

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ТАРАСОВ ВОЛОДИМИР ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК [539.1.074.3:546:547]:004.421

**МОДЕЛЮВАННЯ, РОЗРОБКА І ХАРАКТЕРИСТИКИ
СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ СЦИНТИЛЯЦІЙНИХ ДЕТЕКТОРІВ**

Спеціальність – 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті сцинтиляційних матеріалів Національної академії наук України

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор
Гриньов Борис Вікторович,
Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України
головний науковий співробітник

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор
Венгер Євген Федорович,
Інститут фізики напівпровідників ім.
В.Є. Лашкарьова НАН України,
завідувач відділу напівпровідникових гетероструктур

доктор фізико-математичних наук, професор
Литовченко Петро Григорович,
Інститут ядерних досліджень НАН України,
завідувач відділу радіаційної фізики

доктор технічних наук, професор
Борщов В'ячеслав Миколайович,
Державне підприємство «Науково-дослідний
технологічний інститут приладобудування»,
заступник генерального директора з наукової роботи

Захист відбудеться “10” липня 2012 р. о 13 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 Харківського національного університету радіоелектроніки (61166, м. Харків, пр. Леніна, 14).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розіслано “ 8 ” червня 2012 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Б. Г. Бородин

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Прилади на базі сцинтиляційних детекторів (СД) знайшли широке застосування для вирішення різних задач в багатьох галузях науки, техніки, промисловості, сільського господарства, медицини, охорони довкілля.

Різноманітність таких задач ставить непрості питання оптимального вибору матеріалів і конфігурацій СД. За наявності багатьох чинників, що впливають на кінцеві параметри детектуючих систем, емпіричний підхід або оціночні розрахунки не забезпечують швидкого оптимального вибору та прогнозування параметрів детектуючих систем і приладів.

Методи моделювання дозволяють значно скоротити витрати часу і засобів на такі пошуки і, часто, можуть знайти оптимальне рішення. Існуючі системи симуляції спектрів, як правило, достатньо детально моделюють процес взаємодії випромінювання з речовиною. В той же час внесок у формування спектру оптичних процесів в сцинтиляторі враховується спрощено, за допомогою калібрування по роздільній здатності для декількох ліній експериментального спектру. З урахуванням такого калібрування при симуляції спектру проводиться його розмиття. Такий підхід не дозволяє виявити вплив на апаратурні спектри чинників, які пов'язані з оптичними характеристиками детектора, що дуже важливо при створенні приладів на основі сцинтиляторів.

Існує ще один ряд програм, які дозволяють досліджувати збирання світла, тобто частину світла, яка надійшла з різних ділянок СД, в залежності від характеристик сцинтилятора, його обробки і упаковки.

На момент постановки роботи представлялося доцільним об'єднати і розвинути ці напрями моделювання процесів в СД, з симуляцією апаратурних спектрів і можливістю оцінки впливу вибору конфігурації детектора (матеріали його елементів, форма, розміри, обробка і упаковка сцинтилятора, варіанти оптичних з'єднань і т.ін.) на апаратурні спектри і їх параметри. Тому однією із задач роботи є розвиток підходу до моделювання процесу реєстрації іонізуючого випромінювання в СД в цілому.

Для успішного моделювання потрібні дані про характеристики сцинтилятора та інших елементів СД. У зв'язку з цим, однією із задач роботи був розвиток методу визначення абсолютного світлового виходу – найважливішої характеристики сцинтилятора.

У дисертаційній роботі передбачалося розвинути і використати методи дослідження закономірностей формування відгуку для низки спеціалізованих СД, тобто таких, що найкращим чином вирішують певні задачі реєстрації іонізуючих випромінювань. В роботі були досліджені СД з охоплюючою геометрією, СД із вбудованими джерелами випромінювань, СД для реєстрації короткопробіжного випромінювання, СД на основі гетерогенних сцинтиляторів, комбіновані СД, сцинтилятори для реєстрації теплових нейтронів і резонансного γ - випромінювання. Для кожного з цих СД важливими є свої характеристики, які пов'язані з вирішенням певної задачі.

При радіометричних вимірюваннях важливо за мінімальний час визначити активності радіонуклідів в зразках. Тому актуальною є задача створення найбільш ефективних СД, оптимізованих як за вибором матеріалів його елементів і конструкції, так і за геометрією вимірювань. При вимірюваннях малих активностей потрібні великі експозиції, при яких можливі коливання характеристик вимірювального тракту, «розповзання» спектру і погіршення роздільної здатності. В зв'язку з цим актуальною є задача створення СД з внутрішнім реперним джерелом, що дозволяє стабілізувати вимірювальний тракт.

Широке застосування знаходять СД короткопробіжного випромінювання. Вони використовуються при контролі газоподібних і парових викидів АЕС, для контролю α - і β - випромінювачів в зразках навколишнього середовища і в тілі людини, при реєстрації рентгенівського випромінювання. Питання можливостей і меж застосування таких детекторів, отриманих за різними технологіями, також є актуальними.

Актуальною проблемою є створення СД теплових нейтронів. Особливо гострою ця проблема стала останнім часом, коли виникло питання про заміну дефіцитних газових лічильників на основі ^3He . Вирішенню проблеми може допомогти пошук сцинтиляторів, що містять ядра елементів - конверторів, які ефективно поглинають теплові нейтрони і дають заряджені частинки з достатньою для реєстрації енергією. У ряді випадків ця проблема може бути вирішена при отриманні гетерогенного сцинтилятора (ГС), у якому ядра конвертора сконцентровані в одній фазі, а сцинтилятор, що реєструє заряджені частинки, складає іншу фазу.

Дослідження ГС на даний час активізувалися, проте закономірності втрат енергії і проходження світла сцинтиляцій в них вивчені недостатньо повно. Крім того, для таких ГС, як дисперсії сцинтиляторів в полімерах, полікристалічні плівки сцинтиляторів, пресовані сцинтилятори, існують задачі покращення сцинтиляційних характеристик, оскільки такі ГС перспективні для створення СД великої площі.

Питання зниження фону зовнішнього випромінювання, із зменшенням габаритів пасивного захисту, успішно розв'язуються при використанні комбінованих СД, які дозволяють одночасно реєструвати декілька видів випромінювань. І в цьому випадку, як і у вказаних вище, питання покращення спектрометричних і радіометричних характеристик детекторів залишаються актуальними.

Відповіді на ці питання можна отримати при дослідженні процесу формування відгуку СД, залежно від їх конфігурації і умов застосування, з використанням методів експериментального і комп'ютерного моделювання.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дослідження виконувалися за планами науково-дослідних робіт, держконтрактів і держзамовлень. Основні результати дисертаційної роботи увійшли до звітів держбюджетних тем, в яких автор був керівником або відповідальним виконавцем:

Створення стаціонарного лічильника випромінювання людини з можливістю контролю інкорпорованих α -, β - і γ - випромінювачів («Защита» 1994-1995, № ДР 0195U022079).

Моделирование детектирующих систем на основе сцинтилляционных материалов ("Ядро" (заключительный) 1996г. № ДР 0196U006602).

Получение и исследование стеклообразных сцинтилляторов («Фосфат» (заключительный) 1999г. № ДР 0199U000558).

Моделирование сцинтилляционного процесса с учетом кинетики накопления стабильных радиационных дефектов и запаса энергии на дефектах дорадиационного происхождения («Модель» (завершена в 1999г.) № ДР 0197U013769).

Разработка универсального γ - β - радиометра с идентификацией радионуклидов по γ -спектру и дифференциальной оценкой β -активности стронция-90 продуктах сельского хозяйства («Лан» (завершена в 2000 году) № ДР 0199U000877).

Исследование возможностей создания комбинированных систем регистрации ионизирующего излучения на основе сцинтилляционных материалов («Система» (заключительный) 2003г. № ДР 0103U003496).

Дослідження закономірностей сцинтиляційного процесу в детектуючих системах складної конфігурації під дією іонізуючих випромінювань різного виду ("Конфігурація" (заключний) 2006г. № ДР 0104U006378).

Особенности втрат энергии и формирования импульсов света в гетерогенных сцинтилляционных материалах („Гетероген" (заключний) 2009р. № ДР 0107U003441).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – дослідження особливостей формування відгуку спеціалізованих СД при реєстрації іонізуючих випромінювань і пошук шляхів покращення їх характеристик. Для цього необхідно вирішити наступні задачі:

1) адаптувати методи комп'ютерного моделювання для дослідження закономірностей формування відгуку в спеціалізованих СД, з урахуванням особливостей їх конфігурацій;

2) розвинути експериментальні методи визначення характеристик сцинтиляторів і СД;

3) провести експериментальні дослідження характеристик сцинтиляторів для оцінки можливостей їх використання при розробках спеціалізованих СД;

4) з використанням методів комп'ютерного моделювання провести дослідження закономірностей формування відгуку в СД;

5) з використанням методів комп'ютерного і експериментального моделювання провести дослідження впливу параметрів конфігурацій спеціалізованих СД на їх характеристики для визначення шляхів покращення цих характеристик.

Об'єкт дослідження. Процеси реєстрації іонізуючого випромінювання сцинтиляційними детекторами і формування відгуку в них.

Предмет дослідження. Залежність відгуку СД при дії іонізуючого випромінювання від характеристик СД і його елементів.

Методи дослідження. Комп'ютерне моделювання, люмінесцентна спектроскопія, спектрометрія і радіометрія іонізуючого випромінювання, оптична рефлектометрія.

Наукова новизна отриманих результатів:

- запропоновано метод поетапного моделювання процесу реєстрації іонізуючого випромінювання в СД. Метод дозволяє досліджувати внесок різних чинників у формування вихідного сигналу на різних етапах реєстрації і прогнозувати характеристики СД досліджуваної конфігурації;

- для моделювання світлозбору в СД запропоновано характеризувати розподіл мікро майданчиків на модельній шорсткій поверхні за допомогою експериментальних даних, отриманих при вимірюваннях індикатрис розсіяння світла поверхнями, обробленими абразивами з різним розміром зерна;

- для визначення абсолютного світлового виходу - основної характеристики сцинтиляційних матеріалів, розвинуто підхід з використанням методу знаходження фотоелектронного виходу по розділенню фотоприймача, з урахуванням ступеню спектрального узгодження сцинтилятора і фотоприймача, а також коефіцієнта світлозбору, який отримують шляхом моделювання;

- запропоновано нові сцинтилятори з конверторами випромінювань: 1) склоподібний сцинтилятор для реєстрації теплових нейтронів на основі метафосфату літію, активованого вісмутом; 2) гетерогенний сцинтилятор для вибіркової реєстрації випромінювання при резонансній спектроскопії на ^{57}Fe на основі органічного сцинтилятора і ферроціаніду калія;

- для СД із складною геометрією, призначених для визначення активності γ - випромінювачів, показана основна роль вибіркової обробки поверхні і підбору відбивачів в забезпеченні високої спектрометричної якості. На прикладі СД з колодязем показано, що вирівнювання коефіцієнтів світлозбору за об'ємом сцинтилятора досягається шляхом транспорту світла до вихідного вікна з віддалених областей сцинтилятора і забезпеченням дифузного характеру віддзеркалення світла поблизу вихідного вікна;

- вперше досліджено залежності α/γ - відношення від температури і часу формування імпульсу для сцинтиляторів різного типу. Знайдено, що для оксидних сцинтиляторів α/γ - відношення не залежить від зміни вказаних параметрів. Показано, що за сукупністю характеристик оптимальним матеріалом для γ - спектрометрів із стабілізацією спектру по α - лінії є NaI(Tl) ;

- для всіх типів СД короткопробіжного випромінювання знайдена значна радіальна залежність коефіцієнтів світлозбору і амплітуд імпульсів, пов'язана з втратами світла на бічній поверхні сцинтилятора. Запропоновано варіанти зменшення цієї залежності і покращення спектрометричних характеристик СД;

- показано, що основні умови збільшення світлового виходу, зниження порогу реєстрації β - випромінювання і покращення розділення для гетерогенних сцинтиляторів (ГС) у складі комбінованих детекторів (КД) полягають у зменшенні числа оптичних меж, що розсіюють світло сцинтиляцій в об'ємі ГС, і покращенні умов відбиття світла на зовнішніх оптичних межах «сцинтилятор – оптичне вікно - ФЕП» у КД за допомогою імерсійних середовищ з узгодженими показниками заломлення.

Практичне значення отриманих результатів.

Метод послідовного моделювання дозволяє: досліджувати внесок різних чинників у формування вихідного сигналу, прогнозувати характеристики СД досліджуваної конфігурації і оптимізувати їх конфігурацію.

Урахування умов обробки поверхні сцинтилятора в параметрах розподілу мікромайданчиків на модельній шорсткій поверхні, замість умовних параметрів, забезпечує реалізацію результатів моделювання при виготовленні СД. Варіанти вибіркової обробки різних ділянок поверхні сцинтиляторів можуть бути знайдені за допомогою комп'ютерного моделювання і використані при виготовленні СД складної конфігурації.

Метод визначення абсолютного світлового виходу дозволяє характеризувати сцинтиляційні матеріали, а також використовувати ці характеристики при моделюванні і прогнозуванні параметрів СД. Метод визначення світлового виходу і власного розділення упакованих сцинтиляторів увійшов до міжнародного стандарту ІЕС 62372: 2006, який гармонізований в ДСТУ ІЕС 62372:2009 «Ядерне приладобудування. Сцинтилятори упаковані. Методі контролю технічного світлового виходу та власної роздільної здатності».

Отримані результати можуть бути використані при дослідженні і розробці СД різної конфігурації і різного призначення, в тому числі для радіометрії і спектрометрії іонізуючого випромінювання, для ідентифікації радіонуклідів.

Особистий внесок автора полягає в наступному:

- сформулював мету, задачі, основні положення і висновки дисертаційної роботи.

- запропонував підхід поетапного моделювання процесу реєстрації іонізуючого випромінювання в СД [30].

- для моделювання світлозбору запропонував використовувати в описі розподілу мікро майданчиків на шорсткій поверхні, дані, отримані з індикатрис розсіяння світла поверхнями з різною обробкою [14,19,20,41,43]. Провів модифікацію відповідних розрахункових формул для отримання функцій розподілу мікро майданчиків [18,42].

- запропонував використовувати розрахунки коефіцієнтів світлозбору для визначення абсолютного світлового виходу сцинтиляторів [9].

- провів розрахунки коефіцієнтів світлозбору і спільно з О.В. Зеленською визначив абсолютний світловий вихід для сцинтиляційних матеріалів, отриманих в ІСМА і ІМК [1,6,11,12,21,22,23].

- провів експериментальні дослідження і визначив абсолютний світловий вихід склоподібного сцинтилятора на основі метафосфата літію для реєстрації повільних нейтронів [4,27].

- в роботах [5,8] по оптимізації конфігурації СД і методів визначення активності радіонуклідів при охоплюючій геометрії джерела (судини Марінеллі) отримав розрахункові дані і модельні (базові) спектри для різних конфігурацій СД (розміри, матеріал сцинтилятора) і судин Марінеллі.

