



Енергетичний технічний світловий вихід сцинтиляторів – проблеми оцінювання та альтернативний спосіб їх вирішення

Б.В. Гриньов, Н.Р. Гурджян, О.В. Зеленська, Л.Й. Міцай, В.О. Тарасов

Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України, пр. Науки, 60, 61072, Харків, Україна
papa.mneyan@gmail.com

Анотація

Проведено аналіз недоліків та труднощів, що виникають при оцінюванні енергетичного технічного світлового виходу сцинтиляторів існуючими методами. Описано сучасний альтернативний метод оцінювання енергетичного технічного світлового виходу різних сцинтиляторів, що випускаються Інститутом сцинтиляційних матеріалів НАН України.

Показано можливість оцінювання технічного світлового виходу будь-якого сцинтилятора відносним методом зведення з еталонним сцинтилятором на основі стильбену. Оцінювання проводиться шляхом первісного визначення технічного світлового виходу у стильбенових одиницях і подальшого перерахунку, у фот/МеВ, шляхом врахування технічного світлового виходу (в частках) еталонного зразка сцинтилятора на основі монокристалу стильбену, що дорівнює 0,023, та енергії утворення фотона (y еВ) в сцинтиляційному спалаху конкретного сцинтилятора. Наведено процедуру оцінювання.

Описаним методом проведено оцінювання технічного світлового виходу сцинтиляторів на основі монокристалів NaI(Tl), CsI(Tl), CsWO, BGO, *n*-терфенілу, антрацену, стильбену та пластмасового сцинтилятора. Показано, що при збільшенні технічного світлового виходу сцинтиляторів, у стильбенових одиницях, від 0,26 для BGO до 4,3 для NaI(Tl), їх технічний світловий вихід збільшується від 2500 до 33100 фот/МеВ. Зменшення енергії фотона сцинтиляції від 2,988 ($\lambda=415$ нм) для NaI(Tl) до 2,214 ($\lambda=560$ нм) для CsI(Tl) збільшує технічний світловий вихід останнього до 35300 фот/МеВ. Точність проведених оцінок технічного світлового виходу сцинтиляторів становила 8%.

Ключові слова: сцинтилятор; стильбенова одиниця світлового виходу; енергетичний технічний світловий вихід.

Отримано: 30.11.2021

Відредаговано: 14.02.2022

Схвалено до друку: 23.02.2022

Вступ

Важливим фактором, що впливає на величину сигналу та енергетичну роздільну здатність сцинтиляційних детекторів, є кількість світла, що виходить зі сцинтилятора і потрапляє на фотоприймач. Якість сцинтилятора, пов'язану з кількістю світла, що з нього виходить, характеризують величиною технічного світлового виходу (ТСВ).

ТСВ зазвичай визначається як частка енергії світла, що вийшло зі сцинтилятора, від енергії іонізуючого випромінювання, поглиненої в сцинтиляторі. Раніше, в період СРСР, ТСВ визначали в умовних одиницях світлового виходу (УОСВ). Як одиниця УОСВ служив ТСВ групового еталона на основі монокристалів стильбену розмірами $\varnothing 40 \times 40$ мм. Було розроблено перевіро-

ну схему передавання одиниці світлового виходу, в УОСВ, від зразків вищих розрядів до зразків продукції. Зараз ця перевірочна схема не працює. У зв'язку з розвитком міжнародної інтеграції та розробкою нових науково-технічних програм виникла необхідність у визначенні світлового виходу сцинтиляторів у фізичних енергетичних одиницях "фотонах/МеВ" (фот/МеВ), які широко використовуються в міжнародній практиці.

