

Оцінка еквівалентної дози на руки маніпуляційного персоналу відділення ПЕТ/КТ: порівняльний аналіз даних, отриманих з кільцевих ТЛД-дозиметрів та розрахункових значень, отриманих за допомогою програмного коду VARSKIN+

- **Кудряшова Євгенія Віталіївна**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3495-1192>
- **Бондар Борис Михайлович**, канд. фіз.-мат. наук (д-р філософії)
Клінічна лікарня «Феофанія» Державного управління справами, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9366-6711>
- **Кметюк Ярослав Володимирович**, канд. мед. наук (д-р філософії)
Клінічна лікарня «Феофанія» Державного управління справами, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6091-5809>
- **Вісков Олександр Вячеславович**, канд. техн. наук
Державна інспекція ядерного регулювання України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4818-5238>

У статті порівняно інформацію щодо значень еквівалентної дози на руки, зчитаних з кільцевих термолюмінесцентних дозиметрів маніпуляційних медичних сестер відділення позитронно-емісійної комп'ютерної томографії Всеукраїнського центру радіохірургії Клінічної лікарні «Феофанія» Державного управління справами, із розрахунками еквівалентної дози на руки, виконаних за допомогою комп'ютерного коду VARSKIN+.

Персонал, який здійснює маніпуляції із радіофармпрепаратом у відділенні позитронно-емісійної комп'ютерної томографії, знаходиться на постійному індивідуальному дозиметричному контролі із використанням термолюмінесцентних дозиметрів для визначення ефективної дози від бета- та вторинного фотонного випромінювання, що створюється радіонуклідом ^{18}F у складі радіофармпрепарату 2-[^{18}F]Fluoro-2-deoxy-D-glucose, а також кільцевих дозиметрів для визначення еквівалентної дози на руки для порівняння із дозовими лімітами персоналу категорії А.

Під час дослідження була використана інформація з дозиметрів-кілець трьох маніпуляційних медичних сестер відділення позитронно-емісійної комп'ютерної томографії Всеукраїнського центру радіохірургії Клінічної лікарні «Феофанія» Державного управління справами щодо дози, накопиченої за десять місяців. За цей період із документації відділення, зокрема із записів в журналах, була виокремлена інформація про щоденну кількість проведених маніпуляцій, як-то введеної активності кожному пацієнту, загальної активності радіофармпрепарату, факту використання захисних засобів при проведенні маніпуляцій, повідомлень про випадки контакту радіоактивної речовини зі шкірою, рукавичками, інше, що може вплинути на значення вимірної дози на кисті рук. Експериментально було визначено усереднений час, що витрачається на кожний етап маніпуляції з радіофармпрепаратом.

Порівняння розрахункових даних та даних, отриманих під час обробки термолюмінесцентних дозиметрів за один і той самий час, враховуючи кількість операцій, що були проведені персоналом, та величину активності, підготовленої для введення пацієнтам, дозволило визначитись із можливістю та

ефективністю використання розрахунків для планування та оцінки еквівалентної дози під час проведення маніпуляцій у відділенні позитронно-емісійної комп'ютерної томографії медичних центрів, оцінити потребу в додатковому локальному захисті від іонізуючого випромінювання для рук під час проведення ін'єкцій чи оптимізації процедур маніпуляції, визначитись з обов'язковістю оцінювання еквівалентних доз за допомогою термолюмінесцентних дозиметрів.

Ключові слова: ^{18}F -ФДГ, Hp(0,07), VARSKIN+, еквівалентна доза на руки, опромінення персоналу, ПЕТ/КТ, порівняльний аналіз, радіаційний захист, розрахунок дози, термолюмінесцентні дозиметри.

© Кудряшова Є. В., Бондар Б. М., Кметюк Я. В., Вісков О. В., 2022

Позитронно-емісійна комп'ютерна томографія (ПЕТ/КТ) стала однією з найбільш часто використовуваних діагностичних процедур для отримання даних щодо метаболічної або біохімічної функції тканин і органів. Єдиним радіофармацевтичним препаратом для ПЕТ, який на сьогодні виробляється та використовується в Україні для оцінки серцево-судинних і онкологічних захворювань, є радіофармацевтичний препарат 2-[^{18}F]Fluoro-2-deoxy-D-glucose (^{18}F -ФДГ). ^{18}F -ФДГ має невеликий період напіврозпаду (109,8 хв) та створює іонізуюче випромінювання високої енергії із значним впливом як на все тіло, так і на кінцівки (руки) персоналу центрів ПЕТ/КТ. Відповідно, контроль доз опромінення та оптимізація засобів радіаційного захисту медичного персоналу ПЕТ/КТ-центрів є одним із найважливіших завдань радіаційного захисту в діагностичній радіології.

