

УДК 504.064.38 + 504.064.36:574

О.М. Григор'єв, Л.Б. Беденко, О.В. Сакун, С.М. Коваленко

Харківський інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ"

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ЛОКАЦІЇ ДЖЕРЕЛ ПРОНИКАЮЧИХ ЯДЕРНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

Проведено аналіз сучасного стану науково-технічних розробок та методів визначення напрямку на джерело гамма-випромінювання; запропоновано пристрій, спроможний визначати напрямок на джерело проникаючого випромінювання, оцінювати відстань до джерела імпульсного проникаючого випромінювання та визначати його потужність.

гамма-квант, джерело випромінювання, радіоізотопи, комптон-ефект, поглинач проникаючого випромінювання

Вступ

Постановка проблеми. Техногенні аварії і пов'язане з ними поширення радіонуклідного забруднення навколишнього природного середовища вимагають оперативної оцінки рівня забрудненості.

До того ж наявність ядерного озброєння та загроза його використання вимагає пошуку ефективних засобів контролю джерел проникаючого випромінювання (гамма-випромінювання та нейтронне), яке є основним чинником ураження під час застосування зарядів малої потужності.

Аналіз техногенних аварій на ядерних об'єктах показує, що поширення радіонуклідного забруднення навколишнього середовища також вимагає оперативної оцінки як рівня забрудненості, так і розташування джерел гамма-випромінювання на місцевості.

В разі застосування зарядів великої потужності, де основним чинником ураження є ударна хвиля, імпульс проникаючого випромінювання може бути сигналом для прийняття термінових заходів щодо протидії ударної хвилі, яка запізнюється на 2 – 10 с після гамма-імпульсу.

Для визначення напрямку, потужності ядерного вибуху та відстані до епіцентру необхідна розробка нових вимірювальних приладів, які спроможні забезпечити вимірювання вищезазначених параметрів за достатньо коротким терміном. Визначення напрямку на епіцентр ядерного вибуху представляє особливу актуальність для бронетехніки, де оптичні методи не забезпечують колового огляду, і основним методом є знаходження напрямку на імпульс гамма- та нейтронного випромінювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій При проходженні через речовину гамма-кванти взаємодіють з атомами, атомними ядрами й атомними електронами. Відомо кілька механізмів взаємодії гамма-випромінювання з речовиною: когерентне розсіювання, фотоэффект, комптонівське розсіювання (компон-ефект), народження електронно-позитронних пар і ядерний фотоэффект. Основний внесок у розсіювання і поглинання гамма-квантів у діапазоні енергій 0,1 – 3 МеВ дають фотоэффект і комптон-ефект. Основними закономірностями фотоэффекта є:

- імовірність фотоэффекту зростає з ростом енергії зв'язку електрона в ядрі;
- перетин фотоэффекта залежить від заряду ядер речовини середовища ($\sigma_{\text{фот}}K \sim Z^5$ за всіма енергіями гамма-квантів.

Комптон-ефектом (компонівським розсіюванням) називається розсіювання гамма-кванта на вільному електроні. Це відбувається, коли енергія зв'язку електрона в атомі багато менше енергії падаючого гамма-кванта. Основними закономірностями комптонівського розсіювання є:

- комптон-ефект відбувається як на електроні, що спочиває, так і на електроні, що рухається;
- перетин комптон-ефекту при малих енергіях приблизно постійний, а при великих енергіях – зворотно пропорційний енергії гамма-кванта, що падає;
- перетин комптон-ефекту пропорційний зарядові атомів середовища.

Знання енергетично-кутової щільності потоку гамма-квантів, що залежить від комптон-ефекту, у деякій області простору дозволяє в принципі повно описати вплив гамма-випромінювання на будь-який об'єкт, поміщений у цю область, якщо відомі константи взаємодії випромінювання з атомами об'єкта. Для визначення тілесного кута, у якому випускаються гамма-джерелом м'які гамма-кванти (1 – 80 кеВ), використовуються пропорційні лічильники, скinti-

лятори з ZnS, тонкі кристали з CsI, а також напівпровідникові детектори.