В одиницях "фот/МеВ" зазвичай визначають так званий абсолютний світловий вихід (АСВ) (*light yield*) сцинтиляційних матеріалів [1–2]. АСВ дає кількість фотонів світла, що виникли всередині сцинтилятора при поглинанні в ньому 1 МеВ енергії. Це важливо для оцінки ефективності одержуваних сцинтиляційних матеріалів. За кордоном АСВ в фот/МеВ визначають, як правило,

для окремих зразків сцинтиляторів незалежними методами. Однак ці методи трудомісткі, мають значну похибку визначення (~15–20%) [3–5]. Вони не підходять для вимірювань великих партій сцинтиляторів. Крім того, передавання одиниці АСВ, вираженого в фот/МеВ, від робочих зразків до зразків продукції методом прямого звірення можливе тільки для зразків з абсолютно однаковою геометрією. В іншому випадку виникають проблеми, пов'язані з визначенням коефіцієнтів світлозбирання в зразках із різною геометрією.

Існуючі методи визначення ТСВ (*light output*) в одиницях “фот/МеВ” також виявилися досить складними і малоприматними для практичної реалізації. ТСВ характеризує так званий “упакований сцинтилятор” (*housed scintillator*) із відбивачем і певною обробкою поверхні. ТСВ дає кількість фотонів світла, що пройшли через вихідне вікно сцинтилятора, при енергії збудження 1 МеВ. Величина ТСВ становить певну частку від АСВ і залежить, крім властивостей матеріалу сцинтилятора, від ефективності світлозбирання в упакованому сцинтиляторі.

У розробленому і гармонізованому стандарті ДСТУ ІЕС 62372:2009 [6] описані методи контролю ТСВ упакованих сцинтиляторів. Для робочих зразків ТСВ оцінюється абсолютним методом, а для продукції – відносним методом звірення з робочими зразками на основі одного і того ж сцинтиляційного матеріалу. Через трудомісткість методу, ТСВ в фот/МеВ для більшості робочих зразків на основі багатьох сцинтиляційних матеріалів дотепер не визначено.

Труднощі абсолютних методів визначення ТСВ можна уникнути, поширивши відносний метод звірення на зразки з відмінних сцинтиляційних матеріалів. Як еталонний сцинтилятор може бути використано той же стильбен, що характеризується високою стабільністю сцинтиляційних характеристик [7]. ТСВ еталонного монокристала стильбену визначався в фот/МеВ декількома незалежними абсолютними методами і склав, в середньому, 0,023 або 7200 фот/МеВ [8]. Сумарна похибка визначення ТСВ не перевищувала 6,5%.

ТСВ будь-якого сцинтилятора може бути визначено шляхом звірення його відгуку з відгуком еталонного сцинтилятора на основі стильбену. Отримане співвідношення відгуків в подальшому коригується (приводиться до однакової спектральної чутливості ФЕП) шляхом урахування коефіцієнтів спектральної нормалізації та середніх енергій фотонів досліджуваного й еталонного сцинтиляторів.

Мета статті

Метою роботи був розвиток відносного методу звірення при визначенні ТСВ зразків, які

відрізняються від еталонного сцинтилятора своїм сцинтиляційним матеріалом.

Теоретичні основи

За визначенням, ТСВ сцинтилятора C у частках енергії збудження визначається з виразу

$$C = \frac{L_{ph}}{E}, \quad (1)$$

де: L_{ph} – сумарна енергія фотонів, які пройшли через вихідне вікно сцинтилятора, у еВ; E – енергія, що виділяється іонізуючою часткою в сцинтиляторі, у МеВ.

При поглинанні сцинтилятором енергії E_0 , що дорівнює 1 МеВ, ТСВ сцинтилятора, у фот/МеВ, оцінюється за формулою:

$$C_{ph} = \frac{E_0}{e_{ph}} C = \frac{10^6}{e_{ph}} C, \quad (2)$$

де: e_{ph} – середня енергія фотона ($h\nu$) у сцинтиляційному спалаху для даного сцинтилятора, у еВ, яка визначається [9] з виразу:

$$e_{ph} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1236}{\lambda}, \quad (3)$$

де: h – стала Планка; c – швидкість світла у вакуумі; λ – середня довжина хвилі спектра люмінесценції сцинтилятора, у нм.