- в роботах [25,39] по оптимізації конфігурації СД з колодязем запропонував схему регулювання транспорту світла з різних областей сцинтилятора, що забезпечує вирівнювання коефіцієнтів світлозбору.

- спільно з О.В. Зеленською і В.А. Сулигою провів дослідження залежності α/γ - відношення від температури і запропонував варіант використання коліматорів для збільшення ефективності стабілізації вимірювального тракту, що включає СД з реперними α -джерелами [3,35].

- взяв участь в постановці роботи, аналізі результатів і формулюванні висновків при експериментальному дослідженні СД короткопробіжного випромінювання [13,15, 16,40].

- спільно з І.В.Килімчук провів модельні дослідження для з'ясування ролі різних чинників у формуванні розділення СД короткопробіжного випромінювання [19,20].

- запропонував використовувати імерсійну рідину-сцинтилятор для отримання ГС, що містить конвертор випромінювання, з високою прозорістю [26,33].

- спільно з Ю.Т.Видаєм, А.А. Ананенко і А.С. Раевским провів дослідження сцинтиляційних характеристик ГС у вигляді тонких плівок, пресувань і полімерних композицій [7, 31, 36].

- запропонував модель системи ГС і за допомогою комп'ютерного моделювання дослідив особливості втрат енергії і проходження світла в гетерогенному сцинтиляторі [44].

- на основі комп'ютерного моделювання і оцінки сцинтиляційних характеристик матеріалів запропонував варіанти конфігурацій комбінованих детекторів для вибіркової реєстрації рентгенівського, β - і γ - випромінювань при їх сумісній присутності [10,11,17,24,28,37,38].

- за допомогою комп'ютерного моделювання провів оптимізацію СД для ЕСИЧ [2].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідались на міжнародних конференціях:

Межгосударственная конференция «Сцинтилляторы - 93», 27-30 сентября 1993г.: тезисы докладов. – Харьков, Украина, 1993.

Symposium on radiation measurements and applications, May 16-19,1994, Ann Arbor, Michigan, USA.

International conference on inorganic scintillators and their applications (SCINT-95), Delft, Netherlands, august 28-september 1, 1995.

IEEE Nuclear Science Symposium, San-Francisco, USA, october 21-27,1995.

International conference on scintillation materials and their applications, Ekaterinburg, Russia, January 17-20 1996

III International School and Symposium on Physics in Materials Science ISSPMS'98, 13-19 September 1998, Jaszowiec, Poland.

Fifth Internat.conf. inorg. scint.and their appl. SCINT'99, Aug 16-20,1999, Moscow, Russia.

VI International Conference on Inorganic Scintillators and their use in Scientific and Industrial Applications(SCINT 2001)September 16-21, 2001, Chamonix, France.

V Международное совещание «Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии» (ППСР-2001) 2001, п.Менделеево, Россия.

VI Международное совещание «Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии» (ППСР-2002) 2002, п.Менделеево, Россия.

VII Международное совещание «Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии» (ППСР-2003) 2003, п.Менделеево, Россия.

International Youth Nuclear Congress(IYNC-2004) May 9 – 13, 2004 Toronto–Canada.

IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Como, Italy, 18-20 May, 2004.

IEEE Nuclear Science Symposium, Rome-Italy, 2004.

14th International Conference on Solid State Dosimetry, New Haven, Connecticut, USA, June 27-July 2. – 2004.

IX Международное совещание «Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии» (ППСР-2005) 2005, п.Менделеево, Россия.

6th European Conference on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation (LUMDETR 2006) June 19-23 Lviv (Ukraine).

4th International Symposium on Laser, Scintillator and Non Linear Optical Materials, June 26-30, 2006, Prague, Czech Republic

International Conference“Functional Materials” «ICFM’2007», Crimea, Ukraine, Oct. 1-6, 2007

IEEE Nuclear Science Symposium «2008 NSS-MIC Dresden», Dresden, Germany, 19-25 Oct., 2008.

7th Int. Conf. on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation «LUMDETR 2009», Krakow, Poland, 12-17 Jul., 2009.

IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Valencia, Spain 23-29 October 2011.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 23 статтях у міжнародних і вітчизняних наукових журналах, 3 патентах України, 1 авторському свідоцтві на винахід СРСР, 4 статтях у трудах міжнародних конференцій, 1 міжнародному стандарті, 12 тезах доповідей на наукових конференціях.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, семи розділів, висновків і списку використаних джерел, який містить 276 посилань. Робота включає 37 таблиць і 90 рисунків. Загальний обсяг дисертації - 334 сторінки, у тому числі основного тексту – 270 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність проблеми, яка розглядається в роботі, сформульовані мета, задачі дослідження, а також наукова новизна отриманих результатів і їх практичне значення.

В **першому розділі** описані підходи і методи, що використовуються в моделюванні процесу реєстрації іонізуючих випромінювань за допомогою СД. Також описані проблеми і задачі пов'язані з розробкою низки спеціалізованих СД.

Найбільш поширеним методом вирішення задач перенесення випромінювання, як іонізуючого, так і світлового, є вірогіднісний чисельний метод – метод Монте Карло. Він забезпечує рішення більшості задач із складною геометрією об'єктів. Були розроблені ефективні алгоритми і програми, засновані на методі Монте Карло. Все більше розповсюдження цей метод одержує при моделюванні проходження світла в середовищах, які його розсіюють.

При моделюванні роботи СД існує традиційне розподілення задач – проводиться або моделювання взаємодій, або моделювання світлозбору. Питання моделювання апаратурних спектрів і прогнозування характеристик СД і приладів, як правило, не розглядаються.

Для оцінки можливостей детекторів на основі сцинтиляційних матеріалів потрібна інформація про їх характеристики. Світловий вихід є головною характеристикою сцинтиляційних детекторів і матеріалів. В огляді аналізуються методи визначення технічного світлового виходу, тобто кількості світла, що виходить з детектора. Для характеристики сцинтиляційних матеріалів необхідно визначати абсолютний світловий вихід, тобто кількість світла, яка утворилася в сцинтиляторі. Про урахування цієї різниці в сучасних публікаціях інформація практично відсутня.

З даних, приведених в огляді, витікає, що керування світлозбором є поширеним прийомом підвищення технічного світлового виходу і покращення однорідності коефіцієнта світлозбору в об'ємі СД. Вибір матеріалу сцинтилятора з високим світловим виходом і малою непропорційністю відгуку також дозволяє значно покращити розділення СД.

В огляді також аналізуються шляхи покращення визначальних характеристик спеціалізованих СД, важливих для вирішення певних задач.

Так можливості визначення γ - випромінюючих радіонуклідів можна збільшити не тільки за рахунок покращення розділення, але й використовуючи геометрію охоплення джерела або детектора. Залежно від варіанту геометрії вимірювань існують різні можливості вибору сцинтилятора і умов його застосування. Питання підвищення чутливості за рахунок вибору матеріалу сцинтилятора і умов його застосування в цих СД є актуальним.

Для детекторів рентгенівського випромінювання використовуються сцинтилятори на основі активованих лужно - галоїдних кристалів (ЛГК), що мають високий вихід світла. Проблемою при їх застосуванні є складність збереження сцинтиляційних властивостей поверхневого шару, в якому реєструється короткопробіжне випромінювання. Неясно, що в основному визначає розділення таких детекторів – різна сцинтиляційна ефективність в різних шарах сцинтилятора або особливості світлозбору. Така ситуація ускладнює вибір шляху покращення розділення рентгенівських детекторів на основі ЛГК.

Новий розвиток отримали гетерогенні сцинтилятори (ГС), але закономірності втрат енергії і проходження світла сцинтиляцій в них вивчені недостатньо повно. Для таких ГС, як дисперсії сцинтиляторів в полімерах, полікристалічні плівки сцинтиляторів, пресовані сцинтилятори, існують задачі покращення сцинтиляційних характеристик, оскільки ці сцинтилятори перспективні для отримання СД великої площі.

Створення СД для реєстрації нейтронів – один з основних напрямів досліджень СД. В цих СД реалізується принцип конвертації, коли під дією нейтронів утворюються заряджені частинки. Існуючі сцинтилятори не повною мірою задовольняють ряду вимог. Зокрема, необхідні СД з великою робочою поверхнею для заміни дефіцитних ^3He лічильників.

Для спеціальних застосувань радіометрії важливі вибіркові СД. Одним з видів спеціалізованих СД є сцинтиляційний резонансний детектор (СРД), який

застосовується в ядерній γ - резонансній спектроскопії (ЯГРС). Особливу проблему викликає створення СРД для ЯГРС на нукліді ^{57}Fe через низьку енергію вторинного випромінювання. Необхідність розрахункових обґрунтувань для оцінки можливостей і вибору шляхів створення такого типу СД очевидна.

Широко вживаними вибірковими СД є комбіновані детектори типу «фосвич» (КД). Вони дозволяють одночасно реєструвати декілька видів випромінювань, з виділенням кожного з них. Для радіометричних застосувань, що вимагають підвищену вибірковість і чутливість визначення окремих видів випромінювань або радіонуклідів, необхідні КД з великою робочою поверхнею, із задовільними спектрометричними характеристиками.

В огляді літератури показані проблеми, які існують при створенні вказаних спеціалізованих СД. Ці задачі актуальні. Дослідження закономірностей реєстрації іонізуючого випромінювання спеціалізованими СД може прискорити пошук шляхів створення таких СД з необхідними характеристиками.

В другому розділі описано підходи для моделювання реєстрації іонізуючого випромінювання за допомогою СД. Відгук приладу на дію випромінювання можна описати рівнянням Фредгольма [1*]:

$$F(V) = \int_{E1}^{E2} f(V,E) * k(E) dE . \quad (1)$$

При заданому спектрі діючого випромінювання $k(E)$ і функції відгуку приладу $f(V,E)$, рівняння 1 дає апаратурний спектр $F(V)$. Використовуючи отриманий спектр, можна прогнозувати параметри приладу, наприклад амплітуди імпульсів, розділення, ефективність, в залежності від чинників, що визначають функцію відгуку приладу. Побудувати функцію відгуку в аналітичному вигляді складно через багатofакторність задачі. Її можна знайти експериментально або шляхом моделювання.

В дисертаційній роботі запропоновано поетапне моделювання реєстрації іонізуючого випромінювання сцинтиляційними детекторами: 1) взаємодія випромінювання на шляху до сцинтилятора, включаючи елементи детектора, 2) взаємодія випромінювання з матеріалом сцинтилятора, 3) перетворення енергії випромінювання в світлову енергію, 4) проходження світла в сцинтиляторі і його збирання на фотоприймач, 5) перетворення світлової енергії в електрони у фотоприймачі. Перетворення на окремих етапах також можна описати рівнянням (1).

В цьому випадку функції k і F матимуть відповідно значення:

1) k - спектр початкового випромінювання джерела, F - спектр випромінювання, що потрапляє в сцинтилятор (тут f – функція перетворення спектра при взаємодії випромінювання на шляху до сцинтилятора; залежить від енергії, складу і геометрії елементів джерела і детектора);

2) k - спектр випромінювання, що потрапляє в сцинтилятор, F - спектр енергії, поглиненої в сцинтиляторі (f – функція перетворення, що залежить від виду і енергії випромінювання, геометрії і матеріалу сцинтилятора; пов'язана з ефективністю взаємодії);

3) k - спектр енергії, поглиненої в сцинтиляторі, F - спектр енергії, перетвореної в світло (f – пов'язана з сцинтиляційною ефективністю перетворення енергії випромінювання в світлову енергію; залежить від вигляду і енергії випромінювання, матеріалу сцинтилятора);

4) k - спектр енергії, перетвореної в світло, F - спектр амплітуд світлових спалахів, що потрапляють до фотоприймача (f – пов'язана з ефективністю світлозбору при проходженні світла до фотоприймача, залежить від координат місця спалаху, прозорості і показника заломлення сцинтилятора, обробки його поверхні, характеристик відбивачів і оптичних контактів);

5) k - спектр амплітуд світлових спалахів, що потрапляють до фотоприймача, F - спектр амплітуд імпульсів електронів (f – пов'язана з ефективністю перетворення світлової енергії у фотоелектрони і статистичним характером їх генерації).

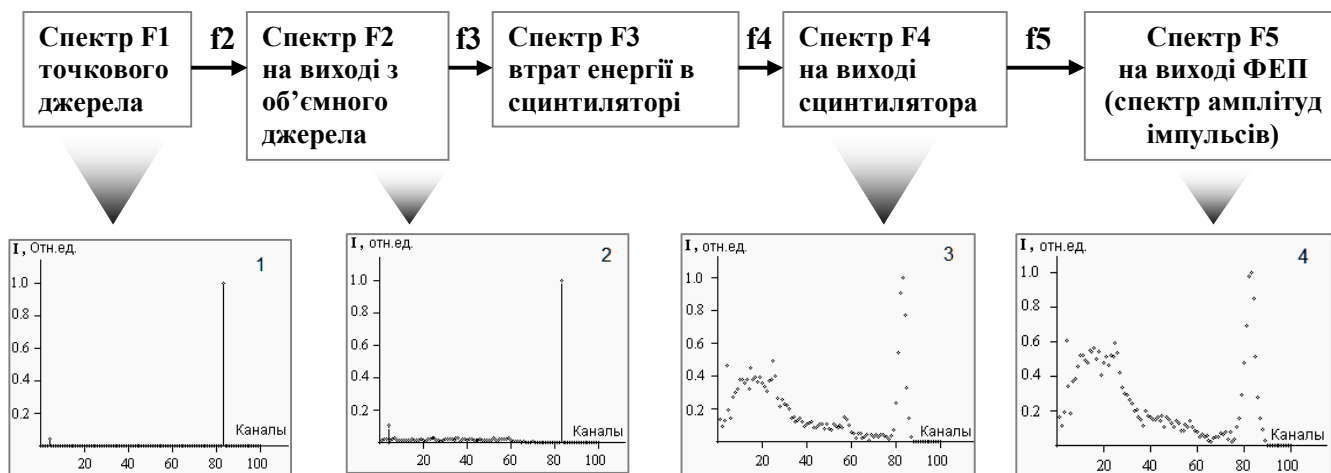
Отриманий на кожному етапі спектральний розподіл є як об'єктом самостійного дослідження, так і відправним пунктом для отримання подальшого спектрального розподілу, аж до апаратного спектру.

Моделювання окремих стадій проводиться методом Монте Карло за відомими з літератури алгоритмами, що описують роботу функцій перетворення етапів моделювання. В дисертаційній роботі моделювання проводиться за класичною схемою побудови геометричних траєкторій часток в системі «джерело - СД», у якій елементи системи представлені як геометричні оболонки необхідної форми. Взаємодія часток и проходження світла моделюються з урахуванням фізичних властивостей середовищ, якими заповнені оболонки.

Перевага моделювання окремих етапів полягає в можливості достатньо детального вивчення впливу виділених в них чинників на формування відповідного відгуку.