Вимір енергії гамма-кванта необхідний для створення ефективного захисту від гамма-випромінювання. Також потрібні дослідження енергетично-кутових розподілів випромінювання, створеного ядерними пристроями і радіоактивними джерелами. Одержувані за допомогою спектрометрії гамма-випромінювання дані дозволяють розробити оптимальні варіанти захисту для забезпечення радіаційної безпеки.

У випадку, якщо гамма-випромінювання моноенергетично, можна вимірювати нахил функції пропускання поглиначем. Слід зазначити, що функція у матеріалах із середніми і великими атомними номерами має мінімум і різні енергії гамма-квантів можуть мати однакові значення коефіцієнта поглинання (рис. 1) [1].

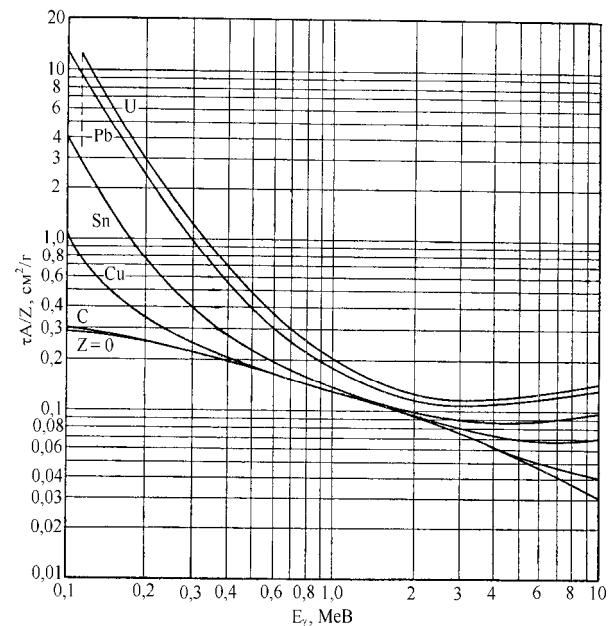


Рис. 1. Поглинання гамма-випромінювання в різних речовинах

У реальному випадку є кінцева імовірність того, що гамма-квант взаємодіє в поглиначі багаторазово і попадає після двох або більше взаємодій на детектор. Шляхи таких гамма-квантів показані на рис. 2 [2].

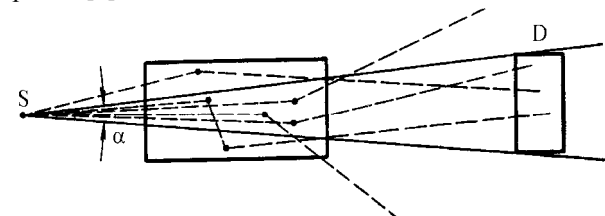


Рис. 2. До визначення енергії гамма-квантів за функціями пропускання

Внесок таких процесів залежить, головним чином, від геометрії коліматора, діаметра поглиначя, розмірів та чутливості детектора.

Прикладом практичного використання комптон-ефекту та ефекту поглинання гамма-квантів для визначення напрямку на джерело випромінювання може служити використання циліндричного поглинача і декількох груп лічильників, розташованих довкола нього [3]. При даному способі спочатку визначається положення джерела випромінювання з точністю $\pm 45^\circ$ у порівнянні сумарних сигналів із груп детекторів, розташованих навколо екрана у вигляді циліндра, що послабляє випромінювання, по його утворюючої. Для визначення більш точного напрямку суміщається лінія візування пристрою з напрямком найближчої вісі і проводиться повторне порівняння сумарних сигналів із груп детекторів. По його величині та знакові здійснюється точне суміщення лінії візування з напрямком на джерело.

Також описаний спосіб селективного пошуку ділянок з підвищеним рівнем радіації і пристрій для його здійснення [4], який полягає в тому, що прийом випромінювання здійснюється з регульованим тілесним кутом діаграми прийому, який має максимальну чутливість у центрі діаграми. Методом порівняння інтегральної величини прийнятого сигналу з пошуковим порогом встановлюється необхідність подальших кроків. У випадку перевищення цієї величини першого порога селекції, транспортний засіб необхідно зупинити, детектор перемістити в напрямку траси пошуку на відстань, рівну половині розміру прийому детектора. Далі детектором скануються спочатку азимутальні, а потім радіальні напрямки. За максимальною величиною прийнятого сигналу визначається місцезнаходження ділянки з підвищеним рівнем випромінювання і його відповідність другому порогові селекції.