Знаючи величину C випробуваного сцинтилятора, у частках або відсотках, можна визначити величину його C_{ph} , у фот/МеВ, за формулою (2). Якщо C , в частках або відсотках, випробуваного сцинтилятора невідомо, то спочатку визначається ТСВ сцинтилятора в одиницях ТСВ стильбену, $C_{st.u}$, а потім C_{ph} , у фот/МеВ, за формулою:

$$C_{ph} = \frac{10^6 C_{st} C_{st.u}}{e_{ph}} = \frac{0,023 \cdot 10^6 C_{st.u}}{e_{ph}}, \quad (4)$$

де: C_{st} – ТСВ еталонного сцинтилятора на основі стильбену, у частках, що дорівнює 0,023.

Для визначення $C_{st.u}$ необхідно знайти відношення f відгуків (амплітуд сигналів) від сцинтилятора, який випробується, та еталонного сцинтилятора на основі стильбену і скорегувати це відношення на величину коефіцієнта спектральної нормалізації L , що вводиться для забезпечення єдності вимірювань ТСВ:

$$C_{st.u} = \frac{f}{1,38} LC_{0st}, \quad (5)$$

де: 1,38 – коефіцієнт перерахунку, який обумовлений різними механізмами реєстрації гамма-випромінювання ^{137}Cs неорганічними (по піку повного поглинання з $E_\gamma = 662$ кеВ) та органічними (по краю комптонівського розподілу з $E_C = 477$ кеВ) сцинтиляторами; C_{0st} – ТСВ еталонного сцинтилятора на основі стильбену, що прийнятий за 1.

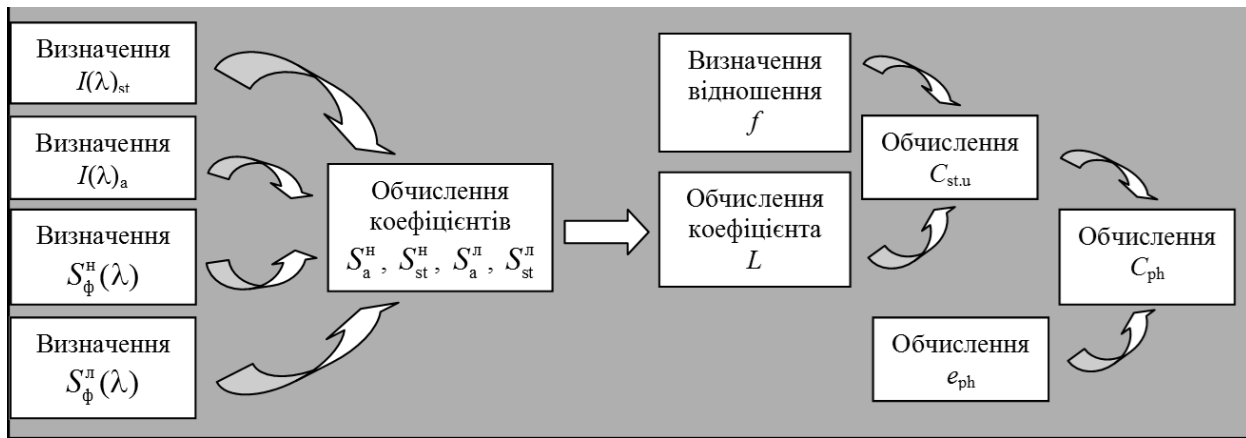


Рис. 1. Схема визначення ТСВ скінтіляторів у фот/МеВ

Коефіцієнт спектральної нормалізації визначає ступінь узгодженості спектральних характеристик скінтілятора та фотокатода ФЕП і обчислюється за формулою:

$$L = \frac{S_a^H \cdot S_{st}^\Pi}{S_{st}^H \cdot S_a^\Pi} = \frac{\int I(\lambda)_a S_\phi^H(\lambda) d\lambda}{\int I(\lambda)_a d\lambda} \cdot \frac{\int I(\lambda)_{st} S_\phi^\Pi(\lambda) d\lambda}{\int I(\lambda)_{st} d\lambda}, \quad (6)$$

