

ОПТИМІЗАЦІЯ РАДІАЦІЙНОГО ВПЛИВУ НА ОТОЧУЮЧЕ СЕРЕДОВИЩЕ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПОЗИТРОН-ЕМІСІЙНОЇ ТОМОГРАФІЇ

Д. Нечай, О. Безшийко, Л. Голінка-Безшийко, А. Громлюк,
І. Каденко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул.Володимирська, 64, Київ, 01601
e-mail: libera_D_@mail.ru

Проведено аналіз та оптимізацію системи детектування радіоактивного забруднення повітря при виробництві та використанні радіофармпрепаратів у повному циклі позитрон-емісійної томографії (ПЕТ). Виконано моделювання систем детектування вмісту позитрон-емітуючих ізотопів у вентиляційних каналах типового центру ПЕТ методом Монте-Карло з використанням програмних пакетів GEANT4 та FLUKA. Визначено мінімально детектуючі активності для детектуючих систем та межі застосування запропонованих моделей.

Вступ

Позитрон-емісійна томографія (ПЕТ) - новітній метод медичної радіоізотопної діагностики, заснований на застосуванні радіофармпрепаратів, мічених ізотопами - позитронними випромінювачами. З перших кроків розвитку ПЕТ знайшла застосування у кардіології, сьогодні ж ПЕТ широко використовують для діагностики широкого спектру онкологічних захворювань. Принцип функціональної візуалізації пухлин вигідно відрізняє ПЕТ від інших анатомо-топографічних методів діагностики (ультразвукової томографії, рентгенівської комп'ютерної та магнітно-резонансної томографії), що дозволяє оцінити динаміку пухлинних субстратів за зміною їх розмірів та структури. Специфічність ПЕТ обумовлюється можливістю візуалізації пухлинної тканини та оцінки її біологічної активності за ступенем інтенсивності накопичення в тканинах метаболічного радіофармпрепарату (РФП). Таким чином, ПЕТ забезпечує можливість

отримання унікальної інформації, зокрема: для достовірної диференціальної діагностики злоякісних пухлин, доброякісних пухлин, для надійного визначення регіональної та віддаленої розповсюженості пухлинного процесу по всьому організму та в процесі єдиного дослідження, об'єктивну оцінку ефективності лікування, а також раннє виявлення рецидивів.

На сьогоднішній день для ПЕТ в основному застосовують РФП на основі позитрон-випромінюючих ізотопів елементів другого періоду періодичної системи: ^{11}C ($T_{1/2}=20,4$ хв.), ^{13}N ($T_{1/2}=9,97$ хв.), ^{15}O ($T_{1/2}=2,04$ хв.) та ^{18}F ($T_{1/2}=109,8$ хв.) [1]. Усі вони включаються до складу РФП при проведенні хімічного синтезу, в ході якого можливі витoki радіоактивної речовини та потрапляння її в т.ч. у повітря вентиляційної системи [2], що може призвести до забруднення навколишнього середовища. «Гарячі» камери, повітря навколо камери мішені медичного циклотрона, тракти транспортування напрацьованого в циклотроні радіоізоотопу до хімічної лабо-

раторії, тощо є потенціальною місцями підвищеного ризику виникнення радіоактивного забруднення. Для усунення наслідків від таких ефектів, як правило, на виході вентиляційних систем встановлюють фільтри різних типів, хімічні поглиначі, пастки з азотним охолодженням. На жаль, рівень ефективності таких способів очищення є недостатнім для гарантованого забезпечення не перевищення мінімально припустимих концентрацій радіоактивних ізотопів у викидах [3]. У разі виникнення критичної ситуації можливі різні підходи до попередження забруднення навколишнього середовища, серед яких найчастіше використовують два основних. За технічної можливості застосовують відкачку повітря з системи вентиляції в окремі ємності, де воно зберігається під тиском до повного розпаду радіоактивної речовини [2]. Така методика є ефективною при інтенсивних, але короточасних викидах. Альтернативним засобом є зупинка роботи витяжної системи та відповідної ланки технологічного ланцюга виготовлення РФП, що спричинила виток, на час, за який відбудеться розпад забруднюючого ізотопу. Величина проміжку часу має бути достатньою для забезпечення мінімально припустимої концентрації цього ізотопу у відповідному середовищі. Але в будь-якому разі необхідно застосовувати чутливу систему детектування рівня забруднення повітря.