У способі визначення місця розташування точкових джерел випромінювання [5] використовується пара щільна маска – детектор, що складається з чутливих елементів, причому щілини в масці розташовані за законом псевдовипадкових подвійних послідовностей з «0» і «1». З чутливих елементів детектора знімаються сигнали – електричні аналоги, які перетворюються в цифрову форму і представляються у вигляді масиву чисел. Напрямок на точкове джерело визначається по відомому співвідношенню, яке включає, крім зазначених масивів, масив, що відновлює подвійні числа з «1». Реєстрація ведеться за допомогою системи з трьох лінійок детекторів, розташованих в одній площині під кутом друг до друга.

Метою статті є розробка приладу та засобу для визначення напрямку на джерело проникаючого випромінювання, відстані до імпульсних джерел гамма- та нейтронного випромінювань та потужності експозиційної дози гамма-випромінювання.

Ожовна чайтина

Визначення напрямку на джерело гамма-випромінювання експериментально здійснювалося при використанні трьох детекторів і поглиначів. Перший

детектор (D_1) поміщався в екран з коефіцієнтом ослаблення, що не залежав від кута в інтервалі 2π радіан (рис. 3); другий детектор (D_2) поміщався в екран з коефіцієнтом ослаблення, що залежав від кута, таким чином, що коефіцієнт ослаблення змінювався від мінімального значення до максимального в діапазоні кутів від 0 до 2π радіан (рис. 4, а).

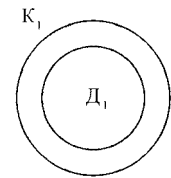


Рис. 3. Детектор з кільцевим поглиначем

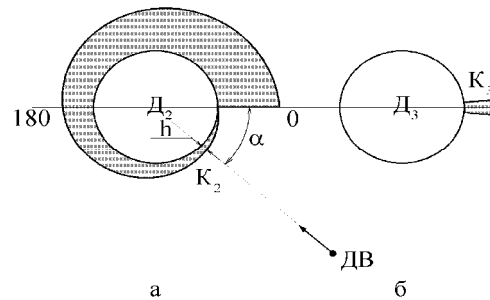


Рис. 4. Детектори: а) з поглиначем, у якого коефіцієнт ослаблення залежить від кута, б) із сегментним поглиначем, що перекриває кут поблизу 0°

Інтенсивність проникаючого випромінювання, що вимірюється першим детектором, дорівнює $j_1 = K_1 j_0$; другим детектором – $j_2 = K_2 j_0$, де K_1 , K_2 – коефіцієнти ослаблення першого і другого екранів відповідно, j_0 – інтенсивність проникаючого випромінювання в разі відсутності екрана.

З відношення значень інтенсивностей проникаючого випромінювання, обмірюваних першим і другим детекторами, визначається коефіцієнт пропорційності між коефіцієнтами ослаблення екранів з не залежним і залежним від кута коефіцієнтом осла-

$$K_{\Pi} = \frac{j_2}{j_1} = \frac{K_2}{K_1}.$$

Таким чином, за відомими коефіцієнтом пропорційності K_{Π} і коефіцієнтом ослаблення першого екрана K_1 , знаходимо коефіцієнт ослаблення другого екрана K_2 , що залежить від напрямку на джерело проникаючого випромінювання, тобто кут між обраним напрямком і напрямком на джерело проникаючого випромінювання α , де $\alpha = f(K_2)$.

Коефіцієнт ослаблення K_2 заданий товщиною поглинача (рис. 4, а), що залежить від кута: $h = b \cdot (\alpha/360^\circ)$, де b – задана геометрична константа, при якій максимальна товщина поглинача дорівнює 2,5 см; α – кут у діапазоні від 0 до 360° . Товщина поглинача змінюється від 0 до b , а коефіцієнт ослаблення змінюється пропорційно товщині.