Рис. 1 ілюструє трансформацію спектральних розподілів при поетапному моделюванні методом Монте Карло реєстрації γ - випромінювання ^{137}Cs (судина Марінеллі (1 л) з водним розчином радіонукліда).

Поетапне моделювання



В табл. 1 порівнюються чутливості спектрометра для деяких сцинтиляторів, як виміряні, так і отримані в результаті моделювання по піку повного поглинання для ^{137}Cs в геометрії судини Марінеллі (місткість 1 літр).

Таблиця 1.

Експериментальні і розрахункові значення чутливості сцинтиляційних γ - спектрометрів при вимірюванні вмісту ^{137}Cs в геометрії судини Марінеллі

Матеріал сцинтилятора	Розмір, мм	Чутливість, імп/с*Бк	
		Виміряно	Обчислено
NaI:Tl	Ø63x63	0.022	0.025
CsI:Tl	Ø63x63	0.028	0.030
CWO	Ø40x40	0.016	0.015
CWO	Ø25x50	0.007	0.008
BGO	Ø25x50	0.004	0.005

Відповідність розрахункових і експериментальних результатів підтверджують ефективність запропонованого підходу для моделювання роботи сцинтиляційних ДС.

Для моделювання світлозбору в дисертаційній роботі запропоновано підхід, що зв'язує розподіл орієнтацій мікро майданчиків на шорсткій поверхні з її обробкою абразивами з певним розміром зерна. Для визначення орієнтацій мікро майданчиків досліджувалося індикатриси розсіяння світла поверхнями сцинтиляторів, оброблених абразивами з різним розміром зерна.

Розподіли мікро майданчиків визначалися з індикатрис розсіяння за допомогою формул перерахунку, запропонованих в [2*], після їх модифікації. Для заданого кута β падіння променя лазера на поверхню, послідовно реєструється інтенсивність розсіяного світла під різними кутами α до поверхні. Якщо не змінювати кут падіння променя на базову поверхню, то характеристики плями, як джерела світла, залишаються незмінними. Потік світла Φ , розсіяний під кутом α до поверхні, пропорційний: 1) яскравості плями ρ на поверхні; 2) сумарній площі мікро майданчиків S_δ , які дзеркально відбивають світло у напрямі фотоприймача; 3) тілесному куту ω , в якому розповсюджується світло до фотоприймача; 4) коефіцієнту k_0 , що враховує видиму площу плями, при зміні позиції фотоприймача. Для мікро майданчиків, які орієнтовані паралельно базовій поверхні (їх сумарна площа дорівнює S_0), потік до фотоприймача буде рівний:

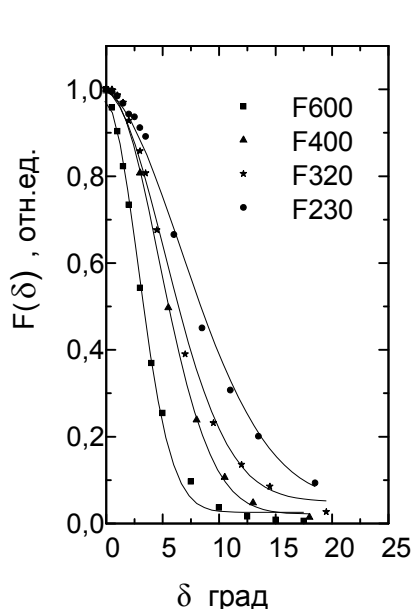
$$\Phi_0 = S_0 \cdot \rho \cdot \omega \cdot k_0. \quad (2)$$

Подібний вираз є справедливим для мікро майданчиків, що знаходяться під кутом δ до базової поверхні (їх сумарна площа дорівнює S_δ) і записується як:

$$\Phi_\delta = S_\delta \cdot \rho \cdot \omega \cdot k_\delta. \quad (3)$$

Значення коефіцієнтів: $k_0 = \cos\beta$ і $k_\delta = \cos\alpha$, відповідно. Ці коефіцієнти показують зміни видимих розмірів плями і, відповідно, зміни потоку до фотоприймача при зміні позиції фотоприймача.

Нормовані значення функції розподілу мікро майданчиків по кутах нахилу до базової поверхні F_δ знаходяться, як відношення сумарних площ мікро майданчиків S_δ і S_0 , при одній і тій же видимій площі освітленої плями



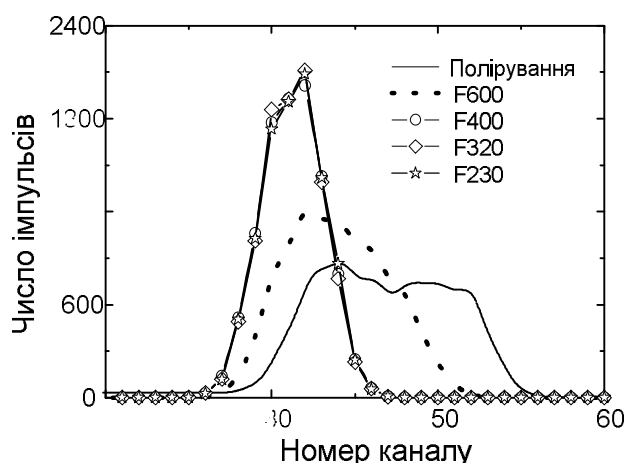
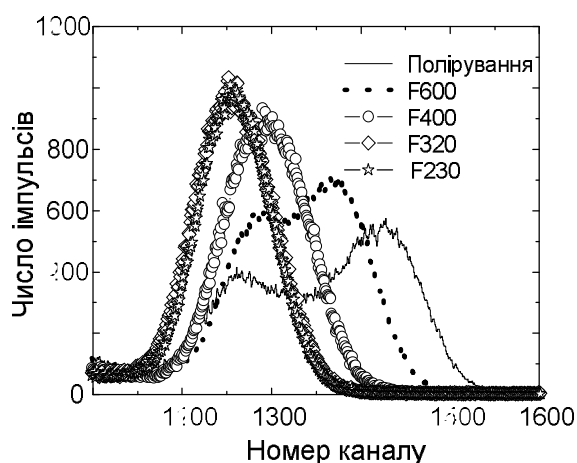
$$F_\delta = \frac{S_\delta}{S_0} = \frac{\left(\frac{\Phi_\delta}{\cos\alpha}\right)}{\left(\frac{\Phi_0}{\cos\beta}\right)}. \quad (4)$$

На рис.2 приведені розподіли мікро майданчиків на шорстких поверхнях, оброблених різними абразивами.

Знайдені розподіли мікро майданчиків були використані при послідовному моделюванні спектрів амплітуд імпульсів для зразків сцинтиляторів CsI(Tl), оброблених відповідними абразивами.

Рис.2 Функції розподілу мікро майданчиків за кутами нахилу $F(\delta)$ для кристалів CsI(Tl), які оброблені абразивами з різним розміром зерна (суцільні лінії відображають наближення до розподілу Гауса)

Експериментальне моделювання з такими ж реальними зразками показало відповідність результатів (рис. 3). Урахування умов обробки в параметрах розподілу мікро майданчиків на модельній шорсткій поверхні, замість умовних параметрів, забезпечує реалізацію результатів моделювання при виготовленні детекторів.



а)

б)

Рис. 3. Експериментальні (а) и модельні (б) спектри амплітуд-імпульсів кристалів CsI(Tl) після обробки абразивами с різним розміром зерна: для F600 – середній розмір зерна складає 14мкм, для F400 – 21мкм, для F320 – 33мкм, для F230 – 56мкм.

Третій розділ присвячений дослідженню і вибору перспективних сцинтиляторів для створення сцинтиляційних детекторів.

Найважливішою характеристикою сцинтилятора є сцинтиляційна ефективність і пов'язана з нею величина абсолютного світлового виходу.

Для визначення цієї величини в роботі розвинуто підхід, заснований на експериментальному вимірюванні величини фотоелектронного виходу по розділенню фотоприймача. Абсолютний світловий вихід в одиницях «фотони/МеВ» можна знайти, якщо знати енергію E , поглинену в сцинтиляторі, число фотонів $n_{\text{фот}}$, що потрапили на фотокатод, і коефіцієнт світлозбору τ :

$$n = n_{\text{фот}} / (\tau * E) \quad (5)$$

$n_{\text{фот}}$, можна отримати з середнього числа фотоелектронів $n_{\text{ср}}$, які вириваються з фотокатода імпульсами світла сцинтиляцій:

$$n_{\text{фот}} = n_{\text{ср}} / (\Sigma * m) \quad (6)$$

де Σ - спектральна чутливість фотокатода у фотоелектронах/квант;
 m - коефіцієнт узгодження спектральних характеристик сцинтилятора і фотоприймача.

$n_{\text{ср}}$ визначається з відомої залежності між $n_{\text{ср}}$ і розділенням фотоприймача R_{ϕ} :

$$n_{\text{ср}} = (2,36 / R_{\phi})^2. \quad (7)$$

Значення Σ може бути отримано з паспортних даних фотоприймача, а величина m підраховується, як інтеграл перекриття спектральних характеристик сцинтилятора $y(\lambda)$ і фотоприймача $S(\lambda)$:

$$m = \int S(\lambda) * y(\lambda) d\lambda / \int y(\lambda) d\lambda. \quad (8)$$

Для отримання R_{ϕ} за допомогою досліджуваного зразка визначали спектрометричну постійну фотоприймача A :

$$A = (R_{E1}^2 - R_{E2}^2) / (1/V_1 - 1/V_2) \quad (9)$$

де R_{E1} і R_{E2} - апаратний розділення для піків повного поглинання γ - випромінювання з енергією E_1 і E_2 , відповідно

V_{Am} і V_{Cs} - положення піків поглинання в шкалі амплітуд імпульсів для E_1 і E_2 , відповідно.

Постійна A дозволяє знайти розділення фотопомножувача R_{ϕ} для будь-якого значення амплітуди сигналу V :

$$R_{\phi}^2 = A / V. \quad (10)$$

В дисертаційній роботі коефіцієнт світлозбору τ отримували розрахунковим шляхом, моделюючи проходження світла в сцинтиляторі певної форми з визначеними обробкою поверхонь і упаковкою.

За даною методикою був визначений абсолютний світловий вихід для низки скінтіляторів, які були одержані в ІСМА і ІМК. Особливий інтерес представляють скінтілятори, що містять елементи з високим перетином захоплення теплових нейтронів. Знайдені значення абсолютного світлового виходу для деяких з цих матеріалів та інші їх характеристики представлені в табл. 2.

Таблиця 2.

Характеристики досліджених скінтіляторів

Скінтілятор	λ , нм	S, фотон/МеВ	t, нс	$V\alpha/V\gamma$	$Z_{\text{эф}}$	ρ , г/см ³
LiB ₃ O ₅ LBO	280	700	<10	0.3	7.3	2.47
β -BaB ₂ O ₄ BBO	400	50	<10	0.3	47	3.83
Gd ₂ Si ₂ O ₇ (Ce) GPS	370	25000	45	0.2		6.1
LiPO ₂ (Bi) LPO	630	4000	3000	0.2	7.6	2.0
CsI(Tl)	550	54900	1000	0.6	54	4.51
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ BGO	490	8300	300	0.2	74	7.13
CdWO ₄ CWO	475	17800	5000	0.2	66	7.9
Gd ₂ SiO ₅ (Ce) GSO	440	8900	60	0.2	59	6.1

Всі досліджені оксидні скінтілятори поступаються класичному скінтілятору CsI(Tl) за світловим виходом. Серед приведених оксидних скінтіляторів GPS має найбільший світловий вихід.

На рис. 4 приведені спектри амплітуд імпульсів при збудженні скінтіляцій γ -випромінюванням ¹³⁷Cs для скінтіляторів BGO (1) і GPS(2).

Не дивлячись на невелике значення світлового виходу, матеріали, що містять бор або літій, можуть бути детекторами теплових нейтронів, оскільки енергія вторинних частинок достатньо велика (4,78 МеВ) для перевищення порогу реєстрації.

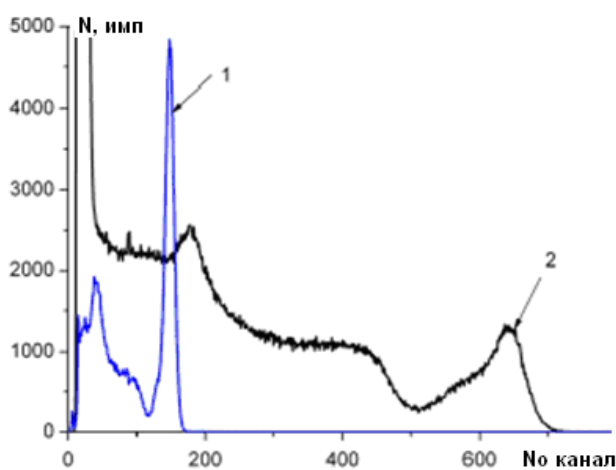


Рис.4 Спектри амплітуд імпульсів для скінтіляторів BGO (1) і GPS(2) при збудженні скінтіляцій γ -випромінюванням ¹³⁷Cs.

Характерний спектр амплітуд імпульсів для оксидних скінтіляторів, що містять бор або літій, при їх опроміненні α -частинками, приведено на рис. 5.

LiPO₂(Bi) - найбільш перспективний для реєстрації нейтронів з досліджених скінтіляторів - був отриманий і досліджений вперше. Це - склоподібний скінтілятор. Максимальну інтенсивність α - і γ -скінтіляцій можна отримати в ньому при концентрації активатора Bi₂O₃ близько 1 мас. %.

В діапазоні температур $-100 - +100$ °С його світловий вихід практично не змінюється. Сцинтилятор ефективно реєструє нейтрони і мало чутливий до γ -випромінювання (рис. 6).

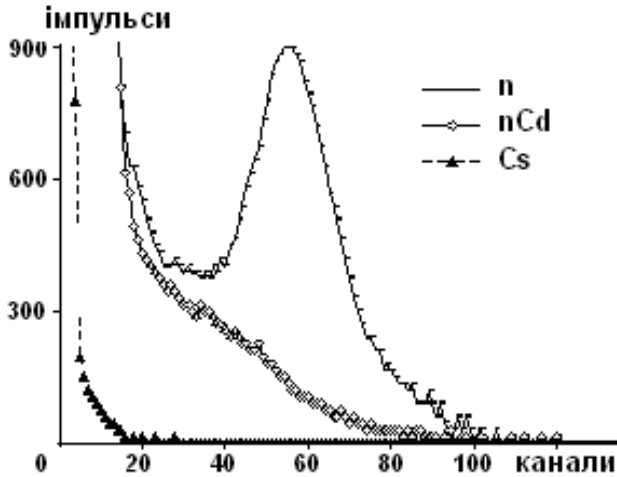


Рис. 6. Спектри амплітуд імпульсів для $\text{LiPO}_2(\text{Bi})$ при опроміненні нейтронами від Pu-Be-джерела з Cd-екраном (nCd) і без нього (n), а також γ -квантами ^{137}Cs (Cs).

новий склоподібний сцинтилятор перевершує відоме скло.

