерелами для фантому людини в якості об'ємного джерела.

питома активність прийнята рівною 16,45 кБк/кг. Характеристики фантомів на дату вимірювань були такі: ^{137}Cs - 177 шт., 1440 Бк/шт.; ^{60}Co - 180 шт., 239 Бк/шт.

Одержану криву ефективності показано на рис. 8. Основний результат залишився тим самим – крива ефективності має мінімум в області енергій 1100 - 1300 кеВ. Хоча співвідношення ефективностей високоенергетичної до низькоенергетичної ліній кобальту стало трохи ближчим до одиниці (що й очікувалося, беручи до уваги результати, показані на рис. 5 - 6), однак, як бачимо, крива все ще загнута догори, включаючи ефективність для лінії ^{40}K . Зауважимо, що наявність ефекту збільшення ефективності і для лінії ^{40}K знімає гіпотезу, що цей ефект пов'язано з особливостями розпаду (каскадні ефекти) ^{60}Co . Збільшення комптонівського фону за рахунок більш високоенергетичних ліній буде впливати не на сам ефект, а лише на точність визначення площ ліній ^{60}Co .

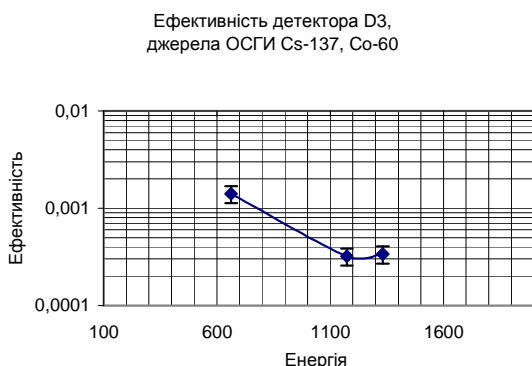


Рис. 8. Ефективності детектора ДЗ для об'ємних джерел випромінювання.

ра, єдиним змінним параметром є площа лінії і, відповідно, ефект збільшення ефективності високоенергетичної лінії зводиться до аномального збільшення інтенсивності лінії 1332 кеВ по відношенню до лінії 1173 кеВ. Тому відразу виникає питання про можливість пояснення цього ефекту простою зміною співвідношень інтенсивностей ліній за рахунок поглинання у свинці, оскільки коефіцієнт поглинання зменшується із зростанням енергії і для лінії 1173 кеВ він більший, ніж для лінії 1332 кеВ. Для перевірки цього було виконано прямі експерименти: на сцинтиляційному спектрометрі повірочної лабораторії метрологічної служби ДСП "Чорнобильський спецкомбінат" було визначено ефективності детектора при використанні точкових джерел ОСГИ без екрана і при наявності свинцевого екрана товщиною 2 см (відстань між джерелом і детектором залишалася постійною). Результати вимірювань наведено в табл. 1, а відповідні графіки – на рис. 9. Оскільки нас цікавить зміна ефективності реєстрації

Обговорення результатів

Підсумуємо одержані результати: ефективність детекторів спеціальної конструкції – зі свинцевим захистом з алюмінієвою діафрагмою для проходу гамма-випромінювання – зростає для енергій $E_\gamma > 1,25 \text{ MeV}$, що еквівалентно зменшенню коефіцієнта поглинання для цих енергій або збільшенню когерентного розсіяння.

Із формули (1) випливає, що, оскільки аналізуються дві лінії одного й того ж спектра, єдиним змінним параметром є площа лінії і, відповідно, ефект збільшення ефективності високоенергетичної лінії зводиться до аномального збільшення інтенсивності лінії 1332 кеВ по відношенню до лінії 1173 кеВ.

відносно лінії 1173 кеВ, на правому графіку рис. 9 для тих самих даних величини ефективності домножено на постійну величину так, щоб ефективності для лінії 1173 кеВ співпадали. З цих графіків видно, що такої яскравого збільшення ефективності при наявності свинцевого екрана, як на рис. 8, немає.

Зробимо також елементарні теоретичні оцінки (табл. 2). Розрахуємо поглинання у свинцевих екранах різної товщини для енергій випромінювання 662 кеВ (коефіцієнт поглинання $1,185 \text{ см}^{-1}$), 1173 кеВ (коефіцієнт поглинання $0,680 \text{ см}^{-1}$) та 1332 кеВ (коефіцієнт поглинання $0,621 \text{ см}^{-1}$).

Таблиця 1. Результати вимірювань енергетичної ефективності з і без свинцевого екрана.

Нуклід	Енергія, кеВ	Ефективність	
		без екрана	з екраном
^{137}Cs	662	0,009073	0,000838
^{60}Co	1173	0,00217	0,000544
	1323	0,00138	0,000387

значення ефективностей, узятих з табл. 1 (результат - три правих колонки в табл. 2). Оскільки нас цікавить відносна зміна інтенсивностей ліній 1173 і 1332 кеВ, нормуємо ці дані так, щоб інтенсивність лінії 1173 кеВ була для всіх товщин екрана однакова. На основі цих даних можна побудувати графіки енергетичних залежностей ефективностей для різних товщин екрана. Результат показано на рис. 10. Для порівняння нанесено також експериментальні дані з табл. 1 та рис. 4.