Для макетування було розроблено і виготовлено форму, яка заповнювалася поглиначем – свинцевими кульками або сипучими матеріалами (гіпс, цемент) (рис. 5).

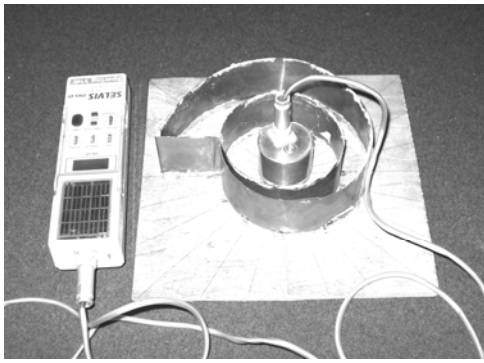


Рис. 5. Макет блоку детектування і локації джерел гамма-випромінювання

В геометричному центрі поглиначів розміщувалися детектори із телуриду кадмію розміром $4 \times 4 \times 2$ мм (рис. 6).

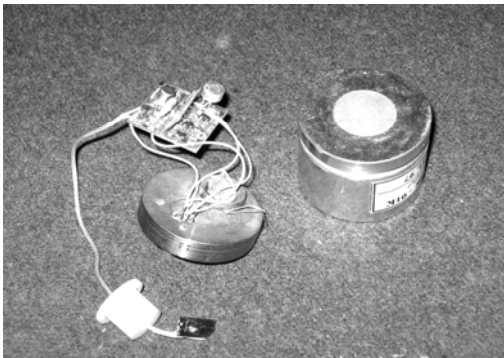


Рис. 6. Виносний блок детектування з детектором гамма-випромінювання на базі телурид кадмієвого детектора

Блок детектування і пристрій для вимірювання кількості гамма-квантів використовувалися із комплекту портативного радіометра гамма-бета-випромінювань ДКС-01 „Селвис” [6]. Він призначений для:

- виміру потужності еквівалентної дози гамма- і рентгенівського випромінювань;
- виміру еквівалентної дози гамма- і рентгенівського випромінювань;
- виміру часу експозиції;
- виміру щільності потоку бета-частинок.

Прилад складається з блоку обробки інформації і виносного блоку бета-детектора.

Основні характеристики:

діапазон виміру потужності еквівалентної дози гамма- і рентгенівського випромінювань і основна похибка вимірів (Cs^{137})..... (0,1 – 10 000) мкЗв/год., ± 15 %;

діапазон виміру еквівалентної дози гамма- і рентгенівського випромінювань і основна похибка (Cs^{137}) (1,0 – 10 000) мкЗв, ± 20 %:

діапазон виміру щільності потоку бета-частинок і основна похибка ($Sr^{90} + Y^{90}$)..... (10 – 100 000) $хв^{-1}см^2$, ± 15 %;

енергетичний діапазон виміру бета-випромінювань і енергетична залежність (0,2 – 1,5) МеВ, ± 25 %;

час установлення робочого режиму 10 с;
 час безупинної роботи без підзарядки від геліобатарей 100 год;
 нестабільність за час безупинної роботи..... ± 10 %.

Виносний блок детектування для виміру бета-частинок був перероблений для виміру кількості гамма-квантів. Джерелом гамма-випромінювання були точкові джерела америцію-241, цезію-137, кобальту-60. Вимірювальний прилад дозволяв вимірювати кількість імпульсів (зарєєстрованих гамма-квантів) до 10^5 частинок. Експерименти проводилися за фіксованим поверненням поглиначів (рис. 6) від 0 до 360° з кроком 10° . Експериментально була зафіксована зміна коефіцієнта послаблення від максимального до мінімального в діапазоні кутів $3 - 4^\circ$ поблизу переходу $(360 - 0)^\circ$ за рахунок розсіювання гамма-випромінювання на екрані (рис. 7).