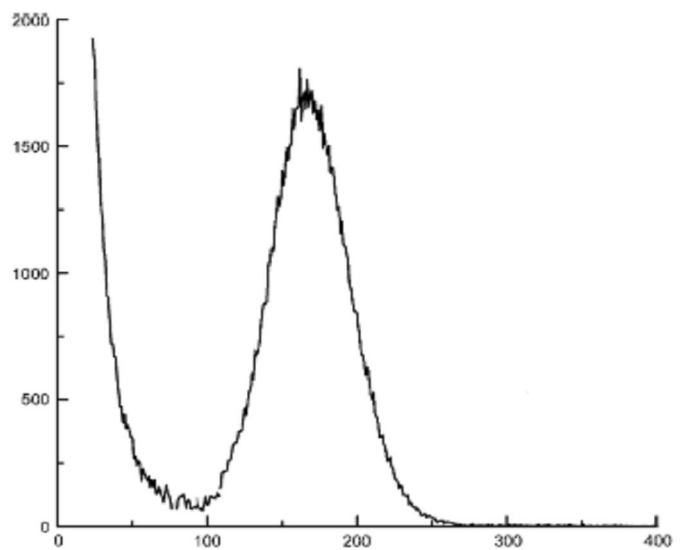


Рис. 5. Спектр амплітуд імпульсів сцинтилятора LiB_3O_5 (LBO), $E_n = 5,5$ MeV, ^{238}Pu ; $R_n=33\%$.

Порівняння характеристик отриманого сцинтилятора $\text{LiPO}_2(\text{Bi})$ з відомим сцинтилятором на основі літійового скла, активованого церієм (табл. 3) показує, що за світловим виходом і прозорістю для власних сцинтиляцій

Таблиця 3

Характеристики склоподібних сцинтиляторів $\text{Li}_2\text{O-SiO}_2(\text{Ce})$ і $\text{LiPO}_2(\text{Bi})$

Характеристики	$\text{Li}_2\text{O-SiO}_2(\text{Ce})$	$\text{LiPO}_2(\text{Bi})$
Густина, г/см ³	2,6	2,0
λ_{max} висвітлювання, нм	420	690
Край поглинання, нм	360	300
Показник заломлення	1,56	1,47
Час висвітлювання, мкс	0,06	3,0
Світловий вихід, фотони/MeV	2000	4000
α / γ - відношення	0,2	0,2

Четвертий розділ присвячений оптимізації використання СД для визначення γ -випромінювачів в зразках.

При радіометричному визначенні радіонуклідів в зразках найбільш ефективними є дві геометрії вимірювань. Охоплююча геометрія джерела (геометрія судини Марінееллі) застосовується для вимірювання проб великого об'єму для контролю забруднень радіонуклідами об'єктів навколишнього середовища. Охоплююча геометрія сцинтиляційного детектора (детектори з колодязем) використовується для вимірювання малих зразків з введеними

радіонуклідами. В обох випадках задачею є підвищення чутливості детектора з і зниження фонові дії на нього n_{ϕ} , оскільки мінімальна активність MDA , що вимірюється, при заданому часі вимірювань t , визначається цими параметрами:

$$MDA = 2/\eta * (n_{\phi}/t)^{1/2} \quad (11)$$

Зниження фону досягається застосуванням пасивного захисту з важких металів, що забезпечують високу кратність ослаблення зовнішнього випромінювання. При цьому для переносних систем важливі невеликі габарити (вага) захисту.

На прикладі варіантів детектуючих систем з судиною Марінеллі місткістю 1л, 0.5л і 0.25л з сцинтиляторами на основі ЛГК і важких оксидів розмірами $\varnothing 63 \times 63$ мм, $\varnothing 40 \times 40$ мм і $\varnothing 25 \times 25$ мм, за допомогою послідовного моделювання і експериментальних вимірювань показана роль різних чинників у формуванні чутливості сцинтиляційного детектора і методів визначення MDA .

Для методу лічення у вікнах чутливість η представлена у вигляді:

$$\eta = K_1 * K_2 * K_3 * K_4, \quad (12)$$

де K_1 – вихід реєстрованих у вікні γ - квантів на розпад (визначається схемою розпаду радіонукліда);

K_2 – вірогідність попадання γ - кванта з початковою енергією в сцинтилятор;

K_3 – вірогідність поглинання γ - кванта в сцинтиляторі за рахунок будь-якого процесу;

K_4 - відносна частина фотонів, що повністю втратили енергію в сцинтиляторі, у тому числі і за рахунок багатократного розсіяння.

Значення K_2 , K_3 , K_4 знаходилися методом послідовного моделювання. η і MDA знаходилися як з симульованих, так і з експериментальних спектрів для радіонуклідів ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th . Фонові спектри вимірювалися експериментально.

З використанням отриманих результатів показано, як формується MDA з усереднених характеристик досліджуваного зразка і детектора (K_1 , K_2 , K_3 і K_4). В геометрії судини Марінеллі забезпечується прийнятний тілесний кут огляду джерела детектором і, відповідно, достатньо велике значення коефіцієнта K_2 . Коефіцієнти K_3 і K_4 залежать від характеристик сцинтилятора і ростуть з його розмірами. Для достатньо великого сцинтилятора $\varnothing 63 \times 63$ мм добуток $K_2 * K_3 * K_4$ слабо залежить від енергії і в цьому випадку всі відмінності в чутливостях η і MDA пов'язані з K_1 . Зменшення розмірів зразка і, відповідно детектора, приводить до зменшення η через геометричний чинник K_2 і значне зниження ефективності реєстрації (K_3 і K_4). При зменшенні об'єму судини Марінеллі удвічі (і при відповідному зменшенні детектора) чутливість η падає в 2-3 рази. При цьому зменшується фонові швидкість лічення n_{ϕ} , що приводить до збільшення MDA тільки в 1,2 – 2,2 рази відповідно. Застосування важких кристалів CWO і BGO замість NaI(Tl) знижує MDA в 2.5 рази, для розміру $\varnothing 63 \times 63$ мм, і в 3 – 4 рази, для розміру $\varnothing 40 \times 40$ мм.

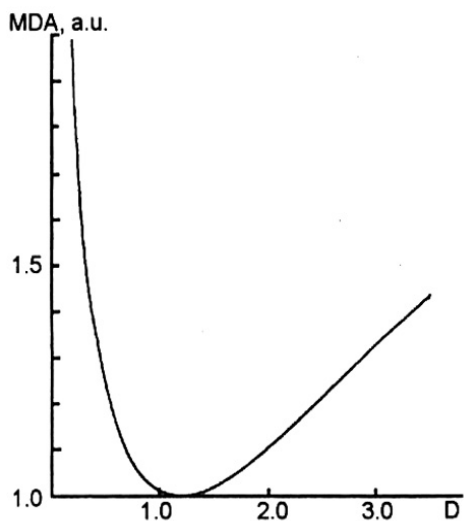


Рис.7. Залежність MDA (нормована на мінімальне значення) від ширини вікна реєстрації (в одиницях ширини D піку на половині його висоти).

Для «віконного» метода визначення активностей радіонуклідів залежність η , n_ϕ і MDA від ширини вікна Δ і розділення R може бути дана в явному вигляді, що дозволяє оптимізувати ці величини. Така залежність для MDA представлена на рис. 7. Мінімальне значення MDA може бути отримано при $\Delta = 1.189 D$ (D – ширина піку на половині висоти).

Чутливість визначення радіонуклідів можна збільшити, використовуючи метод підгонки, коли спектри окремих радіонуклідів (базові спектри $\Sigma^{(m)}(E)$, m – індекс радіонукліда), які отримують експериментально або за допомогою моделювання, підбираються для оптимального заповнення вимірюваного спектру $S_{mix}(E)$ цього зразка:

$$S_{mix}(E) = \sum_m C^{(m)} * \Sigma^{(m)}(E) \quad (13)$$

Коефіцієнти заповнення $C^{(m)}$ знаходять шляхом мінімізації квадратів відхилення заповненого спектру від вимірюваного:

$$\int [S_{mix}(E) - \sum_m C^{(m)} * \Sigma^{(m)}(E)]^2 * w(E) = \min \quad (14)$$

Отримані оптимальні значення $C^{(m)}$ дозволяють знайти активності $A^{(m)}$, при відомих коефіцієнтах $L^{(m)}_2$ і $L^{(m)}_3$.

$L^{(m)}_2$ – середня вірогідність попадання γ - квантів із зразка в сцинтилятор

$L^{(m)}_3$ – середня вірогідність взаємодії γ - квантів в сцинтиляторі.

В методі підгонки базові функції $\Sigma^{(m)}(E)$ більшою мірою відрізняються одна від одної, коли розділення покращується. Це підвищує ефективність ідентифікації радіонуклідів. Така ситуація ускладнює вибір оптимального матеріалу оскільки перевага важких сцинтиляторів CWO і BGO перед $NaI(Tl)$, у вигляді високої ефективності реєстрації, втрачається через їх гірше розділення.

В іншому варіанті, коли детектор охоплює об'ємне джерело (детектор з колодязем), разом з необхідністю прогнозувати ефективність поглинання випромінювання в джерелі і сцинтиляторі, виникає проблема оптимізації світлозбору в детекторі складної конфігурації. В детекторі з колодязем існують дві області виникнення сцинтиляцій, для яких умови світлозбору істотно відрізняються. Сцинтиляції під дном колодязя дають значно більший вихід світла (з великою часткою прямого світла), ніж сцинтиляції, що виникають в циліндрових зазорах між стінками колодязя. Це приводить до появи подвійних піків повного поглинання в експериментальних спектрах (рис. 8а). Така

ситуація спостерігається і в модельних спектрах при однотипній обробці поверхонь сцинтилятора. При моделюванні світлозбора в детекторах такої конфігурації показано, що вирівнювання коефіцієнтів світлозбора в об'ємі кристала досягається шляхом збільшення транспортної здатності циліндрових стінок колодязя (поліровка, дзеркальний відбивач) і зменшення направлених віддзеркалень від дна колодязя (грубе матування, зменшення відбиваючої здатності). Застосування цих прийомів приводить до покращення спектрометричних характеристик детекторів з колодязем (мал. 8б).

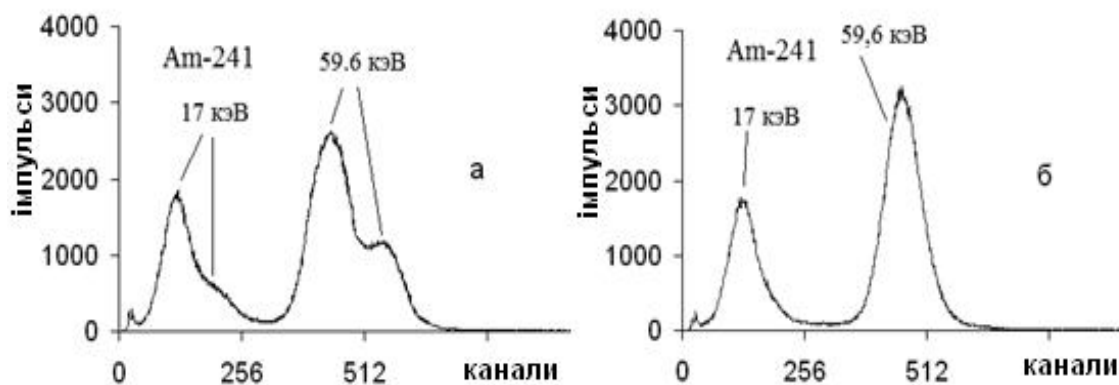


Рис.8. Експериментальні спектри γ - (60 кеВ) і рентгенівського (17 кеВ) випромінювання ^{241}Am для детектора з колодязем, при стандартній (а) і вибіркової (б) обробці і упаковці сцинтилятора

Таким чином, вибір матеріалу сцинтилятора, обробка його поверхонь з урахуванням необхідної форми сцинтилятора, а також застосування певних матеріалів відбивачів, забезпечують отримання СД з характеристиками, оптимальними для вирішення конкретних задач реєстрації іонізуючого випромінювання.

При вимірюваннях малої активності розділення погіршується через довготривалу нестабільність вимірювального тракту.

В роботі досліджені можливості стабілізації вимірювального тракту з використанням джерел α - випромінювання у складі детекторів, які дають опорний сигнал для стабілізації вимірювального тракту. В цьому випадку важливою вимогою є можливість отримання опорного сигналу з амплітудою, що перевищує амплітуди сигналів досліджуваного γ - випромінювання (3,5 МеВ). Така можливість пов'язана з енергією реперного α - випромінювання (звичайно більше 5 МеВ) і з властивостями матеріалу сцинтилятора. Різні сцинтилятори дають різне відношення сигналів для частинок, що створюють високу (α -частинки) і низьку (електрони середніх і більш високих енергій) густину іонізації, так зване « α/γ – відношення».

Були досліджені α/γ – відношення (табл. 4), температурна залежність α/γ – відношення (табл. 5), а також залежність α/γ – відношення від часу формування сигналу (рис. 9) для сцинтиляційних матеріалів різного типу.

Таблиця 4

 α/γ відношення для сцинтиляторів на основі неорганічних сцинтиляторів

Сцинтилятор	NaI(Tl)	CsI(Tl)	CsI(Na)	CW	BG	GSO(Ce)	BaF ₂	ZnSe(Te)
α/γ	0,66	0,67	0,45	0,21	0,20	0,20	0,34	1,05

Таблиця 5

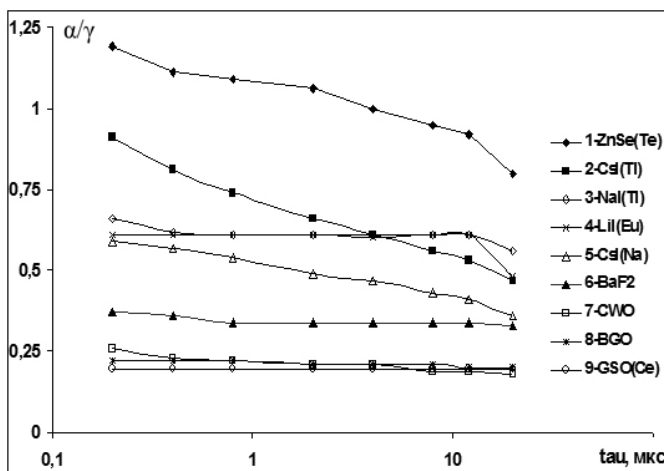
Зміна α/γ відношення з температурою для лужно-галоїдних і оксидних сцинтиляторів

t, °C	$\Delta\alpha/\gamma$, %				
	NaI(Tl)	CsI(Tl)	CsI(Na)	BGO	CWO
-20	+7	+35	+25	0	0
+80	-3	-15	-30	0 ^{a)}	-10 ^{a)}

а) значення при температурі 60 °C.

Результати дослідження показують, що найбільш ефективними сцинтиляторами для застосування в радіометричних і спектрометричних системах із стабілізацією за допомогою реперного α - джерела є сцинтилятори на основі ЛКГ.