Метою даної роботи, було аналіз та порівняння різних варіантів геометрії та типів детектуючих систем з використанням моделювання методом Монте-Карло для визначення найбільш оптимальної архітектури системи детектування рівня забрудненості повітря.

Методика експерименту

Детектування позитрон-емітуючих ізотопів можна проводити шляхом безпосередньої реєстрації позитронів β^+ -розпаду з максимальними енергіями β -спектра ($E(^{18}\text{F})=633,5$ кеВ, $E(^{15}\text{O})=1732$ кеВ, $E(^{13}\text{N})=1198$ кеВ, $E(^{11}\text{C})=960,2$

кеВ) [1]. У даному випадку раціонально використовувати або газові детектори з тонким вхідним вікном (в найпростішому випадку лічильники Гейгера-Мюллера), або сцинтиляційні детектори з тонким сцинтилятором, наприклад, CsI(Tl), або пластик. При цьому можна очікувати, що ефективність реєстрації позитронів буде достатньо високою при низькій ефективності реєстрації фонових гамма-квантів.

Враховуючи те, що при анігіляції позитрона з електроном навколишнього середовища утворюються два гамма-кванти з енергіями по 511 кеВ з розльотом під кутом 180° , існує можливість визначати акти β^+ -розпаду за рахунок вимірювання енергії анігіляційних гамма-квантів у детекторі. В цьому випадку найбільш оптимальним вибором можуть бути системи сцинтиляційних детекторів з неорганічними сцинтиляторами великого об'єму. Також для зменшення гамма-фону в таких детекторах можливе використання двох детекторів, що працюють у режимі часових збігів (для одночасної реєстрації двох анігіляційних гамма-квантів).

Згідно з вище зазначеними підходами, необхідним є проведення попередньої оцінки рівнів детектування та оптимізації геометрії таких систем.

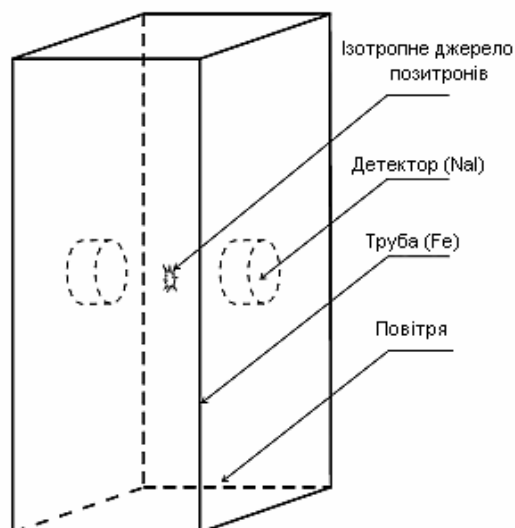


Рис.1. Вентиляційний короб зі сцинтиляційними детекторами всередині

В даній роботі ми провели розрахунки методом Монте-Карло з використанням

пакетів FLUKA [4] та Geant4 [5] рівнів детектування для сцинтиляційного детектора БДЭГ2-39 (6931-20) з кристалом NaI(Tl) діаметром 15 см і товщиною 10 см та радіометра $\beta(\gamma)$ SURVEY METER (TGS-133) на основі газорозрядного лічильника Гейзера - Мюллера. Також проведено оцінку можливості використання схеми збігів з двома сцинтиляційними детекторами і порівняння ефективності такої схеми з ододетекторним варіантом.

При моделюванні систем зі сцинтиляційними детекторами нами використано геометрію, в якій детектори знаходяться всередині вентиляційного короба розміром 200×40×40 см, заповненого повітрям (рис.1). Товщина стінок короба 1 мм. Сцинтиляційні кристали закриті алюмінієвим корпусом товщиною 2,5 мм. Для валідації моделі проводилося порівняння експериментально отриманого спектра джерела позитрон-емітуючого ізотопу ^{22}Na з модельними спектрами. Розмір випромінюючої зони джерела обмежений колом діаметром менше 3 мм. Джерело знаходилось на відстані 10 см від поверхні детектора.