де: S_a^H , S_{st}^H , S_a^Π , S_{st}^Π – коефіцієнти спектрального узгодження для скінтілятора, який випробується, та еталонного скінтілятора на основі стильбену для нормалізованого та лабораторного ФЕП відповідно; λ – довжина хвилі, у нм; $I(\lambda)_{st}$ – відносна спектральна інтенсивність світіння (люмінесценції) еталонного скінтілятора на основі стильбену; $I(\lambda)_a$ – відносна спектральна інтенсивність світіння (люмінесценції) скінтілятора, який випробується; $S_\phi^H(\lambda)$ – відносна спектральна чутливість нормалізованого ФЕП (з усередненою спектральною характеристикою типу 500 К); $S_\phi^\Pi(\lambda)$ – відносна спектральна чутливість лабораторного (використовуваного в експерименті) ФЕП.

Схему визначення C_{ph} скінтіляторів зображено на рис. 1.

Об'єкти дослідження та експеримент

Визначався ТСВ, C_{ph} , у фот/МеВ, циліндричних скінтіляторів на основі монокристалів NaI(Tl), CsI(Tl), CWO, BGO, *n*-терфенілу, антрацену, стильбену та пластмасового скінтілятора (ПС). Розміри NaI(Tl), CsI(Tl) та еталонного скінтілятора на основі стильбену становили $\varnothing 40 \times 40$ мм, CWO – $\varnothing 40 \times 35$ мм, BGO – $\varnothing 30 \times 50$ мм, *n*-терфенілу, антрацену та ПС – $\varnothing 40 \times 16$ мм, $\varnothing 40 \times 20$ мм та $\varnothing 45 \times 20$ мм відповідно. Зовнішній вигляд скінтіляторів зображено на рис. 2. Вимірювальна апаратура та форма амплітудних спектрів, що одержуються при вимірюваннях, описані у роботі [10].

Вимірювання проводилися з використанням ФЕП R1307 при збудженні скінтіляторів джерелом гамма-випромінювання ^{137}Cs . Для розрахунку коефіцієнтів спектральної нормалізації відносні спектральні характеристики скінтіляторів та ФЕП бралися з каталогів виробника [11–12] та роботи [13]. Отримані з літературних джерел спектри радіолюмінесценції скінтіляторів у поєднанні

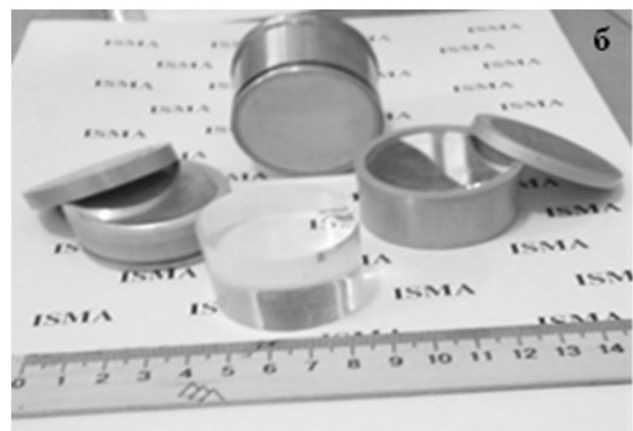


Рис. 2. Зовнішній вигляд скінтіляторів, які випробувувалися: а) неорганічні скінтілятори: зліва направо – NaI(Tl), CsI(Tl), BGO, CWO; б) органічні скінтілятори: зліва направо – *n*-терфеніл, стильбен, антрацен, ПС