Важливою характеристикою сцинтиляторів з реперними α - джерелами є

Рис. 9 Залежність α/γ відношення від часу формування сигналу.

апаратне розділення по γ - і α - лініям. Основні шляхи покращення цих характеристик – вибіркова обробка поверхні сцинтиляторів і вибір відбивачів для різних ділянок поверхні сцинтилятора. Для отримання високого розділення для α - лінії необхідне зменшення втрат енергії в поверхневому мертвому шарі сцинтилятора. Це досягається, як зменшенням товщини мертвого шару при вибірковій поліровці поверхні, так і виключенням α - частинок з великими кутами падіння

на поверхню сцинтилятора, з використанням багатодірчастого коліматора. Таким шляхом для СД на основі монокристала NaI(Tl) розмірами $\varnothing 63 \times 63$ мм вдається отримати розділення краще ніж 4% (табл. 6).

Таблиця 6

Характеристики блоків детектування на основі кристалів NaI(Tl) $\varnothing 63 \times 63$ мм з реперними α - джерелами

Тип ФЭУ	Характеристики		
	R_{α} , %	R_{γ} , %	$L_{\alpha/\gamma}$, MeV
ФЭУ-183	4 - 5	7 - 8	3,0 - 3,5
Hamamatsu R1307	3 - 4	6 - 7	3,0 - 3,5

В п'ятому розділі описані результати дослідження СД короткопробіжного випромінювання.

В детекторах рентгенівського випромінювання на основі активованих лужно-галоїдних кристалів різниця в характеристиках поверхневого шару і об'єму сцинтилятора грає важливу роль. Це проявляється в зміні питомого світлового виходу для рентгенівського випромінювання з різною глибиною проникнення в сцинтилятор. За допомогою комп'ютерного моделювання оцінена роль світлозбору у формуванні непропорційності світлового виходу і

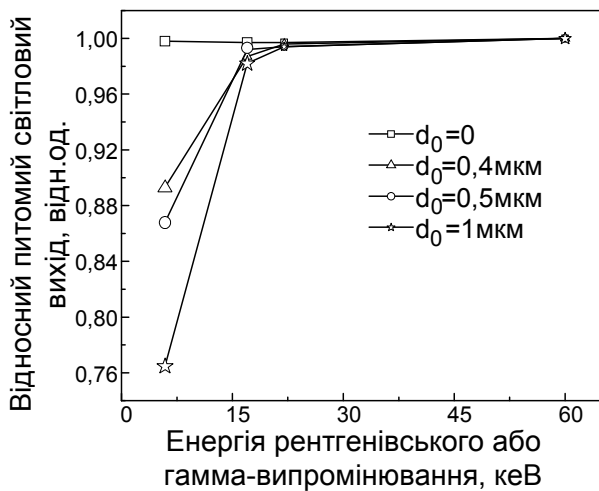


Рис.10. Зміна відносного питомого світлового виходу від енергії випромінювання для полірованого зразка CsI(Tl) розміром $\varnothing 25 \times 4$ мм з дифузними бічним і торцевим відбивачами (тетратек), для різних значень параметра мертвого шару d_0 , при опромінюванні всієї вхідної поверхні сцинтилятора.

відповідає зміна сцинтиляційної ефективності в поверхневому шарі сцинтилятора.

При моделюванні світлозбору в детекторах на основі CsI(Tl) з різною обробкою вхідної поверхні отримана радіальна залежність коефіцієнта світлозбору для випадків реєстрації слабо проникаючого рентгенівського і γ -випромінювання в діапазоні енергій від 5,9 до 60 кеВ. Для вказаних значень енергії матування поверхні приводить до зменшення коефіцієнта світлозбору, особливо для центральної частини сцинтилятора. При цьому різниця коефіцієнтів світлозбору для різних ділянок поверхні зменшується, що приводить до покращення розділення сцинтилятора.

Найбільше вирівнювання коефіцієнта світлозбору отримано для випадку реєстрації проникаючого γ -випромінювання, яке дає рівномірний розподіл спалахів по глибині вказаного сцинтилятора. При менших енергіях випромінювання радіальні розподіли практично співпадають, як у разі полірованої, так і матованої поверхні. Це пов'язано з майже однаковими умовами світлозбору для діапазону енергій від 5,9 до 60 кеВ, при відповідній зміні глибини проникнення випромінювання від 3 до 300 мкм.

втраченої енергії. Коефіцієнти світлозбору, отримані в результаті моделювання, змінюються в незначній мірі для глибин проникнення рентгенівського випромінювання в діапазоні енергій 5,9 – 60 кеВ. Питомий світловий вихід не змінюється, при постійній сцинтиляційній ефективності в об'ємі сцинтилятора (рис.10, $d_0 = 0$).

При введенні в умови моделювання параметра мертвого шару питомий світловий вихід змінюється (рис.10, $d_0 > 0$) і наближається до експериментальних значень.

Це показує, що для СД рентгенівського випромінювання на основі ЛГК за непропорційність світлового виходу втраченої енергії

Запропоновано варіанти зменшення цієї залежності і покращення спектрометричних характеристик детекторів. Серед цих варіантів - обробка поверхні, упаковка сцинтилятора, оптичні контакти, відбивачі, застосування яких збільшує світловий вихід і, тим самим, підвищує роздільну здатність СД за рахунок зменшення статистичного внеску фотоприймача.

Показано, що значну роль в підвищенні світлового виходу грає характер вихідної поверхні сцинтилятора (табл. 7).

Таблиця 7

Залежність коефіцієнта світлозбору від характеру
вхідної і вихідної поверхонь сцинтилятора

Вхідна поверхня	Полірована	Матована	Полірована	Матована
Вихідна поверхня	Полірована	Матована	Матована	Полірована
Коефіцієнт світлозбіру, відн.од.	0,699	0,893	0,892	0,817

Створення шорхуватої поверхні приводить до зростання числа мікро майданчиків, для яких кут падіння променя світла менше критичного. В результаті цього зростає кількість промінів світла, які заломлюються і виходять за межі об'єму сцинтилятора. Для випадку вихідного вікна сцинтилятора це приводить до збільшення коефіцієнта світлозбору. Світло, яке вийшло через вхідну поверхню сцинтилятора, відбивається від дзеркального відбивача і з великою вірогідністю, у разі шорсткої поверхні, повертається в об'єм сцинтилятора. За відсутності відбивача світло, що вийшло через вхідну поверхню сцинтилятора, втрачається.

Експериментальні дослідження впливу обробки поверхонь сцинтилятора підтверджують результати моделювання.

Експериментально досліджено роботу рентгенівського СД великій площі ($\sim 300\text{см}^2$) у складі комбінованого детектора (КД) при реєстрації рентгенівського випромінювання радіонуклідів ^{239}Pu і ^{241}Am ($E = 17\text{keV}$). Показана можливість зниження фону зовнішнього випромінювання і покращення умов реєстрації рентгенівського випромінювання при визначенні радіонуклідів ^{239}Pu і ^{241}Am в організмі людини за допомогою КД, в якому детектором рентгенівського випромінювання ^{239}Pu і ^{241}Am служив тонкий монокристалічний сцинтилятор NaI(Tl) $\varnothing 200 \times 2\text{мм}$. Об'ємний кристал на основі CsI(Tl) $\varnothing 200 \times 40\text{мм}$ служив охоронним сцинтилятором для зниження фонові швидкості лічення в NaI(Tl) . Кванти з енергією 10-50 кеВ поглинаються, в основному, в тонкому кристалі NaI(Tl) . γ - кванти з більшою енергією взаємодіють переважно з кристалом CsI(Tl) або ж одночасно з обома кристалами. Фотопомножувач проглядає обидва кристали, а дискримінатор форми імпульсів визначає, в якому з двох сцинтиляторів відбулася взаємодія. При одночасній взаємодії в двох сцинтиляторах сигнал виключається з реєстрації в робочому сцинтиляторі NaI(Tl) . Результат роботи КД з дискримінатором імпульсів за їх формою представлений на рис. 11.

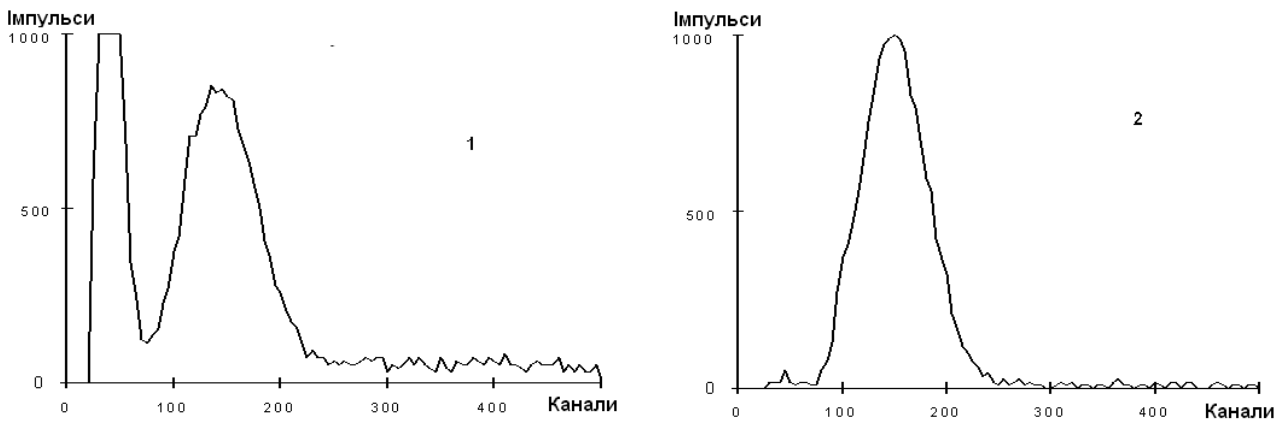


Рис.11. Спектри рентгенівського випромінювання ^{239}Pu ($E = 17\text{keV}$) з КД:
1 - без схеми розділення 2 - зі схемою розділення

Підхід з використанням послідовного моделювання застосований при дослідженні трансформації спектрів β -випромінювання $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, які реєструються за допомогою пластмасового скінтілятора (ПС).

Для забезпечення можливості ідентифікації по енергії β -випромінювання кількох радіонуклідів (включаючи $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$), товщина ПС повинна бути такою, щоб в ній уклалися пробіги більшості β -частинок, що випромінюються, з урахуванням часткової втрати енергії в об'ємному зразку і шляхів під різними кутами в скінтіляторі. За допомогою моделювання і експериментально досліджена трансформація спектрів β -випромінювання радіонуклідів $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, а також корпускулярного випромінювання ^{137}Cs (β -випромінювання і ЕВК) при використанні ПС різної товщини. Показано, що при реєстрації випромінювання ^{90}Y ($E_{\beta\text{max}} = 2.24\text{MeV}$) без деградації спектрів оптимальною є товщина ПС, що дорівнює 6мм.

Оцінені чутливості і МДА при визначенні ^{90}Sr з використанням ПС різної товщини. Фонова швидкість лічення в інтервалі енергій 0,05-2,5 МеВ складала 0,15 і 0,18 імп/с для ПС завтовшки 2 і 8 мм відповідно. Енергетичне розділення для конверсійних електронів 624кеВ складає 16,9 і 15,5% відповідно.

Ефективність реєстрації детектора для β -випромінювання $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ складала 0,8 (за рахунок поглинання β -випромінювання у вхідному вікні). Оцінка чутливості дає $0,001 \text{ імп.} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}$, а МДА $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ - 30 Бк (1 нКи), за час вимірювання 10 хв.

В шостому розділі представлені результати дослідження гетерогенних скінтіляторів (ГС). ГС складаються з дисперсної фази скінтілятора і дисперсійного середовища, прозорого для світла скінтіляцій.

За допомогою комп'ютерного моделювання досліджено особливості втрат енергії і проходження світла в ГС з великим числом меж розділу фаз речовини.

Для моделювання апаратних спектрів ГС застосовано принцип поетапного моделювання (див. розділ 2), з включенням етапів моделювання втрат енергії в матеріалах ГС, проходження світла в такій системі і формування апаратних спектрів. ГС представлений у вигляді об'єму, розбитого на умовні осередки, із заданими: розподілом, формою, розміром і положенням частинок дисперсної фази в осередках. Етап моделювання втрат енергії використовує

відомі прийоми моделювання проходження заряджених частинок через речовину, з урахуванням багатьох меж в ГС. Етап моделювання проходження світла враховує поглинання світла середовищами, а також віддзеркалення і заломлення на межах середовищ.

За допомогою такого підходу досліджені: залежності ефективності світлозбору, характеру втрат енергії у фазах, змін в апаратурних спектрах від розмірів ГС, розміру і форми частинок дисперсної фази, концентрації частинок, властивостей матеріалів ГС.

При дослідженні втрат енергії показано, що, разом із зростанням втрат у фазі сцинтилятора при збільшенні густини матеріалу сцинтилятора і збільшенні його вмісту в системі, спостерігається зменшення коливань втрат енергії при зменшенні розміру частинок сцинтилятора. Цей ефект, певною мірою, може компенсувати погіршення розділення при збільшенні числа меж розділу, які розсіюють світло.

При дослідженні проходження світла в ГС показано, що вплив розмірів частинок і їх концентрації, може бути охарактеризовано умовним параметром «число меж розсіювання», який, разом з відносним показником заломлення, визначає прозорість тонких шарів ГС. Також досліджено вплив форми частинок дисперсної фази на проходження світла в ГС (для частинок правильної форми прозорість може зростати за рахунок зменшення кількості віддзеркалень на межах розділу фаз).

При моделюванні апаратурних спектрів ГС знайдена значна радіальна залежність амплітуд імпульсів, яка спостерігається і для плоских гомогенних сцинтиляторів.

Експериментально досліджено ГС, які були отримані методами, придатними для створення детекторів великої площі. Це – полімерні плівки, пресування, напилені плівки, композиційні плівки.

Для напилених плівок органічних кристалів (антрацена, стільбена, паратерфеніла) проведено порівняння світлового виходу. Показано, що ефективність збору світла з ГС можна підвищити більшою мірою, зміщуючи спектр що виходить з сцинтилятора світла в область максимальної чутливості фотоприймача.

Проведено порівняння характеристик ГС ПТФ у вигляді пресувань, дисперсій в кремнійорганічному полімері і в епоксидній матриці. Показано, що пресування мають більш високий світловий вихід, ніж дисперсії. Кращий результат для дисперсій (90% від світлового виходу ПТФ) досягається шляхом підбору кремнійорганічної матриці за показником заломлення і відпалу в ній ПТФ (табл. 10). В той же час за значенням однорідності чутливості по поверхні сцинтилятора кращий результат дають дисперсії.

При дослідженні питомих втрат в монокристалічних і пресованих зразках паратерфеніла і стільбена знайдено, що більш велика непропорційність відгуку спостерігається для пресованих зразків. Висока непропорційність питомого світлового виходу стільбена і паратерфеніла, отриманих методом гарячого пресування, приводить до погіршення розділення в порівнянні з монокристалічними зразками.