Серед персоналу ПЕТ/КТ-центрів найбільшу еквівалентну дозу опромінення рук отримують маніпуляційні медичні сестри відділення ПЕТ/КТ (ММС), які безпосередньо виконують процедуру підготовки та введення пацієнту розчину ^{18}F -ФДГ призначеної активності. Хронічне опромінення дозами, співставними із лімітом, визначеним у державних санітарних нормах для персоналу категорії А, пов'язано із підвищеним ризиком виникнення онкологічних захворювань, хромосомних аберацій та цитогенетичної шкоди у відповідного персоналу [1], [2].

Вимірювання еквівалентної дози на руки рекомендоване при оціночній дозі, суттєво вищій за значення, отримані з дозиметра на все тіло. Використання окремих дозиметрів на руки має за мету вимірювання еквівалентної дози на кінцівки (руки) для порівняння із лімітами, встановленими для цієї категорії осіб, що зазнають опромінення, до якої належить маніпуляційний персонал відділення ПЕТ/КТ: для персоналу категорії А цей ліміт відповідно до чинного українського санітарного законодавства встановлений на рівні 500 мЗв на рік [3]. Для контролю дози на руки використовуються індивідуальні дозиметри із відповідними до параметрів радіаційної обстановки на робочих місцях технічними характеристиками, що розміщуються на першій фаланзі середнього пальця на обох кінцівках персоналу, який виконує маніпуляції з ^{18}F -ФДГ (рисунок 1).

Не зважаючи на широке використання, індивідуальні дозиметри із термолюмінесцентними детекторами не є ідеально адаптованими до послідовності маніпуляцій з радіофармацевтичним препаратом (РФП), що виконуються у відділеннях ПЕТ/КТ медичних центрів, а саме: кільцевий індивідуальний дозиметр вимірює випромінювання завжди в одному положенні та відображає середню, переважно занижену, дозу за певний період. Тому, існує ймовірність, що значення отриманої персоналом дози, виміряної за допомогою індивідуальних кільцевих дозиметрів, не відповідає дійсному опроміненню кінцівок у персоналу відділень ПЕТ/КТ медичних центрів, які виконують маніпуляції із ^{18}F -ФДГ.

Для порівняння були використані значення еквівалентної дози на руки ММС відділення ПЕТ/КТ Всеукраїнського центру радіохірургії Клінічної лікарні «Феофанія» Державного управління справами (Центр) за десять місяців 2020-2021 років. За цей же період з документації відділення була зібрана інформація щодо активності ^{18}F -ФДГ, з якою працював персонал, визначені засоби захисту, що використовувалися, час, який був у середньому ви-



Рисунок 1 – Вкладання ММС шприца з ін'єкцією – призначеною дозою РФП захисному кожусі до спеціального переносного захисного контейнера

трачений на кожному етапі процедури ПЕТ/КТ. Для моделювання дозового навантаження на верхні кінцівки ММС відділення ПЕТ/КТ був використаний програмний код VARSKIN+ від Комісії з ядерного регулювання США який дозволяє провести розрахунок доз відповідно до математичних моделей геометрій «шприц» та «циліндр», з урахуванням часу та умов проведення етапів маніпуляції з ^{18}F -ФДГ.

Матеріали та методи

Опис процедур маніпуляції з ^{18}F -ФДГ у відділенні ПЕТ/КТ Центру. Проектна максимальна потужність лабораторії радіонуклідного забезпечення з напрацювання РФП у вигляді ^{18}F -ФДГ для позитронно-емісійної томографії за добу – 148 ГБк.

Середня активність радіофармпрепарату ^{18}F -ФДГ під час проведення ПЕТ-діагностики – 329 МБк на одного пацієнта. Під час проведення дослідження використовувався розчин для внутрішньовенного введення з активністю від 68 МБк до 576 МБк на пацієнта в першому періоді; від 48 МБк до 783 МБк на пацієнта в другому періоді.