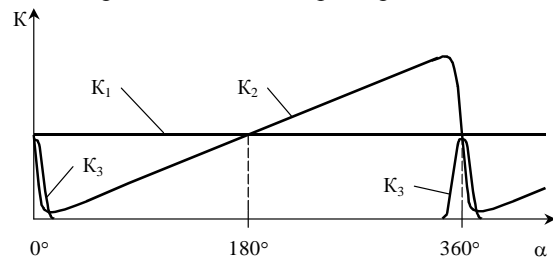


Рис. 7. Зміна коефіцієнта поглинання поглиначів другого детектора в залежності від кута

Для виключення неоднозначності результатів вимірів ми використовували третій незалежний детектор (D_3), у якого поглинач перекриває діапазон кутів $(360 - 0)^\circ$ другого поглиначів (рис. 4, б) в діапазоні $\pm 5^\circ$. Однозначно розташування джерела гамма-випромінювання в діапазоні кутів $(360 - 0)^\circ$ визначається відношенням сигналів, що пройшли на детектор D_1 (через кільцевий поглинач) і детектор D_3 (через поглинач) $j_3/j_1 = K_3/K_1$, де K_1 , K_3 – задані величини.

Максимальна похибка вимірів кута напрямку на джерело залежить від третього поглиначів, а саме діапазону кутів, що він перекриває і не перевищує $0,3$ від кутової ширини третього поглиначів (рис. 4, б).

Аналіз вимірів показав, що під час використання поглиначів зі свинцю з максимальною товщиною $2,5$ см і мінімальною $0,1$ см є можливість одержати точність виміру кута за напрямком на джерело випромінювання $3,5 - 4^\circ$. Однак при цьому чутливість пристрою помітно погіршується в разі використання джерела америцій-241 (59 кеВ) за рахунок сильного поглинання свинцем і відповідно малого рівня сигналу. Використання більш легких поглиначів (графіт, гіпс) відповідно збільшує чутливість пристрою. При цьому погіршуються точнісні характеристики під час виміру кутів у $3 - 4$ рази.

Недоліком даного пристрою є формування помилкового сигналу за напрямком у випадку рівномірного зараження радіонуклідами навколишнього простору. Для роботи в змішаних полях випроміню-

вань можна запропонувати в пристрій увести ще один блок детектування з таким же поглиначем, як на рис. 4, а з віссю симетрії, поверненою на 180° у площині. При цьому за наявності двох помилкових напрямків, повернених один відносно іншого, впливає, що поле опромінення рівномірно, а зсув цих напрямків на величину, відмінну від 180° означає, що поле змішане, тобто на фоні рівномірного опромінення присутнє виділене джерело гамма-випромінювання.

Також були досліджені детектори, розміром $1 \times 1 \times 0,2$ см, $2 \times 2 \times 0,3$ см з метою визначення впливу анізотропії геометричних параметрів детектора на точнісні характеристики у вимірах кутів. Як показали експерименти, незначна анізотропія за напрямками (10 – 15 %) спостерігається у детекторів з розміром $4 \times 4 \times 2$ мм для гамма-випромінювання з енергією 59 кеВ.

Залежність властивостей детектора від кута можна компенсувати однаковим розташуванням усіх детекторів відносно один одного або коаксіальною геометрією детекторів.

Виміри проводилися зі статистичною точністю 1 %, тобто за один вимір детектором фіксувалося 10 000 гамма-квантів на усіх детекторах.

В разі застосування графітового поглиначя як тканево-еквівалентного матеріалу D_1 (рис. 3) за співвідношенням сигналів D_1 до D_3 можливо визначення та виключення похибок вимірювання потужності дози гамма-випромінювання (яка може досягати декількох сотень відсотків) за рахунок енергетичної залежності чутливості приладу [7]. Також графітовий поглинач як ефективний сповільнювач може використовуватися для пошуку джерел швидких нейтронів, оскільки механізми сповільнення швидких нейтронів та гамма-квантів подібні.