Таблиця 10.

Сцинтиляційні характеристики сцинтиляторів на основі кристалів активованого паратерфеніла великої площі

Матеріал сцинтилятора	Розміри, мм	Світловий вихід, %		Неоднорідність чутливості, %
		без відпалу	з відпалом	
Монокристал	Ø80 × 3	100	100	±20
Кремнійорганічний композиційний сцинтилятор	-//-	82	90	±3
“_”	Ø120 × 3	84	93	±4
“_”	Ø160 × 3	85	95	±5
“_”	Ø200 × 3	87	96	±5

Більш низький питомий світловий вихід для частинок з великим пробігом може бути пов'язаний з великими втратами їх енергії в проміжках, що не сцинтилюють, в порівнянні з менш проникаючими частинками менших енергій.

В сьомому розділі надані результати дослідження спеціалізованих СД на основі ГС.

Спеціалізований сцинтиляційний резонансний детектор (СРД) призначений для реєстрації резонансного випромінювання в ядерній γ -резонансній спектроскопії.

Він містить розподілені в органічному сцинтиляторі частинки конвертора, який трансформує резонансне γ -випромінювання в електрони внутрішньої конверсії (ЕВК).

Розрахунковим шляхом обґрунтовано можливість створення СРД на ^{57}Fe . При малих енергіях ЕВК (7.3кеВ для випадку ^{57}Fe) розмір частинок конвертора визначає спектр ЕВК, що виходять з нього.

Визначено діапазон розмірів частинок конвертора (менш 0.5мкм), що забезпечує прийнятну ефективність резонансної реєстрації. Оцінено ефективність реєстрації фонового (нерезонансного) випромінювання для різних розмірів частинок конвертора. Показано, що прийнятні величини ефективності резонансної реєстрації (не менше 60 %) при незначній частці нерезонансної реєстрації (не більше 2%) можуть бути досягнуті при вмісті ^{57}Fe близько $5 \cdot 10^{-3}$ г/см² для радіусів частинок конвертора 0.2-0.4мкм.

Методами експериментального моделювання (з визначенням величини ефекту резонансного поглинання, ізомерного зсуву, форми резонансної лінії) знайдено матеріали для конвертора резонансного випромінювання, що містять ^{57}Fe . Досліджено зміни ефективності резонансного поглинання для високодисперсного стану цих матеріалів. Підібрано органічні сцинтилятори, придатні для створення СРД на ^{57}Fe . Досліджено зміни оптичних характеристик і параметрів γ -резонансних спектрів у змішаних системах «сцинтилятор - конвертор», на підставі яких запропоновано систему «фероціанід калія - рідкий сцинтилятор (ВРО і альфа-метілнафталін)», що дозволяє отримати СРД з високою ефективністю резонансної реєстрації. Отримано і досліджено модельні

зразки СРД на основі вибраної системи «сцинтилятор - конвертор». Результати вимірювань підтвердили висновок, зроблений на підставі розрахункових оцінок, про можливість створення СРД на основі ^{57}Fe з ефективністю резонансної реєстрації, що перевищує 60%.

Досліджено можливості використання ГС, призначених для реєстрації короткопробіжного випромінювання, в спеціалізованих комбінованих детекторах (КД). Особливість таких детекторів полягає в тому, що вони складаються з декількох сцинтиляторів, а світлові імпульси, що народжуються в різних сцинтиляторах, реєструється одним фотоприймачем (ФП). Сцинтилятори (звичайно два) оптично сполучені торцями між собою і, через торець одного з сцинтиляторів, з фотоприймачем. Випромінювання одного вигляду або енергії реєструється переважно в одному з сцинтиляторів: короткопробіжне – в ближньому до вхідного вікна сцинтиляторі, більш проникаюче – в ближньому до ФП. Розділення сигналів від різних сцинтиляторів проводять при аналізі форми імпульсу ФП, з використанням спеціальних схем розділення.

В роботі досліджено варіанти КД для вибіркової реєстрації рентгенівського випромінювання на фоні γ - випромінювання і β - випромінювання на фоні γ -випромінювання. Для кожного варіанту вибірковість забезпечується вибором сцинтиляторів і їх розмірів. Основні вимоги до матеріалів сцинтиляторів - велика відмінність в часах висвітлювання і достатня власна і взаємна прозорість сцинтиляторів для світла сцинтиляцій. Ближній до ФП сцинтилятор додатково повинен виконувати роль світловода.

Полікристалічна плівка CsI(Tl) досліджувалася в КД спільно з ПС на основі полістиролу для одночасної роздільної реєстрації рентгенівського і β -випромінювання. Полікристалічний шар CsI(Tl) товщиною близько 40 мкм (розмір зерен складав близько 5 мкм), отриманий методом термічного випаровування у вакуумі, використовувався для реєстрації рентгенівського і м'якого γ -випромінювання. ПС завтовшки 5мм реєстрував більш довгопробіжне β - випромінювання. Сигнали від плівки і ПС з тривалістю 800 і 10 нс, відповідно, розділяються за формою імпульсу.

Такий КД може застосовуватися для визначення вмісту радіонуклідів в об'ємних зразках. Зразки розташовують над вхідним вікном КД, під яким знаходиться тонкий сцинтилятор на базі плівки CsI(Tl) . Імпульси від КД розділяють за формою і, після аналізу їх амплітуди, накопичують як окремі спектри.

На рис. 12 представлені спектри амплітуд імпульсів від суміші радіонуклідів ^{239}Pu (активність близько 10^3 Бк) і ^{90}Sr (активність близько 10^2 Бк), що були отримані за допомогою описаного КД. Вміст ^{239}Pu можна визначити за піком рентгенівського випромінювання (енергія 17 кеВ). ^{90}Sr визначається по частині безперервного β - спектра в певному енергетичному вікні.

Для реєстрації β - випромінювання у присутності γ - випромінювання необхідні легкі сцинтилятори на основі органічних матеріалів.

Найпростіше рішення – використання для реєстрації β - випромінювання пластмасових сцинтиляторів (ПС). Вони забезпечують створення детекторів великої площі без розсіяння світла.

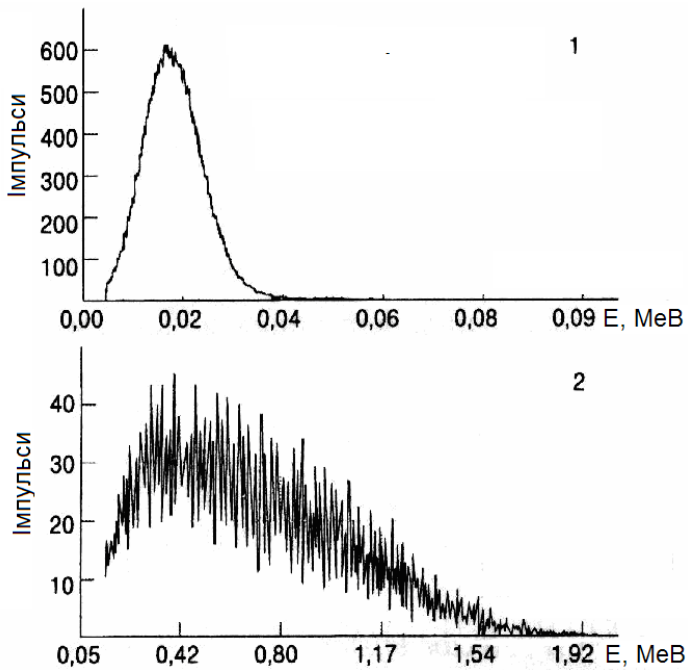


Рис. 12 Спектри амплітуд імпульсів від суміші радіонуклідів ^{239}Pu (1 - активність близько 10^3 Бк) і $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ (2 - активність близько 10^2 Бк).

визначені: власний фон у відповідних вікнах реєстрації, ефективність реєстрації, внески супутніх випромінювань у вікна реєстрації. Використання плівки ПТФ (товщина $\sim 60\mu\text{м}$) значно зменшує фон від γ – випромінювання, в порівнянні з ПС завтовшки 5мм, але не забезпечує роботу в спектрометричному режимі. Збільшення товщини плівок ПТФ приводить до значного зниження світлового виходу через розсіяння світла на межах зерен гетерогенної системи.

Дослідження особливостей проходження світла сцинтиляцій в гетерогенній системі показало, що ослаблення потоку світла до фотоприймача залежить від числа меж розсіювання (див. розділ 6). Для зменшення числа меж розсіювання в гетерогенних сцинтиляторах, що повинні мати товщину, достатню для спектрометричних вимірювань, було використано метод отримання пластин ПТФ (гаряче пресування) великого діаметра ($>100\text{мм}$) і товщини (до 5мм).

Для з'ясування впливу особливостей різних конфігурацій КД на його сцинтиляційні і радіометричні характеристики були проведені модельні експериментальні дослідження органічних сцинтиляторів у складі КД на основі: 1) пресувань ПТФ розмірами: $\text{Ø}100 \times 4,0$ мм (детектор №1), $\text{Ø}100 \times 5,0$ мм (детектори №2-3); 2) ПС розмірами $\text{Ø}100 \times 5,0$ мм (детектор №4); 3) плівки ПТФ завтовшки 0,055мм, нанесеної на вхідне вікно упакованого неорганічного сцинтилятора (детектор №5).

В якості сцинтилятора для детектора γ -квантів був обраний NaI(Tl) розмірами $\text{Ø}100 \times 40$ мм в двовіконному контейнері, вихідне і вхідне вікна якого були виконані з кварцу. Як бічне світловідбиваюче покриття використовувався фторопласт, що має низькі фонові характеристики. Результати вимірювань представлені в табл. 11.

В дисертаційній роботі були вивчені можливості створення β - γ - КД з використанням у якості β - лічильника плівки органічного сцинтилятора, нанесеної на об'ємний неорганічний сцинтилятор. Така плівка (товщина біля 50 $\mu\text{м}$) може реєструвати тільки невелику частину енергії β - частинки. Для ПС, що має невеликий світловий вихід, отриманий сигнал виявляється нижче за поріг реєстрації.

Для збільшення сигналу була використана полікристалічна плівка паратерфеніла (ПТФ), яку наносили методом вакуумного напилення на вхідне вікно двовіконного упакованого сцинтилятора на основі NaI(Tl) . Для отриманого КД

Характеристики КД з різними варіантами органічних сцинтиляторів

Детектор	Світловий вихід, %		Питома чутливість, імп/Бк·с·см ²		Фонова швидкість лічення у вікні, імп/с	
	Для β	Для γ	Для β	Для γ	⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	¹³⁷ Cs
1 прес. ПТФ 4,0 мм	180	120	9,2	5,8	4,1	5,3
2 прес. ПТФ 5,0 мм	150	110	8,2	5,7	4,4	5,4
3 прес. ПТФ 5,0 мм	220	120	9,4	6,4	4,6	5,1
4 блок. ПС 5,0 мм	100	100	5,0	5,3	7,1	7,3
5 плівка ПТФ 0,055мм	95	105	5,1	5,4	6,8	5,5

При заміні прозорого ПС (КД №4) на пресований ПТФ (КД №2) однакових розмірів отримано збільшення світлового виходу у 1,5 рази, незважаючи на значне ослаблення світла в ПТФ за рахунок його розсіювання у гетерогенному пресованому сцинтиляторі. Це пов'язано із майже п'ятикратною перевагою ПТФ над ПС за сцинтиляційною ефективністю. Зменшення товщини ПТФ (КД №1) додатково підвищує світловий вихід за рахунок зменшення кількості меж розсіювання світла. Ще більше зростання виходу світла (КД №3) було отримано при зменшенні відбиття світла на оптичних межах «сцинтилятори – оптичні вікна - ФЕП» за допомогою імерсійних середовищ з оптимізованими показниками заломлення.

З причини сильного розсіювання світла напилена плівка ПТФ (КД №5) непридатна для спектрометричних вимірювань. Вона може бути застосована при товщині, в якій поглинається лише мала частка енергії β – випромінювання (десятки мікрометрів).

У порівнянні з напиленою плівкою, всі зразки пресованого ПТФ (КД №№1,2,3) дають незначну кількість меж розсіювання світла. Їх товщину можна доводити до значень, придатних для спектрометричних вимірювань.

З табл. 11 видно, що кращі оптичні і радіометричні характеристики були досягнуті для КД №3 (пресований ПТФ), в якому для оптичного з'єднання сцинтилятора NaI(Tl) з вікнами корпусу і ПТФ використовувалася композиція з підібраними показниками заломлення, а для з'єднання детектора γ-квантів з ФЕП – тиксотропна композиція. У цього детектора, в порівнянні з детектором №4 на основі ПС, світловий вихід вище, при реєстрації β -випромінювання більш ніж в 2 рази, і на 20%, при реєстрації γ -випромінювання; питома чутливість краще при реєстрації β-випромінювання на 80% і на 13% - при реєстрації γ -випромінювання; фонова швидкість лічення понижена на 42% в енергетичному вікні (⁹⁰Sr+ ⁹⁰Y) і на 10% - в енергетичному вікні ¹³⁷Cs. В порівнянні з детектором №5 (плівка ПТФ): світловий вихід детектора №3 вище при реєстрації β -випромінювання більш ніж в 2 рази і на 15% - при реєстрації γ -випромінювання; питома чутливість вище при реєстрації

β -випромінювання на 70% і на 10% - при реєстрації γ -випромінювання; фонова швидкість лічення понижена на 30% в енергетичному вікні ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$).

Проведене експериментальне моделювання показує важливу роль оптичних чинників в системах із складними умовами проходження світла сцинтиляцій до фотоприймача. Показано, що зменшення числа оптичних меж, що розсіюють світло сцинтиляцій в об'ємі ГС, і покращення умов відбиття світла на зовнішніх оптичних межах «сцинтилятор – оптичне вікно - ФЕП» за допомогою імерсійних середовищ з оптимізованими показниками заломлення, дають можливість збільшити світловий вихід і знизити поріг реєстрації β – випромінювання.

Варіанти конфігурацій, які покращують вибірковість і спектрометричні характеристики КД, можуть бути реалізовані у β - γ і α - β радіометрах, а також в системах експертного спектрометра випромінювань людини.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Сформульовано концепцію і розвинуто загальний підхід для дослідження формування відгуку СД на різних стадіях процесу реєстрації іонізуючого випромінювання, в залежності від параметрів конфігурації СД. Запропоновано метод поетапного комп'ютерного моделювання процесу реєстрації випромінювання, який відображає характер зміни спектрального розподілу відгуків на етапах реєстрації. Метод дозволяє досліджувати вплив різних чинників на параметри вихідного сигналу і прогнозувати характеристики СД заданої конфігурації.

2. Розвинуто підхід до визначення абсолютного світлового виходу сцинтиляторів і технічного світлового виходу СД. Для визначення абсолютного світлового виходу - основної характеристики сцинтиляційних матеріалів використано метод знаходження фотоелектронного виходу за розділенням фотоприймача, з урахуванням ступеню спектрального узгодження сцинтилятора і фотоприймача, а також коефіцієнта світлозбору, який отримують шляхом моделювання. На основі запропонованого підходу розроблено міжнародний стандарт для визначення технічного світлового виходу і власного розділення СД (упакованих сцинтиляторів).