Для дослідження був обраний період з 26 листопада 2020 року до 21 жовтня 2021 року відповідно до термінів обробки індивідуальних дозиметрів.

Упродовж цього періоду інформація з кільцевих дозиметрів трьох ММС відділення ПЕТ/КТ щодо накопиченої ними дози була зчитана двічі. Вибір періоду визначався плановими термінами заміни кільцевих дозиметрів відповідно до договору із підприємством, що надає послуги індивідуального дозиметричного контролю.

Маніпуляції із ^{18}F -ФДГ у відділенні ПЕТ/КТ можна умовно розділити на 4 етапи (опис процесів на кожному з етапів наведений у таблиці 1).

Доставка РФП у вигляді закупореного скляного флакона із мультидозою ^{18}F -ФДГ, вкладеного в захисний контейнер, з першого на другий поверх будівлі Центру відбувається за допомогою вантажного підйомника (етап 1). Технологічні маніпуляції з підготовки до введення в організм пацієнта ^{18}F -ФДГ (етап 2) – підготовка шприца з ін'єкцією – відбуваються набором потрібної кількості РФП із флакона із напрацьованою кількістю ^{18}F -ФДГ потрібної на день активності через попередньо встановлений в гумову перегородку флакона диспенсер. Роботи етапу 2 проводяться в облицьованій свинцем робочій камері з оглядовим вікном зі свинцевого скла (рисунок 2) у допоміжному технічному приміщенні відділення ПЕТ/КТ. ММС знаходиться за свинцевим захистом, маніпуляції з активністю здійснює руками в захисних нітрилових рукавичках (рисунок 3).

Таблиця 1 – Етапи маніпуляції із ^{18}F -ФДГ у відділенні ПЕТ/КТ

Етапи маніпуляції з ^{18}F -ФДГ	Опис процесу проведення процедури ПЕТ/КТ		
	Назва процесу	Виконавець	Опис процедури
Етап 1	Отримання флакона з мультидозою	Інженер-радіофізик	1) доставка запакованого флакона з мультидозою за допомогою спеціального ліфта із гарячої камери лабораторії синтезу; 2) перенесення флакона маніпуляційним інструментом до робочої камери зі свинцевим захистом; 3) встановлення флакона у свинцевий контейнер та налаштування інструментів під'єднання.
Етап 2	Підготовка ін'єкції	ММС	1) відбір потрібного об'єму ^{18}F -ФДГ з флакона відповідно до призначеної активності, яку потрібно ввести пацієнту; 2) перевірка активності відібраного об'єму, встановленого в стакан для фіксації проби, у дозкалібраторі колодязного типу; 3) розбавлення ^{18}F -ФДГ розчином NaCl до об'єму 5 мл для ін'єкції; 4) вкладання шприца до захисного кожуха; 5) перенесення шприца в захисному кожусі та спеціальному захисному контейнері до радіологічної процедурної.
Етап 3	Проведення ін'єкції	ММС	1) під'єднання шприца в захисному контейнері до катетера, попередньо встановленого пацієнту; 2) проведення ін'єкції повільним болюсом.
Етап 4	Проведення ПЕТ/КТ сканування	Рентген-лаборант	1) супроводження пацієнта до процедурної ПЕТ/КТ; 2) проведення процедури сканування.

Для вимірювання активності набраного ^{18}F -ФДГ, шприц із активністю, яку необхідно визначити, попередньо розташовується в стакані для фіксації проб (рисунок 3). Стакан зі шприцем встановлюють у дозкалібратор колодязного типу Atomlab™ 500 Dose Calibrator (Biodex), розміщеному у робочій камері (рисунок 3). Після визначення активності розчин ^{18}F -ФДГ розбавляється розчином NaCl до об'єму 5 мл для ін'єкції пацієнту (рисунок 4). Шприц вкладається в захисний кожух для перенесення в радіологічну процедурну та проведення ін'єкції (рисунок 4).

Підготовлений до ін'єкції шприц вміщують до захисного кожуха (Biodex Pro-Tec PET Syringe Shield), виконаного з вольфраму, з товщиною стінки 9 мм та віконечком для контролю вмісту. Захисний кожух спеціально розроблений для послаблення дозового впливу на руки персоналу від шприців із вмістом радіонукліду з фотонним випромінюванням енергією 511 кеВ. Далі шприц з кожухом вкладають до захисного контейнера з ручкою (Shielded Syringe Carrier, Biodex) та переносять його з допоміжної технічної кімнати до радіологічної процедурної.