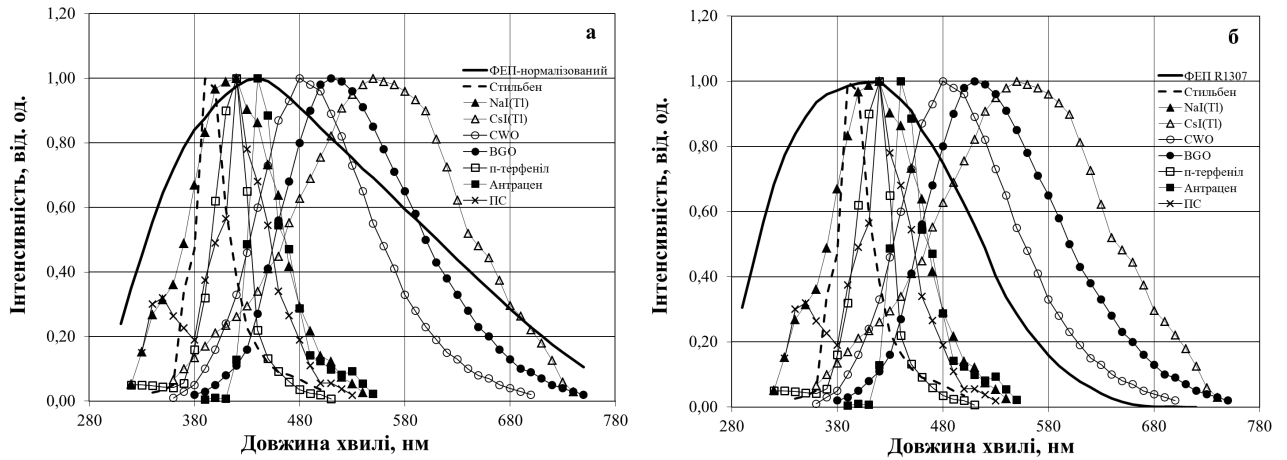


Рис. 3. Спектри світіння сцинтиляторів: а) у поєднанні зі спектром чутливості нормалізованого ФЕП; б) у поєднанні зі спектром чутливості ФЕП R1307

зі спектральною чутливістю нормалізованого [14] та лабораторного (R1307) ФЕП зображені на рис. 3.

Результати та обговорення

З рис. 3 видно, що спектральна чутливість нормалізованого ФЕП краще узгоджується зі спектральними характеристиками всіх сцинтиляторів, ніж спектральна чутливість ФЕП R1307. Обчислення коефіцієнтів спектральної нормалізації дозволяло врахувати відмінності у спектральних характеристиках сцинтиляторів та ФЕП і забезпечити єдність вимірювання ТСВ сцинтиляторів у одиницях ТСВ стилбену, $C_{st.u}$, шляхом приведення результатів вимірювання до нормалізованого ФЕП, а потім і C_{ph} , у фот/МеВ.

Результати вимірювання величин f та обчислення величин L , $C_{st.u}$, e_{ph} та C_{ph} для неорганічних сцинтиляторів наведені у табл. 1. Для підтвердження правильності методу в табл. 1 наведені коефіцієнти світлозбирання τ для деяких сцинтиляторів [15], їх АСВ, N_{ϕ} , у фот/МеВ, розрахований на основі значень C_{ph} , що отримані запропонованим методом, та наведений у [16].

З табл. 1 видно, що розраховані значення N_{ϕ} , у фот/МеВ, неорганічних сцинтиляторів узгоджуються з даними, наведеними у [16], тобто запропонований метод визначення C_{ph} сцинтиляторів, у фот/МеВ, працює адекватно.

Результати аналогічних вимірювань та визначень характеристик для органічних сцинтиляторів наведені у табл. 2.

Таблиця 1

Характеристики випробовуваних неорганічних сцинтиляторів

Сцинтилятор	Розмір, мм	λ , нм	$f/1,38$	L	$C_{st.u}$	e_{ph} , еВ	C_{ph} , фот/МеВ	τ	N_{ϕ} , фот/МеВ	
									Розрахунок	[16]
Стильбен	Ø40×40	390	-	-	1	3,179	7200 ± 300 [8]	0,70 ^[8]	-	10300 ^[8]
NaI(Tl)	Ø40×40	415	4,32	0,994	4,29	2,988	33100 ± 2650	0,70 ^[8]	47300	45000
CsI(Tl)	Ø40×40	560	2,70	1,260	3,40	2,214	35300 ± 2820	0,65	54300	56000
CWO	Ø40×25	480	0,77	1,200	0,92	2,583	8200 ± 660	0,45	18200	15800
BGO	Ø30×50	510	0,22	1,177	0,26	2,431	2500 ± 200	0,38	6500	8200