3. При моделюванні світлозбору запропоновано представляти розподіли мікро майданчиків на модельній шорсткій поверхні за допомогою експериментальних даних, отриманих при вимірюваннях індикатрис розсіяння світла поверхнями, які оброблені абразивами з різним розміром зерна. З урахуванням схеми рефлектометра, що використовувався, запропонована модифікація формул для розрахунку функцій розподілу мікро майданчиків на шорсткій поверхні.

4. При дослідженні особливостей реєстрації γ – випромінювання за допомогою комп'ютерного і експериментального моделювання показано, що СД на основі важких оксидних матеріалів можуть забезпечити зменшення габаритів об'ємного джерела і ваги пасивного захисту, в порівнянні з СД на основі NaI(Tl), при збереженні високої чутливості. Для вимірювань в геометрії

охоплення джерел детектором показано, що, при складних умовах світлозбору для цього випадку, можна отримати покращення розділення, забезпечивши транспорт світла з віддалених областей детектора і обмеживши його для областей, що прилягають до вихідного вікна.

5. Вперше досліджено температурну залежність α/γ – відношення для сцинтиляторів різних типів (ЛГК, оксидних, $A^{IV}B^{VI}$). Оцінені можливості використання досліджених сцинтиляторів для стабілізації вимірювального тракту γ – спектрометрів і радіометрів за допомогою вбудованого джерела α - частинок. Показано, що за сукупністю характеристик перевагу, при побудові таких СД, мають сцинтилятори на основі ЛГК.

6. Для СД рентгенівського випромінювання на основі ЛГК знайдено, що за непропорційність світлового виходу втраченій енергії відповідає відмінність сцинтиляційної ефективності в поверхневому шарі і в об'ємі сцинтилятора. За допомогою комп'ютерного моделювання показано, що значну роль у формуванні розділення таких детекторів грає велика радіальна залежність коефіцієнта світлозбору, пов'язана з втратами світла на бічній поверхні сцинтилятора. Запропоновано варіанти зменшення цієї залежності і покращення спектрометричних характеристик детекторів. Серед цих варіантів - обробка поверхні, упаковка сцинтилятора, оптичні контакти, відбивачі, застосування яких збільшує світловий вихід і, тим самим, підвищує роздільну здатність СД за рахунок зменшення статистичного внеску фотоприймача.

7. Досліджено зміни спектрів β - випромінювання, яке реєструється тонкошаровими СД на основі органічних сцинтиляторів різної товщини. Експериментально і розрахунковим шляхом показана можливість зниження фону γ -випромінювання при збереженні характеру β - спектра, придатного для ідентифікації радіонуклідів. Знайдено оптимальні значення товщини сцинтиляторів, що забезпечує знижену ефективність реєстрації фонового випромінювання при збереженні високої ефективності реєстрації β - випромінювання.

8. Досліджено особливості втрат енергії і проходження світла в гетерогенних сцинтиляторах (ГС) з великим числом меж розділу фаз речовини. При дослідженні втрат енергії показано, що, разом із зростанням втрат у фазі сцинтилятора, при збільшенні густини матеріалу сцинтилятора і збільшенні його вмісту в системі, спостерігається зменшення коливань втрат енергії при зменшенні розміру частинок сцинтилятора. Цей ефект, певною мірою, може компенсувати погіршення розділення при збільшенні числа меж розділу, які розсіюють світло. При дослідженні проходження світла в ГС показано, що вплив розмірів частинок і їх концентрації може бути охарактеризований умовним параметром «число меж розсіяння», який, разом з відносним показником заломлення, визначає прозорість тонких шарів ГС. Також досліджено вплив форми частинок дисперсної фази на проходження світла в ГС. Показано, що для частинок правильної форми прозорість може зростати за рахунок зменшення кількості віддзеркалень на межах розділення фаз.

9. Досліджено сцинтиляційні характеристики ряду матеріалів, які вперше отримані в ІСМА і ІМК. Оцінено можливості застосування досліджених

матеріалів для створення СД, призначених для радіометричних вимірювань. Для склоподібного $\text{LiPO}_2(\text{Bi})$ показано, що цей матеріал є перспективним сцинтилятором для реєстрації теплових нейтронів. Визначено його абсолютний світловий вихід (4000 фотонів / МеВ), спектр радіолюмінісценції ($\lambda_{\text{max}} = 630\text{nm}$), час висвітлювання (3мкс), концентраційну і температурну залежності світлового виходу при реєстрації частинок з різною густиною іонізації.

10. Запропоновано ГС для вибіркової реєстрації γ - випромінювання при резонансній спектроскопії на ^{57}Fe . В цьому сцинтиляторі субмікронні частинки конвертора, які містять ^{57}Fe , сконцентровані в фазі, що не сцинтилює, а сцинтилятор, який реєструє ЕВК, складає другу фазу. Вперше для такої системи реєстрації резонансного випромінювання застосовано рідкий сцинтилятор. Показано, що його застосування не змінює вірогідність резонансної реєстрації. Рідкий сцинтилятор служить також імерсійним середовищем, що збільшує прозорість СРД.

11. Дослідження реєстрації випромінювання в ГС, що входить до складу КД, призначеного для одночасної реєстрації β – і γ – випромінювання, показали, що основні умови збільшення світлового виходу, зниження порогу реєстрації β – випромінювання і покращення розділення для ГС у складі КД полягають у зменшенні числа оптичних меж, що розсіюють світло сцинтиляцій в об'ємі ГС, і покращенні умов проходження світла на зовнішніх оптичних межах «сцинтилятор – оптичне вікно - ФЕП» у КД за допомогою імерсійних середовищ з узгодженими показниками заломлення.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1*. Интегральные эксперименты в проблеме переноса ионизирующих излучений: Справочное руководство / И. В. Горячев, Ю. И. Колеватов, В.П.Семенов, Л. А. Трыков. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.

2*. Топорец А. С. Оптика шероховатой поверхности / А. С. Топорец. – Л. : Машиностроение, 1988. – 191 с.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Сцинтилляционные параметры литийсодержащих монокристаллов $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, LiTaO_3 , LiNbO_3 / Э.Л.Виноград, Ю.Т.Выдай, Л.Б.Загарий, М.Б.Космына, А.М.Кудин, А.Б.Левин, Б.П.Назаренко, В.А.Тарасов, В.В.Черников // Функциональные материалы. – 1994. - т.1, No. 2. - С.152 -154.

2. Kosmyna M.B. Expert stationary whole body spectrometer on the basis of the detection scintillation systems / M.B.Kosmyna, E.P.Sysoeva, V.A.Tarasov // Functional materials. – 1996. – vol. 3, No. 1. – PP. 120.

3. The study of the α/γ ratio for inorganic scintillation detectors / E.V. Sysoeva, V.A. Tarasov, O.V. Zelenskaya, V.A. Sulyga // Nucl.Instr.and Meth.in Phys.Res. – 1998. – vol. A 414, - P.P. 274 - 278.

4. Lithium phosphate glasses as radiation-optical converters for detection of slow neutrons / V.A.Tarasov, N.I.Shevtsov, I.I.Mirenskaya, A.B.Blank // Nucl.Instr.and Meth.in Phys.Res. – 1999. – vol. A 438, №1. – P.P. 577 – 580.
5. Optimization of scintillation detecting systems for registration and identification of low activities / M.E.Globus, B.V.Grinyov, M.A.Ratner, V.A.Tarasov // Functional materials. – 1999. - vol. 6, №1. - P.P. 22 - 32.
6. Specific morphological features of LaB_3O_6 single crystals: a new promising material for thin-layer radiation detectors / E.F. Dolzhenkova, A.N. Shekhovtsov, A.V. Tolmachev, M.F. Dubovik, B.V. Grinyov, V.A. Tarasov, V.N. Baumer, O.V. Zelenskaya // Journal of Crystal Growth. – 2001.- vol. 233. – P.P. 473–476.
7. Vydai Yu.T. Scintillation properties of films based on organic and inorganic materials / Yu.T.Vydai, V.A.Tarasov, A.A.Ananenko // Functional materials. - 2001. - vol. 8, No. 4. - P.P. 760-764.
8. Ratner M. Registration and identification of low gamma-activities: the optimal way of processing measurement data / M. Ratner, B. Grinyov, V. Tarasov // Nucl.Instr.and Meth.in Phys.Res. – 2002.- vol A 483, № 3. – P.P. 807-813.
9. Sysoeva E. Comparison of the methods for determination of Scintillation Light Yield / E. Sysoeva, V. Tarasov, O. Zelenskaya // Nucl.Instr.and Meth.in Phys.Res. – 2002. vol. A 486. - P.P. 67 – 73.
10. New type of Scintillation Detectors for Biological, Medical, and Radiation Monitoring Applications / M. Globus, B. Grinyov, M. Ratner, V. Tarasov, V. Lyubinskiy, Y. Vydai, A. Ananenko, Y. Zorenko, V. Gorbenko, and I. Konstankevych // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2004. - vol.51. - P.P. 1297-1303.
11. A Study of the Inorganic Scintillator Properties for a Phoswich Detector / Lee Woo-Gyo, KimYong-Kyun, Kim Jong-Kyung, Tarasov V., Zelenskaya O. // J. Korea Assoc. Radiat. Protect. – 2004. - v.29, No.4. - P.P. 251 – 256.
12. Scintillation characteristics of LiB_3O_5 and $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ single crystals / B.P. Nazarenko, V.Yu. Pedash, A.N. Shekhovtsov, V.A. Tarasov, O.V. Zelenskaya // Nucl.Instr.and Meth. in Phys.Res. – 2006. – vol. A 558, No 2. – P.P. 551–553.
13. Stability of spectrometric characteristics of CsI:Tl detectors depending on the surface treatment method / Yu. T. Vydai, V. A. Tarasov, A. M. Kudin, L. A. Andryushchenko, A. A. Ananenko, I. V. Kilimchuk, A. Yu. Boyarintsev, A. V. Klimov // Instruments and Experimental Techniques. – 2006. – vol. 49, No. 3. PP. 314 – 317.
14. Kilimchuk I. V. Comparison of different rough surface models for computer simulation of light collection in a scintillator/light guide system / I. V. Kilimchuk, V. A. Tarasov // Functional materials. – 2007. – vol. 14, No. 4. – PP. 505 – 509.
15. Features of scintillation characteristics of CsI:Na and NaI:Tl crystals as the basis for soft gamma radiation detectors / I. V. Kilimchuk, V. P. Gavrilyuk, B. V. Grinyov, V. A. Tarasov, Yu. T. Viday // Optical Materials. – 2008. – vol. 30. – PP. 1800 – 1802.
16. Vidayi Yu. T. Influence of inorganic scintillator light output non-proportionality and energy of registered ionizing radiation on radiometric parameters

of detectors on their base / Yu. T. Vidayi, V.A. Tarasov, T.E. Gorbacheva // Functional materials. – 2008. – vol. 15, No. 2. – PP. 279 – 282.

17. Применение сцинтиллятора на основе поликристалла активированного паратерфеніла в составе комбинированного детектора / А.А. Ананенко, Л.А. Андрищенко, Ю.Т. Выдай, Л.С. Гордиенко, Т.Е. Горбачева, Б.В. Гринев, В.А. Тарасов, В.В. Шляхтуров // Приборы и техника эксперимента. – 2008. - №6. - С. 19 – 22.

18. Study of surface roughness of CsI:Tl crystals treated by various abrasives / I. V. Kilimchuk, V. A. Tarasov, J. M. Alameda, A. A. Bobovnikov, A. Yu. Boyarintsev, S. N. Kovalchuk // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2009. – vol. 56, No. 5. – PP. 2966 – 2971.

19. Kilimchuk I. V. Study of light collection as a function of scintillator surface roughness / I. V. Kilimchuk, V. A. Tarasov, I. D. Vlasova // Radiation measurements. – 2010. vol. 45. – PP. 383 – 385.

20. Tarasov V. A. Light collection simulation in the scintillation detectors of short-range radiation / V. A. Tarasov, I. V. Kilimchuk, Yu. T. Vyday // Functional materials. – 2010. vol. 17, No. 1. PP. 100 – 106.

21. Gadolinium pyrosilicate single crystals for gamma ray and thermal neutron monitoring / O. Sidletskiy, V. Baumer, I. Gerasymov, B. Grinyov, K. Katrunov, N. Starzhinsky, O. Tarasenko, V. Tarasov, S. Tkachenko, O. Voloshina, O. Zelenskaya // Radiation Measurements.- 2010. - vol. 45, No3-6.- P.P. 365–368.

22. Impact of Lu/Gd ratio and activator concentration on structure and scintillation properties of LGSO:Ce crystals / O. Sidletskiy, V. Bondar, B. Grinyov, D. Kurtsev, V. Baumer, K. Belikov, K. Katrunov, N. Starzhinsky, O. Tarasenko, V. Tarasov, O. Zelenskaya // Journal of Crystal Growth. - 2010.- vol. 312. – P.P. 601–606.

23. Катодолюминесценция и сцинтилляционные характеристики кристаллов YAG: Ce, выращенных методом ГНК в защитной атмосфере / С.В. Нижанковский, А.Я. Данько, О.В. Зеленская, В.А. Тарасов, Ю.В. Зоренко, В.М. Пузиков, Л.А. Гринь, А.Г. Трушковский, В.П. Савчин // Письма в Журнал технической физики. - 2009. - Т. 35, Вып. 20. - С. 77-83.

24. Тарасов В.А. Использование сцинтилляторов в радиометрии / В.А. Тарасов // Функциональные материалы для науки и техники. – Харьков: Институт монокристаллов. – 2001. – С. 624.

25. Тарасов В.А. Оптимизация разрешения сцинтилляционных детекторов / В.А. Тарасов // Сцинтилляционные материалы. Инженерия, устройства, применение. – Харьков: ИСМА.- 2009. - С. 225-253.

26. А.с. 1575734 СССР Вещество для сцинтилляционного γ -резонансного детектора / Зубер В.М., Тарасов В.А. (СССР). - №4432722; заявл. 18.04.1988.

27. Пат. 61091, Украина, МКИ G01T1/20. Сцинтилляційний матеріал та спосіб його отримання / Бланк А.Б., Долгих Т.М., Миренська І.І., Тарасов В.О., Шевцов М.І.: Заявл. 16.06.99; Опубл. 17.11.2003, Бюл. №11.

28. Пат. 71833, Украина, МПК G01T1/20. Комбінований детектор / Андрищенко Л.А., Ананенко А.А., Выдай Ю.Т., Гриньов Б.В., Гордиенко Л.С., Тарасов В.А., Бояринцев А.Ю.: Заявл. 30.12.2003; Опубл. 16.01.2006, Бюл. №1.