Відомо, що під час ядерного вибуху запізнення нейтронів відносно імпульсу гамма-квантів у середньому досягає 0,28 мс на відстані 1 км. Тому похибка в разі швидкодії часового спектрометра 1 мкс може не перевищувати декількох метрів. Під час термоядерного вибуху, де первинна швидкість нейтронів перевищує швидкість нейтронів ядерного вибуху у декілька разів, часовий інтервал запізнення нейтронів буде значно меншим. Тому слід ідентифікувати тип ядерного вибуху, що можливо за рахунок того, що кількість нейтронів під час термоядерного вибуху у 10 разів більше, ніж під час ядерного вибуху. Вимірювання відношення інтенсивності γ -квантів до кількості нейтронів дає змогу ідентифікувати тип ядерного пристрою. Вимірювання нейтронного імпульсу можна забезпечити тим же детектором γ -квантів у кільцевому поглиначі, якщо цей поглинач зробити з урану-238, або вводити у пристрій канал вимірювання швидких нейтронів.

Вияновки

Розроблений пристрій може бути застосований:

1) для реєстрування напрямку на джерело гамма-випромінювання в діапазоні кутів 2π радіан,

включаючи імпульсні джерела, з похибкою $3 - 6^\circ$; при цьому точність виміру кута напрямку на джерело гамма-випромінювання може досягати 1 %;

2) для визначення відстані до джерела за рахунок зменшення енергії (комптон-ефект) у шарі повітря за допомогою вимірювання середньозваженого спектра енергій гамма-джерела;

3) для розширення функціональних можливостей ПРХР (ГО-27) в разі заміни його на запропонований пристрій під час застосування його на бронетехніці для захисту від ударної хвилі ядерного вибуху за рахунок маневрування та позиціонування броньованого об'єкту до приходу ударної хвилі.

Використання (при удосконаленні), як для засікання ядерних вибухів, так і для розвідки забрудненої радіонуклідами місцевості та пошуку оптимальних шляхів руху військової техніки.

Для вимірювання потужності, напрямку, відстані до центру ядерного вибуху; визначення типу боєприпаси (термоядерний або ядерний).

Припускається оптимальним вимірювати відстань до центру ядерного вибуху за рахунок запізнення нейтронів відносно гамма-квантів. При цьому швидкі нейтрони пропонується реєструвати детектором гамма-квантів з конвертором зі збідненого урану. Тип ядерного заряду (ядерний або термоядерний) може бути визначений за відношенням інтенсивності гамма-квантів до інтенсивності швидких нейтронів.

Список літератури

1. *Экспериментальная ядерная физика / Под ред. Э. Сегре; Пер. с англ. Т. 3. – М.: ИЛ., 1961. – 684 с.*
2. *Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики: Учеб. пособ. для вузов. – М.: Атомиздат, 1970. – 560 с.*
3. *Пат. 2012016 РФ, С1 5 G 01 T 1/16. Устройство для поиска фотонных источников / Л.В. Володина, В.П. Демченко, Р.С. Ключко, М.С. Ольхов, Е.А. Шелепов. – № 4949437/25; Заявл. 17.06.91; Опубл. 30.04.94; Бюл. № 8.*
4. *А.с. 1398628 СССР, А1 5 G 01 T 1/167. Способ селективного поиска участков с повышенным уровнем радиации и устройство для его осуществления / В.И. Горбачев, И.И. Разанов и др. – № 4143243/25; Заявл. 08.08.86; Опубл. 30.03.93; Бюл. № 12.*
5. *А.с. 1817569 СССР, А1 5 G 01 T 1/17. Способы определения местоположения точечных источников излучения / В.К. Архипов Н.В. Меренкова и др. (СССР). – № 4862197/25; Заявл. 27.08.90; Опубл. 30.05.94; Бюл. № 10.*
6. *Приборы, программное обеспечение, информация и сервис для экологических лабораторий. Каталог № 2 (5). – К.: НПП „Атом Комплекс Прилад”, 1996.*
7. *Садовников Р.Н., Манец А.И. Анализ возможности учета погрешности измерения мощности дозы γ -излучения за счет энергетической зависимости чувствительности прибора на основе знания средней энергии излучения // Экологические системы и приборы. – 2005. – № 3. – С. 37-40.*

Надійшла до редколегії 20.10.2006

Рецензент: доктор технічних наук В.К. Комар, Інститут монокристалів НАН України, Харків.