Таблиця 2

Характеристики випробовуваних органічних сцинтиляторів

Сцинтилятор	Розмір, мм	λ , нм	$f/1,38$	L	$C_{st.u}$	e_{ph} , еВ	C_{ph} , фот/МеВ
П-терфеніл	Ø40×16	420	1,78	1,008	1,79	2,952	14000 ± 1100
Антрацен	Ø40×20	445	1,36	1,029	1,40	2,787	11600 ± 900
ПС	Ø45×20	420	0,56	0,985	0,55	2,952	4300 ± 350

Точність (похибка) визначення C_{ph} сцинтиляторів пропонувані методом оцінювалася, виходячи з оцінок точності визначення величин C_{st} , f та L , що входять у формули (4) та (5). Оцінки показали, що точність визначення $C_{st} = 0,023$ становить 6,5%, точність визначення f та L – не менш ніж 2% для кожної величини. Сумарна точність запропонованого методу визначення C_{ph} сцинтиляторів, яку було оцінено за стандартною процедурою, становить 8%.

Висновки

Проведено оцінювання ТСВ сцинтиляторів, у фот/МеВ, запропонованим методом.

Показано, що врахування коефіцієнтів світлозбирання для отриманих значень ТСВ дає оцінки АСВ сцинтиляторів, у фот/МеВ, близькі до літературних даних, тобто запропонований метод працює правильно.

Встановлено, що для всіх сцинтиляторів, які випробувались, значення ТСВ, у фот/МеВ, що визначаються запропонованим методом, збільшуються зі збільшенням ТСВ, у стильбенових одиницях. При близьких значеннях ТСВ, у стильбенових одиницях, зміщення максимуму спектра люмінесценції сцинтилятора в область більш довгих хвиль (зменшення енергії фотона у спалаху) також підвищує величину ТСВ.

Энергетический технический световой выход сцинтилляторов – проблемы оценки и альтернативный способ их решения

Б.В. Гринев, Н.Р. Гурджян, О.В. Зеленская, Л.И. Мицай, В.А. Тарасов

Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, пр. Науки, 60, 61072, Харьков, Украина
nana.mneyan@gmail.com

Аннотация

В работе проанализированы проблемы, возникающие при оценке энергетического технического светового выхода существующими методами. Описан современный альтернативный метод оценки энергетического технического светового выхода различных сцинтилляторов, выпускаемых Институтом сцинтилляционных материалов НАН Украины.

Показана возможность оценивания технического светового выхода любого сцинтиллятора путем относительного сравнения с эталонным сцинтиллятором на основе стильбена, с известным техническим световым выходом. Полученное соотношение откликов пересчитывается в фот/МэВ путем учета технического светового выхода эталонного сцинтиллятора, равного 0,023, и энергии образования фотона конкретного сцинтиллятора.

Проведено оценивание технического светового выхода сцинтилляторов на основе монокристаллов NaI(Tl), CsI(Tl), CWO, BGO, *n*-терфенила, антрацена, стильбена и пластмассового сцинтиллятора. Показано увеличение технического светового выхода сцинтилляторов от 2500 фот/МэВ для BGO до 33100 фот/МэВ для NaI(Tl), при изменении светового выхода, в стильбеновых единицах, от 0,26 для BGO до 4,3 для NaI(Tl). Точность проведенных оценок технического светового выхода сцинтилляторов составляла 8%.

Ключевые слова: сцинтиллятор; стильбеновая единица светового выхода; энергетический технический световой выход.

Energy technical light output of scintillators – problems of assessment and an alternative method for their solution

B. Grynyov, N. Gurdzhian, O. Zelenskaya, L. Mitcay, V. Tarasov

Institute of Scintillation Materials, NAS of Ukraine, Nauki Ave., 60, 61072, Kharkov, Ukraine
nana.mneyan@gmail.com

Abstract

The paper analyzes the problems that arise when assessing the energy technical light output by existing methods. A modern alternative method for assessing the energy technical light output of various scintillators produced by the Institute of Scintillation Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine is described.