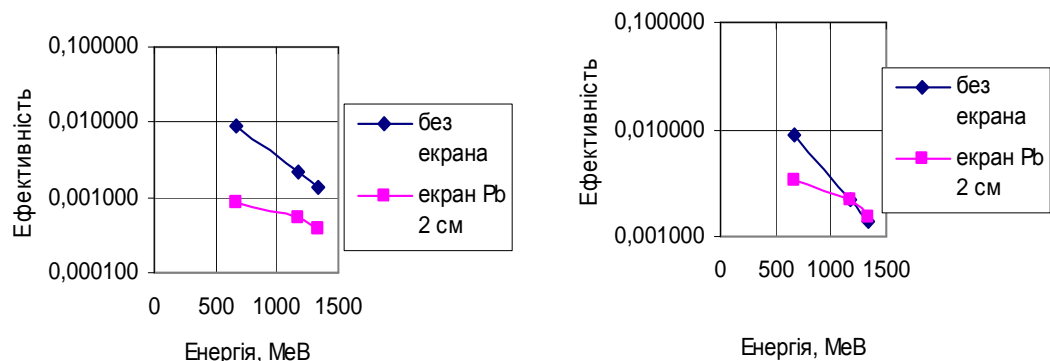


Рис. 9. Експериментальні вимірювання ефективності сцинтиляційного детектора без спеціального екрана та при екрануванні плоскою свинцевою шайбою.

Із цих розрахунків можна зробити два висновки. Перший – хоча відносна ефективність для лінії 1332 кеВ помітно зростає з ростом товщини екрана, одержати перевищення її над лінією 1173 кеВ для даних товщин не вдалося. Другий – хоча відносна інтенсивність лінії 1332 кеВ і зростає, проте якщо взяти до уваги також зміну інтенсивності лінії 662 кеВ, то видно, що енергетична залежність інтенсивностей при наявності екрана не тільки не наближається до форми верхньої кривої з мінімумом, а й взагалі набуває вигляду кривої з максимумом.

Отже, наявність виявленого мінімуму на кривій ефективності не має на сьогоднішній день надійного пояснення. Зауважимо при цьому, що експериментальна залежність для свинцевого екрана товщиною 2 см (жирна лінія) досить добре збігається з результатами розрахунків. Можливо, що такі прості оцінки непридатні для аналізу складних конструкцій типу зображеної на рис. 2, і надійне підтвердження результатів можна одержати при використанні програм типу MCNP, основаних на методах Монте-Карло.

Таблиця 2. Розрахунки відносної інтенсивності ліній ^{60}Co залежно від товщини свинцевого захисту

Товщина екрана, см	Інтенсивність після поглинання у свинцевому екрані			Інтенсивність після екрана, помножена на ефективність		
	Е, МеВ			Е, МеВ		
	0,662	1,1732	1,3325	0,662	1,1732	1,3325
0	1	1	1	0,00907	0,00217	0,0014
0,05	0,942	0,967	0,969	0,00855	0,00210	0,0013
0,1	0,888	0,934	0,940	0,00806	0,00203	0,0013
0,2	0,789	0,873	0,883	0,00716	0,00189	0,0012
0,4	0,623	0,762	0,780	0,00565	0,00165	0,0011
0,6	0,491	0,665	0,689	0,00446	0,00144	0,0010
0,8	0,388	0,580	0,608	0,00352	0,00126	0,0008
1	0,306	0,507	0,537	0,00277	0,00110	0,0007
1,2	0,241	0,442	0,475	0,00219	0,00096	0,0007
1,4	0,190	0,386	0,419	0,00173	0,00084	0,0006
1,6	0,150	0,337	0,370	0,00136	0,00073	0,0005
1,8	0,118	0,294	0,327	0,00108	0,00064	0,0005
2	0,093	0,257	0,289	0,00085	0,00056	0,0004
2,2	0,074	0,224	0,255	0,00067	0,00049	0,0004
2,4	0,058	0,195	0,225	0,00053	0,00042	0,0003
3	0,029	0,130	0,155	0,00026	0,00028	0,0002
4	0,009	0,066	0,083	0,00008	0,00014	0,0001

Зауважимо також, що існують й інші роботи, де експериментально показано, що за певних умов розсіювання гамма-випромінювання відхиляється від загальноприйнятої теорії. У [2 - 4] спостерігалось зменшення поглинання для нерозсіяного випромінювання лінії 1332 кеВ ^{60}Co майже в 10 разів порівняно з теоретичним при проходженні через захист у вигляді свинцевих куль діаметром 40 - 60 см (джерело в центрі кулі) та в інших широких геометріях. Висновок з цих експериментів був таким, що для геометрії широкого пучка в табли-