29. Пат. 95877, Украина, МПК G01T1/20. Спосіб виготовлення полікристалічних сцинтиляторів на основі активованого паратерфенілу / Андрющенко Л.А., Гриньов Б.В., Гордиенко Л.С., Грідін С.С., Власова І.Д., Тарасов В.О., Шляхтуров В.В.: Заявл.01.11.2010; Опубл. 12.09.2011, Бюл.№17.

30. Modeling of the detection systems on the base of scintillation materials / V.A.Tarasov, E.V.Sysoeva, E.P.Sysoeva, O.V.Zelenskaya // Proceedings of the Fifth Int. conf. inorg. scint. and their appl. SCINT'99. – Moscow (Russia), 2000. – P.P. 288-292.

31. Композиционные сцинтиляционные элементы на основе мелкокристаллического паратерфеніла / А.С. Раевский, Л.А. Андрющенко, Л.С. Гордиенко, Б.В. Гринев, В.А. Тарасов // Proceedings of the Int.Conf.Curr.Probl. in Nucl.Phys and Atom.Enrgy, NPAE'2006. - Kyiv (Ukraine), 2006. – P.P. 776-778.

32. Nuclear instrumentation –Housed scintillators –Measurement methods of light output and intrinsic resolution, IEC INTERNATIONAL STANDARD 62372, First edition 2006-02

33. Расчет сцинтиляционных резонансных детекторов с заданными параметрами / Зубер В.М., Тарасов В.А. // Межгосударственная конференция «Сцинтилляторы - 93», 27-30 сентября 1993г.: тезисы докладов. – Харьков, Украина, 1993. – часть 2. - С. 67.

34. The Optimization of the Properties of the Beta-Radiation Scintillation Detectors / E.P.Sysoeva, V.A.Tarasov, A.P.Meshman, N.S.Gen // Report (NSS36-14) on IEEE Nuclear Science Symposium, San-Francisco, USA, October 21-27, 1995.

35. Scintillation assemblies based on NaI:Tl crystals with α -radiation reference sources / V.R.Lyubynskiy, N.N.Smirnov, E.V.Sysoeva, E.P.Sysoeva, V.A.Tarasov, L.S.Zubenko // 5th Int.Conf.on Inorg.Scint.and their Appl. (SCINT'99), 16-20 Aug.1999: abstracts. – Moscow, Russia, 1999. - P.179.

36. Тонкие пленки органических сцинтиляторов для контроля ионизирующих излучений в окружающей среде / В.М.Зубер, В.А.Тарасов, Ю.Т. Выдай, А.А.Ананенко, В.П. Гаврилюк // V Международное совещание «Проблемы прикладной спектроскопии и радиометрии» (ППСР-2001) : тезисы. - п.Менделеево, Россия, 2001. - С. 31.

37. Детектирующее устройство для совместной и отдельной регистрации β - и γ - излучений / Ю.Т.Выдай, Л.С.Гордиенко, Л.А.Андрющенко, В.А. Тарасов, А.А.Ананенко // VI Международное совещание «Проблемы прикладной спектроскопии и радиометрии» (ППСР-2002): тезисы. - п.Менделеево, Россия, 2002. - С. 28.

38. Кинетика сцинтилляций в плёнках CsI:Tl, как одного из сцинтиляторов в комбинированном детекторе / Выдай Ю.Т., Тарасов В.А., Ананенко А.А., Педаш В.Ю. // VII Международное совещание «Проблемы прикладной спектроскопии и радиометрии» (ППСР-2003): тезисы. - п.Менделеево, Россия, 2003. - С. 6.

39. Детекторы для спектроскопии радиоактивных изотопов с геометрией 4π / Выдай Ю.Т., Ананенко А.А., Тарасов В.А., Гаврилюк В.П. // IX Международное совещание «Проблемы прикладной спектроскопии и радиометрии» (ППСР-2005): тезисы. - п.Менделеево, Россия, 2005. - С. 4.

40. Features of scintillation characteristics of CsI:Na and NaI:Tl crystals as the basis for soft gamma radiation detectors / I. Kilimchuk, V. Gavriyuk, B. Grinyov, V. Tarasov, Yu. Viday // 4th International Symposium on Laser, Scintillator and Non Linear Optical Materials (ISL NOM-4), 26 – 30 June 2006 : abstracts. – Prague, Czech Republic, 2006. – P. 114.

41. Kilimchuk I. V. Comparison of the different models of the rough surface for the computer simulation of the light collection in the system “scintillator-light guide” / I. V. Kilimchuk, V. A. Tarasov, V. G. Baryakhtar // The International Conference “Functional materials” (ICFM’2007), 1 – 6 October 2007 : abstracts. – Partenit, Crimea, Ukraine, 2007. – P. 383.

42. Kilimchuk I. V. Study of surface roughness of CsI:Tl crystals treated by various abrasives / I. V. Kilimchuk, V. A. Tarasov, J. M. Alameda // IEEE Nuclear Science Symposium (2008 NSS-MIC Dresden), 19 – 25 October 2008 : abstracts. – Dresden, Germany, 2008. – P. 61.

43. Kilimchuk I. Study of light collection as a function of scintillation surface roughness / I. Kilimchuk, V. Tarasov // 7th International Conference on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation (LUMDETR 2009), 12 – 17 July 2009 : abstracts. – Krakow, Poland, 2009. – P. 196.

44. Simulation of the Pulse-Height Spectra of the Heterogeneous Scintillation Detectors / I. Kilimchuk, L. Andryushchenko, V. Tarasov, I. Vlasova, L. Voloshina // IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 23-29 October 2011: abstracts. - Valencia, Spain, 2011. - P. 163.

АНОТАЦІЯ

Тарасов В.О. Моделювання, розробка і характеристики спеціалізованих сцинтиляційних детекторів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2012 р.

В роботі розвинуто підходи для дослідження і прогнозування характеристик спеціалізованих сцинтиляційних детекторів (СД). Для оцінки внеску різних чинників у формування вихідного сигналу СД розвинутий підхід поетапного моделювання реєстрації іонізуючого випромінювання за допомогою СД. Для моделювання світлозбору в СД запропонований підхід до опису шорсткої поверхні за допомогою розподілів мікромайданчиків на ній, які знайдені з індикатрис розсіювання світла. Для характеристики сцинтиляційних матеріалів і СД запропоновано підхід для визначення абсолютного світлового виходу з використанням моделювання світлозбору.

За допомогою експериментального і комп'ютерного моделювання досліджені особливості втрат енергії і світлозбору для СД. Визначено вплив цих особливостей і умов застосування сцинтиляторів (матеріал, форма, розміри, геометрія, обробка, упаковка, компоновка оптичних елементів) на розділення і вибірковість СД.

Показано, що для СД з охоплюючою геометрією можна покращити розділення, забезпечивши транспорт світла з віддалених областей детектора і обмеживши його для областей, що прилягають до вихідного вікна.

Знайдено, що світлозбір в гетерогенних сцинтиляторах (ГС) може бути охарактеризований умовним параметром «число меж розсіяння», який, разом з відносним показником заломлення, визначає прозорість тонких шарів ГС. Одночасно зменшення числа меж розділу забезпечує більш повне поглинання енергії частинок у фазі сцинтилятора.

Вперше досліджена температурна залежність α/γ – відношення для сцинтиляторів різних типів (ЛГК, оксидних, $A^{IV}B^{VI}$). Оцінені їх можливості для стабілізації вимірювального тракту γ -спектрометрів за допомогою джерела α -частинок.

Отримано новий сцинтилятор $LiPO_2(Bi)$ для реєстрації нейтронів. Визначено його абсолютний світловий вихід (4000 фотонів/МеВ), спектр радіолюмінісценції ($\lambda_{max} = 630nm$), час висвітлювання (3мкс), концентраційна і температурна залежність світлового виходу для частинок з різною густиною іонізації.

Ключові слова: сцинтилятор, моделювання, метод Монте Карло, розділення, ефективність реєстрації, світлозбір, гетерогенний сцинтилятор, комбінований детектор, резонансний детектор.

АННОТАЦИЯ

Тарасов В.А. Моделирование, разработка и характеристики специализированных сцинтилляционных детекторов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2012 г.

В работе развиты подходы для исследования и прогнозирования характеристик специализированных сцинтилляционных детекторов (СД). Для оценки вклада различных факторов в формирование выходного сигнала СД развит подход поэтапного моделирования регистрации ионизирующего излучения с помощью СД. Для моделирования светособирания в СД предложен подход к описанию шероховатой поверхности. Для характеристики сцинтилляционных материалов и СД предложен подход к определению абсолютного светового выхода с использованием моделирования светособирания.

Для создания СД с необходимыми характеристиками исследованы особенности потерь энергии в материалах СД и прохождения света в оптической системе «сцинтиллятор - фотоприемник». Определено, как эти особенности и условия применения сцинтилляторов (материал, форма, размеры, геометрия, обработка, упаковка, компоновка оптических элементов) влияют на разрешающую способность и избирательность СД. Для исследования использовались методы экспериментального и компьютерного моделирования. Такие исследования проведены для СД, предназначенных для радиометрического

определения γ - излучающих радионуклидов, для СД короткопробежного излучения (α - , β - , рентгеновского), для комбинированных СД, обеспечивающих снижение влияния фонового излучения.

При моделировании светособирания предложено использовать описание распределений микроплощадок на модельной шероховатой поверхности с помощью экспериментальных данных, полученных при измерениях индикатрис рассеяния света поверхностями, обработанными абразивами с разным размером зерна.

Оценены возможности применения ряда новых сцинтилляционных материалов для создания СД, предназначенных для радиометрических определений. При исследовании оптических и сцинтилляционных характеристик стеклообразного $\text{LiPO}_2(\text{Bi})$ показано, что этот материал является перспективным сцинтиллятором для регистрации тепловых нейтронов. Определены его абсолютный световой выход (4000 фотонов/MeV), спектр радиолуминесценции ($\lambda_{\text{max}} = 630\text{nm}$), время высвечивания (3мкс), концентрационная и температурная зависимость светового выхода для частиц с разной плотностью ионизации.

Впервые исследованы температурные зависимости α/γ – отношения для сцинтилляторов разных типов (ЩГК, оксидных, $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{IV}}$). Оценены возможности использования исследованных сцинтилляторов для стабилизации измерительного тракта спектрометров и радиометров с помощью встроенного α -источника.

С помощью компьютерного и экспериментального моделирования показано, что СД на основе тяжелых оксидных материалов могут обеспечить уменьшение габаритов объемного источника (сосуд Маринелли) и веса пассивной защиты, по сравнению с СД на основе $\text{NaI}(\text{Tl})$, при сохранении высокой чувствительности. Для измерений с охватывающей геометрией детектора (кристаллы с колодцами) показано, что, при сложных условиях светособирания для этого случая, можно улучшить разрешение, обеспечив транспорт света из удаленных областей детектора (полировка участков поверхностей сцинтиллятора и применение зеркальных отражателей) и ограничив его для областей, прилегающих к выходному окну.

Показано, что значительную роль в формировании разрешения СД короткопробежного излучения играет радиальная зависимость коэффициента светособирания, связанная с потерями света на боковой поверхности сцинтиллятора. Предложены варианты уменьшения этой зависимости и улучшения спектрометрических характеристик детекторов. Исследованы особенности потерь энергии и прохождения света в гетерогенных сцинтилляторах (ГС) с большим числом границ раздела фаз. Показано, что, наряду с ростом потерь энергии в фазе сцинтиллятора, при увеличении плотности материала сцинтиллятора и увеличении его содержания в системе, наблюдается уменьшение разброса потерь энергии при уменьшении размера частиц сцинтиллятора. Этот эффект, в определенной степени, может компенсировать ухудшение разрешения при увеличении числа границ раздела, рассеивающих свет. При исследовании прохождения света в ГС показано, что

влияние размеров частиц и их концентрации может быть охарактеризовано условным параметром «число рассеивающих границ», который, наряду с относительным показателем преломления, определяет прозрачность тонких слоев ГС. Показано, что для частиц правильной формы прозрачность может возрастать за счет уменьшения количества отражений на границах раздела фаз. Предложено использовать иммерсионную жидкость-сцинтиллятор для получения гетерогенного сцинтиллятора с высокой прозрачностью.

Исследование особенностей прохождения излучения и света сцинтилляций в ГС позволило применить в КД, предназначенном для одновременной регистрации β – и γ – излучения, ГС с уменьшенным числом границ раздела фаз. Это обеспечило более полное поглощение энергии частиц в фазе сцинтиллятора и увеличило прозрачность ГС за счет уменьшения рассеяния света сцинтилляций на межзеренных границах.

Ключевые слова: сцинтиллятор, моделирование, метод Монте Карло, разрешение, эффективность регистрации, светособирание, гетерогенный сцинтиллятор, комбинированный детектор, резонансный детектор.

SUMMARY

Tarasov V.A. Simulation, development and characteristics of the specialized scintillation detectors. – Manuscript.

Thesis for doctor degree in physical and mathematical sciences on speciality 01.04.01 – physics of devices, elements and systems. – Kharkiv national university of radioelectronics, Kharkiv, 2012

The approaches for research and prediction of the specialized scintillation detectors (SD) characteristics were developed in work. The approach of step by step simulation of ionizing radiation detection by SD was developed for estimation of different factors deposit in forming of the SD output signal. The approach to description of rough surface was offered for light collection in SD simulation. The approach to determination of light yield with the use of light collection simulation was offered for characterization of scintillation materials and SD.

The features of energy losses and light collection in SD were investigated by the experimental and computer modeling. Influence of these features and scintillators application condition (material, form, sizes, geometry, treatment, package, arrangement of optical elements) on permission and SD electrol is found.

It is shown, that for SD with surrounding geometry it is possible to improve resolution by providing the transport of light from the remote regions of detector and limiting it for regions adjoining to the output window.

It is found, that light collection in heterogeneous scintillators (HS) can be described by a conditional parameter the «number of scattering boundaries», which, along with the relative index of refraction, determines transparency of the thin layers of HS. Reduction of boundaries number provides more complete absorption of particles energy in the scintillator's phase.

Temperature dependences of α/γ – relations are first investigated for different types of scintillators (AHC, oxide, $A^{II}B^{VI}$). Their possibilities for stabilization of measuring circuit of γ - spectrometers by α - source are estimated.

New scintillator $LiPO_2(Bi)$ for registration of neutrons is obtained. Its light yield (4000 photon/MeV), radioluminescence spectrum ($\lambda_{max} = 630nm$), decay time ($3\mu s$), dependence of light output on concentration and temperature for particles with the different specific energy losses are defined.

Keywords: scintillator, simulation, Monte Karlo method, resolution, detection efficiency, light collection, heterogeneous scintillator, combined detector, resonance detector.

Підп. до друку 31.05.12. Формат 60×84 1/16. Спосіб друку – ризографія.
Умов. друк. арк. 2,3. Облік. вид. арк. 2,2. Тираж 100 прим.
Зам. № 2-541. Ціна договірна.

ХНУРЕ. Україна. 61166, Харків, просп. Леніна, 14

Віддруковано в навчально-науковому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ
61166, Харків, просп. Леніна, 14