The possibility of evaluating the technical light output of any scintillator by relative comparison with a reference stilbene-based scintillator with a known technical light output is shown. The resulting ratio of responses is recalculated in ph/MeV by taking into account the technical light output of the reference scintillator, equal to 0.023, and the photon formation energy of a particular scintillator.

The estimation procedure is described. Expressions are given for calculating the values of the technical light yield of scintillators in stilbene units and in ph/MeV. The radioluminescence spectra of the tested scintillators are compared with the sensitivity spectra of the normalized and laboratory photodetectors.

The technical light yield of scintillators based on single crystals of NaI(Tl), CsI(Tl), CWO, BGO, *p*-terphenyl, anthracene, stilbene, and a plastic scintillator has been estimated. The values of the responses amplitudes ratio, the spectral normalization coefficients and the tested scintillators technical light output were obtained in stilbene units and in ph/MeV. To check the adequacy of the method the calculation of the tested inorganic scintillators absolute light output was carried out using the light collection coefficients values given in the literature.

It is shown that with an increase in the scintillators technical light output, in stilbene units, from 0.26 for BGO to 4.3 for NaI(Tl), their technical light output increases from 2500 ph/MeV to 33100 ph/MeV. A decrease in the scintillation photon energy from 2.988 ($\lambda = 415$ nm) for NaI(Tl) to 2.214 ($\lambda = 560$ nm) for CsI(Tl) also increases the technical light output of the latter to 35300 ph/MeV. The performed estimates accuracy of scintillators technical light output was 8%.

Keywords: scintillator; stilbene unit of light output; energy technical light output.

Список літератури

1. IEC 60050-395:2014. International Electro-technical Vocabulary (IEV) – Part 395: Nuclear instrumentation – Physical phenomena, basic concepts, instruments, systems, equipment and detectors. Geneva, ISO, 2014. 397 p.
2. ДСТУ IEC 60050-394:2009. Електротехнічний словник термінів. Частина 394. Ядерна апаратура. Прилади, системи, обладнання та детектори (IEC 60050-394:2007, IDT). Київ, 2012. 138 с.
3. Sakai E. Recent measurements on scintillator-photodetector systems. *IEEE Trans Nucl. Sci.*, 1987, vol. 34, no. 1, pp. 418–422.
4. Holl I. et al. A measurement of the light yield of common inorganic scintillators. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1988, vol. 35, no. 1, pp. 105–109. doi: 10.1109/23.12684
5. Moszynski M., Kapusta M. et al. Absolute light output of scintillators. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1997, vol. 44, no. 3, pp. 1052–1061. doi: 10.1109/23.603803
6. ДСТУ IEC 62372:2009. Ядерне приладобудування. Сцинтилятори упаковані. Методи контролювання технічного світлового виходу та власної роздільної здатності (IEC 62372:2006, IDT). Київ, 2013. 22 с.
7. Отчет по теме НИР “Разработка методов и метрологическое обеспечение контроля качества упакованных сцинтиляционных кристаллов”. Харьков: Институт монокристаллов, 1980. 118 с.
8. Sysoeva E., Tarasov V., Zelenskaya O. Comparison of the methods for determination of Scintillation light yield. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2002, A 486, pp. 67–73.
9. Соболева Н.А., Меламид А.Е. Фотоэлектронные приборы. Москва: Высшая школа, 1974. 376 с.
10. Гринев Б.В., Гурджян Н.Р., Зеленская О.В. и др. К вопросу о различных концепциях оценки качества результатов измерения светового выхода сцинтилляторов. Состояние и перспективы развития функциональных материалов для науки и техники. Аспекты сцинтиляционной техники. Харьков: ИСМА, 2017. С. 42–71.
11. Saint-Gobain Crystals. 2017. URL: <https://www.crystals.saint-gobain.com>
12. Hamamatsu Photonics K.K. Photomultiplier Tubes. Catalog. 2016. 134 p.
13. Гриньов Б.В. та ін. Щодо різних підходів до передавання характеристик точності вимірювань. *Метрологія та прилади*. 2013. № 5. С. 20–27.
14. Цирлин Ю.А., Глобус М.Е., Сысоева Е.П. Оптимизация детектирования гамма-излучения сцинтиляционными кристаллами. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 152 с.