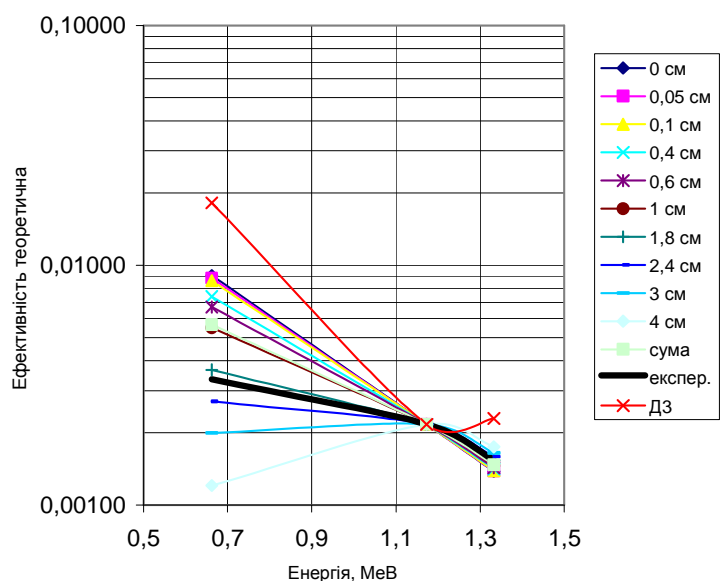


Рис. 10. Результати розрахунків ефективності залежно від товщини екрана. Наведено також експериментальні дані для детектора ДЗ (верхня крива) і дані з табл. 1 (жирна лінія). Усі дані нормовано на інтенсивність лінії 1173 кеВ без екрана.

чних даних занижено внесок перерізу когерентного розсіяння й відповідно завищено внесок перерізу фотоелектричного поглинання в повний переріз взаємодій фотонів у області енергії $E_\gamma = 1,33$ МеВ, та висловлено думку, що константи проходження гамма-випромінювання через речовину вимагають подальших досліджень.

При спектрометричних вимірюваннях у високих гамма-полях використання сцинтиляційних детекторів потребує їхнього спеціального захисту. Виявлення нестандартної залежності ефективності від енергії вимагає проведення калібрувальних робіт з обов'язковим розробленням спеціальних методик та засобів для калібрування. Практичний результат проведених вимірювань полягає в рекомендації: при створенні детекторів із потужним свинцевим захистом чи створенні коліматорів калібрування по ефективності повинні проводитися для конструкції у зборі.

Автори вдячні А. М. Берлізову за обговорення результатів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Волков Н. Г., Христофоров В. А., Ушаков Н. П. Методы ядерной спектрометрии. - М: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Трыков Л.А., Колеватов Ю.И., Семенов В.П. Аномалии в прохождении гамма-излучения источника ^{60}Co через свинец, висмут и уран // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. - 1988. – Вып. 2. – С. 26 – 33.
3. Колеватов Ю. И., Семенов В. П., Трыков Л. А. Спектрометрия нейтронов и гамма-излучения в радиационной физике. - М.: Энергоатомиздат, 1991. – 296 с.
4. Trykov L. A. , Dubinin A. A., Chernov V. A. Experimental and computed spectra of neutrons and photons emitted from spherical iron models with a ^{252}Cf source at the center // Atomic Energy. – 2005. – Vol. 98, No 1. – P. 50 - 56.

А. Д. Скорбун, Н. И. Панасюк, Б. Н. Сплошной, О. Ю. Зеленский

ОСОБЕННОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТЕЙ РЕГИСТРАЦИИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ СО СВИНЦОВОЙ ЗАЩИТОЙ

Исследованы энергетические зависимости эффективностей сцинтилляционных детекторов NaI(Tl), особенностью конструкции которых является наличие вокруг кристалла свинцового экрана с алюминиевой диафрагмой для пропускания гамма-излучения. Выявлено, что в отличие от обычного уменьшения эффективности с ростом энергии эффективность исследованных детекторов начинает возрастать, начиная с энергий ~ 1200 кэВ.

Ключевые слова: гамма-излучение, детектор, эффективность, свинцовый экран.

A. D. Skorbun, M. I. Panasiuk, B. M. Sploshnoy, O. Yu. Zelensky

PECULIARITIES OF REGISTRATION EFFECTIVENESS OF SCINTILLATION DETECTORS WITH A LEAD SHIELD

Peculiarities of registration effectiveness of scintillation detectors NaI(Tl), in construction of which there is a thick lead shield around a crystal, with Al diaphragm for gamma rays transmitting have been investigated. It was discovered, that in contrast to usual decreasing of effectiveness with rising of energy, the effectiveness of investigated detectors begin to rise, beginning from energies ~ 1200 keV.

Keywords: gamma rays, detector, effectiveness, lead shield.

Надійшла до редакції 12.07.11