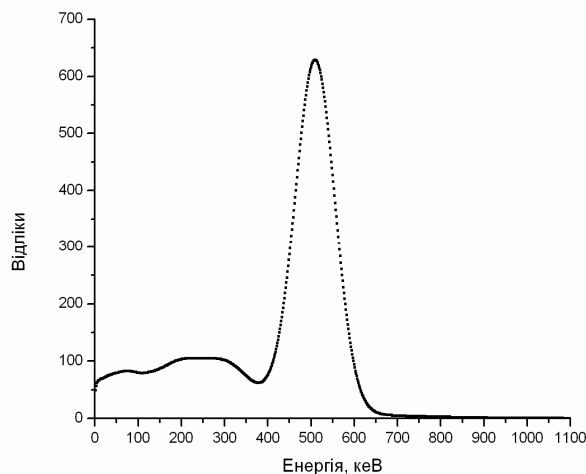


Рис.2. Модельний спектр позитронів

На рис.2 та рис.3 наведено результати порівняння. Модельний спектр та експериментальні дані добре узгоджуються як за абсолютними значеннями, так і за формою апаратного спектра.

При розрахунках рівнів детектування застосовували джерело позитронів, рівномірно розподілене по всьому внутрішньому об'єму короба (за винятком детекторів).

Межа детектування визначалася за формулою [6]:

$$A = \frac{3 \times \sqrt{n_{\phi}}}{\varepsilon \times V \times \sqrt{t}}, \quad (1)$$

де n_{ϕ} – швидкість лічби фону, імп/сек; ε – ефективність реєстрації детектора з врахуванням тілесного кута для розподіленого по об'єму короба джерела позитронів; V – об'єм, в якому розподілено джерело; t – час вимірювання.

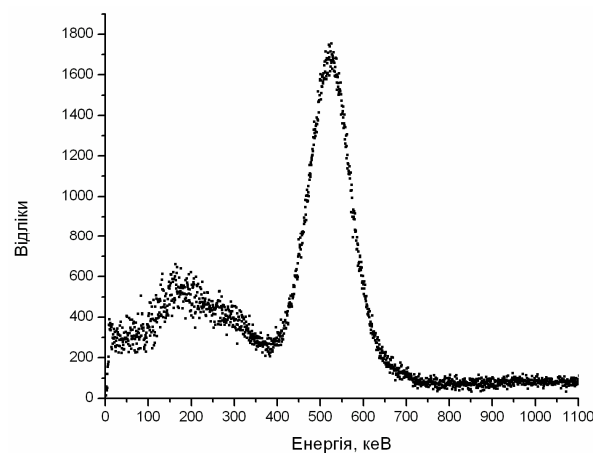


Рис.3. Експериментальний спектр позитронів

Фон сцинтиляційного детектора, необхідний для визначення мінімально можливих концентрацій позитрон-емітуючих ізотопів, було отримано в геометрії без додаткового свинцевого захисту детектора (для консервативної оцінки). Спектр фону наведено на рис.4. Швидкість набору спектру фону в енергетичному вікні в околі 511 кеВ складала 45 імп/сек та 1155 імп/сек - в усьому діапазоні вимірювання спектру.

Для лічильника Гейгера-Мюллера використовувалась аналогічна геометрія частини вентиляційної системи: товщина вхідного вікна 2,5 мг/см², ефективний діаметр детектора 5 см, довжина 5 см, робочий об'єм заповнено аргоном. Фон, що також вимірювався без додаткового свинцевого захисту, складав 100 імп/хв. Ре-

зультати модельних розрахунків та визначення чутливості детектуючих систем наведено в таблиці 1. де повна ефективність визначається як відношення числа всіх зареєстрованих частинок до загальної кількості частинок, що випромінюються джерелом, а ефективність по піку повного поглинання – як відношення числа зареєстрованих частинок у піці повного поглинання до кількості частинок, що випромінюються джерелом. МДА визначені для часу вимірювання 1 сек. Для інших часових проміжків згідно формули (1)