15. Глобус М.Е., Гринев Б.В. Неорганические сцинтилляторы. Новые и традиционные материалы. Харьков: Акта, 2000. 409 с.
16. Derenzo S. et al. Scintillation Properties. 2019. URL: <http://scintillator.lbl.gov>

References

1. IEC 60050-395:2014. International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 395: Nuclear instrumentation – Physical phenomena, basic concepts, instruments, systems, equipment and detectors. Geneva, ISO, 2014. 397 p.
2. State standard of Ukraine IEC 60050-394:2009. Electrotechnical dictionary of terms. Part 394. Nuclear equipment. Devices, systems, equipment and detectors (IEC 60050-394:2007, IDT). Kyiv, 2012. 138 p. (in Ukrainian).
3. Sakai E. Recent measurements on scintillator-photodetector systems. *IEEE Trans Nucl. Sci.*, 1987, vol. 34, no. 1, pp. 418–422.
4. Holl I. et al. A measurement of the light yield of common inorganic scintillators. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1988, vol. 35, no. 1, pp. 105–109. doi: 10.1109/23.12684
5. Moszynski M., Kapusta M. et al. Absolute light output of scintillators. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1997, vol. 44, no. 3, pp. 1052–1061. doi: 10.1109/23.603803
6. State standard of Ukraine IEC 62372:2009. Nuclear instrumentation. Housed scintillators. Measurement methods of light output and intrinsic resolution (IEC 62372:2006, IDT). Kyiv, 2013. 22 p. (in Ukrainian).
7. Razrobotka metodov i metrologicheskoe obespechenie kontrolya kachestva upakovannykh scintillyacionnykh kristallov [Development of methods and metrological assurance of quality control of packed scintillation crystals]. Research report. Kharkov, Institute of single crystals, 1980. 118 p. (in Russian, unpublished).
8. Sysoeva E., Tarasov V., Zelenskaya O. Comparison of the methods for determination of scintillation light yield. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2002, A 486, pp. 67–73.
9. Soboleva N.A., Melamid A.E. Fotoelektronnye pribory [Photoelectronic devices]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1974. 376 p. (in Russian).
10. Grynyov B.V., Gurdzhian N.R., Zelenskaya O.V. et al. K voprosu o razlichnykh kontseptsiyakh otsenki kachestva rezultatov izmereniya svetovogo vikhoda stsintillyatorov [To the question of different concepts of assessing the quality of the results of measuring the light output of scintillators]. Sostoyanie i perspektivy razvitiya funktsionalnykh materialov dlya nauki i tekhniki. Aspekty scintillyacionnoy tekhniki [Status and prospects for the development of functional materials for science and technology. Aspects of scintillation technology]. Kharkov, ISMA, 2017, pp. 42–71 (in Russian).
11. Saint-Gobain Crystals. 2017. Available at: <https://www.crystals.saint-gobain.com>
12. Hamamatsu Photonics K.K. Photomultiplier Tubes. Catalog. 2016. 134 p.
13. Grynyov B.V. et al. Shchodo riznykh pidkhodiv do peredavannya kharakterystyk tochnosti vymiryuvan [Regarding different approaches to the transmission of measurement accuracy characteristics]. *Metrology and instruments*, 2013, no. 5, pp. 20–27 (in Ukrainian).
14. Tsyrlin Yu.A., Globus M.E., Sysoeva E.P. Optimizatsiya detektirovaniya gamma-izlucheniya stsintillyatsionnyimi kristallami [Optimization of detection of gamma radiation by scintillation crystals]. Moscow, Energoatom Publ., 1991. 152 p. (in Russian).
15. Globus M.E., Grynyov B.V. Neorganicheskie scintillyatory. Novye i traditsionnye materialy [Inorganic scintillators. New and traditional materials]. Kharkov, Acta publ., 2000. 402 p. (in Russian).
16. Derenzo St. et al. Scintillation Properties. 2019. Available at: <http://www.lbl.gov>