$$A \propto \frac{1}{\sqrt{t}}$$

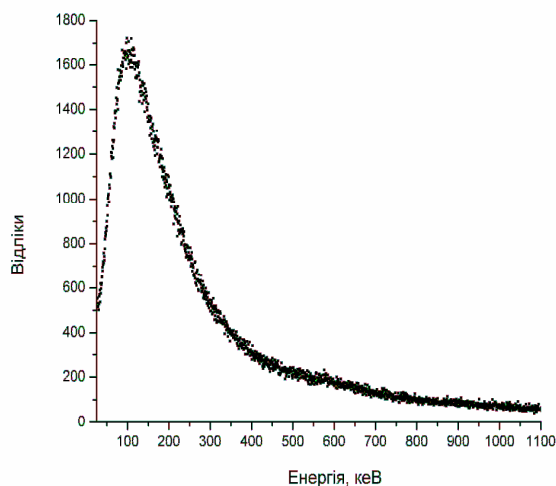


Рис.4. Спектр фону

Таблиця 1

	Детектор	Програмний пакет	Повна ефективність	Ефективність по піку	Рівень детектування по піку, Бк/м3	Рівень детектування по всьому спектру, Бк/м3
1	NaI 15×10см	FLUKA	0,029	0,017	3700	11000
		Geant4	0,034	0,017	3700	9400
2	NaI 15×10см схема збігів	FLUKA	0,00075	0,00031		
		Geant4	0,00082	0,00025		
3	лічильник Гейгера- Мюллера	FLUKA	0,0014			8700
		Geant4	0,0013			9300

Обговорення результатів

Із отриманих результатів можна зробити ряд висновків. Використання схеми реєстрації позитрон-емітуючих ізотопів за рахунок детектування анігіляційних гамма-квантів одноканальною системою на базі кристала NaI(Tl) без застосування аналізу спектрів (робота в режимі лічильника без додаткового захисту) є мало ефективним, оскільки межа детектування в такому випадку принципово не відрізняється від величини межі детектування для схеми прямої реєстрації лічильника Гейгера-Мюллера. Враховуючи геомет-

ричні та вартісні характеристики детекторів, газорозрядний лічильник Гейгера-Мюллера є більш оптимальним для використання в системі контролю забруднення витяжного повітря. З іншої сторони, застосування інформації про енергетичний спектр сцинтиляційного детектора дозволяє покращити межу детектування майже в три рази. Реєстрація сигналів тільки в районі піку повного поглинання гамма-квантів з енергією 511 кеВ суттєво покращує відношення сигнал-фон, оскільки фон в цій області різко падає (рис. 4). Зрозуміло, що в цьому випадку роздільна здатність детектуючої системи суттєво

впливає на значення межі детектування. Для проведення оцінки ми використовували діапазон енергій ± 40 кеВ від піку 511 кеВ.

При використанні схеми з двома детекторами в режимі часових збігів розрахована ефективність реєстрації зменшилась в 42,5 рази, що вимагає значного зменшення фону для забезпечення МДА межі детектування, не гіршої ніж для одноструктурної системи.

Для подальшого зниження МДА бажано використання додаткового захисту. Також можливим шляхом збільшення концентрації радіоактивних забруднювачів є стиснення проби витяжного повітря і наближення її до детектора. З результатів розрахунків випливає, що товщина сцинтилятора NaI(Tl) у 10 см неоптимальна

(достатньо товщини ~ 3 см), оскільки гама-кванти з енергією 511 кеВ ефективно поглинаються в суттєво менших товщинах, а фоновий внесок при реєстрації випромінювання усім об'ємом детектору погіршує відношення сигнал-фон.

Для досягнення МДА межі детектування, нижчої за допустиму концентрацію забруднюючих ізотопів для категорії В (для $^{11}\text{C} - 10^3 \text{Бк/м}^3$), достатньо часу вимірювання від декількох секунд (для сцинтиляційного детектора NaI(Tl) діаметром 15 см і товщиною 10 см з реєстрацією гама-піка 511 кеВ) до 25-40 сек (для радіометра $\beta(\gamma)$ SURVEY METER (TGS-133) на основі газорозрядного лічильника Гейгера-Мюллера) [3].

Література

1. <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf>.
2. R.Calandrino, del A.Vecchio, S.Todde, F.Fazio, Health Physics. Operational Radiatio Safety. 92(5) Supplement 2:S70-S77, May 2007.
3. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97).
4. <http://www.fluka.org>.
5. <http://geant4.web.cern.ch/geant4/G4Users/Documents/UsersGuides>

RADIATION INFLUENCE OPTIMIZATION IN THE ENVIRONMENT DUE TO POSITRON-EMISSION TOMOGRAPHY USING

D. Nechai, O. Bezshyyko, L. Golinka-Bezshyyko, A. Gromliuk, I. Kadenko

Taras Shevchenko National University, Volodymyrska St. 64, Kyiv, 01601
e-mail: libera_D_@mail.ru

An analysis and optimization of radioactive contaminated air levels detection system due to the production and using of the radiopharmaceuticals at a full cycle of positron-emission tomography were performed. A modeling of detection system with positron-emission isotopes inside the ventilation chambers by Monte-Carlo method with using of the program packages GEANT4 та FLUKA was conducted. The detection levels and efficiency for using of the suggested models have been studied.