У радіологічній процедурній пацієнту внутрішньовенно повільним болюсом через попередньо встановлений у ліктьовій вені катетер вводиться розчин ^{18}F -ФДГ (рисунок 5). Після ін'єкції призначеної активності ММС негайно виходить з радіологічної процедурної, а пацієнт залишається в кімнаті для витримки перед процедурою сканування. ММС не знаходиться поруч із пацієнтом під час витримки до сканування, не здійснює супровід на сканування та не знаходиться поруч під час витримки після сканування.

Середній розрахунковий час між введенням РФП окремим пацієнтам становить 30 хвилин. Максимальна тривалість робочого дня відділення – 12 годин.

У відділенні ПЕТ/КТ Центру за обраний для дослідження час працювали три ММС. Максимальна кількість пацієнтів за добу – 24, середня – 13. Загальна кількість пацієнтів за періодами, введена активність, середня активність на пацієнта та загальна активність, з якою працювали ММС, наведені в таблиці 2.



Рисунок 2 –Робоча камера в допоміжному технічному приміщенні відділення ПЕТ/КТ



Рисунок 3 – Визначення необхідної активності ^{18}F -ФДГ для ін'єкції

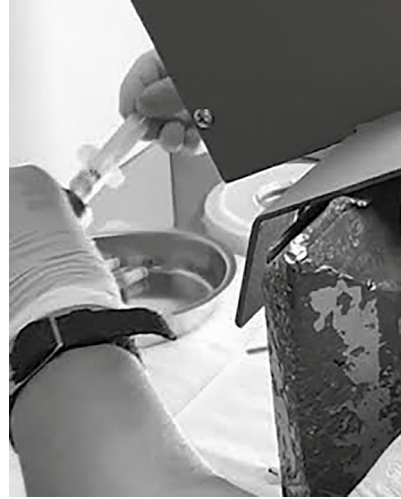


Рисунок 4 – Розбавлення ^{18}F -ФДГ розчином NaCl та встановлення шприца в захисний кожух



Рисунок 5 – Процедура ін'єкції: введення призначеної активності ^{18}F -ФДГ пацієнту

Таблиця 2 – Кількість пацієнтів та активність ^{18}F -ФДГ за перший (з 26 листопада 2020 року до 29 березня 2021 року) та другий (з 19 квітня до 21 жовтня 2021 року) періоди проведення дослідження

Період	Робочі дні	Загальна кількість пацієнтів	Введена активність, ГБк	Середня активність на пацієнта* (\pm стандартне відхилення), МБк	Активність, з якою працювали ММС за період, ТБк
1	45	600	199,1	331,27 \pm 78,0	1,1
2	89	1153	375,5	325,7 \pm 75,6	2,0

* $0,005 < p < 0,01$

Визначення еквівалентної дози на руки у відділенні ПЕТ/КТ. Працівники відділення ПЕТ/КТ, а насамперед ММС, під час різних етапів маніпуляції з ^{18}F -ФДГ (таблиця 1) знаходяться в тісному контакті з РФП високої активності. Особливості виконання робіт сприяють тому, що доза на руки, особливо на пальці, значно перевищує дозу на тіло в цілому [4]. Відповідно, пальці рук станов-

лять особливий інтерес як об'єкт моніторингу та контролю для зменшення доз опромінення працівників.

Відповідно до [5] індивідуальна робоча величина моніторингу визначається в точці кінцівки (палець руки) для фіксації дози від зовнішнього випромінювання на шкіру в цій точці (еквівалентної дози на руку).

У відділенні ПЕТ/КТ Центру вимірювання еквівалентної дози на руки виконується за допомогою індивідуальних кільцевих термомюнесцентних дозиметрів DXT-RAD виробництва Thermo Scientific з детекторами з фториду літію (LiF(Mg,Ti)) (ТЛД-дозиметр), які призначені для вимірювання дози на шкіру від фотонного або бета-випромінювання. ТЛД-дозиметр складається з пластикового тримача-кільця, мейларового фільтра, детектора та прозорого ущільнювального ковпачка з отвором. Еквівалентна доза на руки – індивідуальний еквівалент поверхневої дози $H_p(0,07)$ – оцінюється за допомогою накопичених даних матеріалу детектора, вихідні сигнали якого при зчитуванні пропорційні поглиненій тканиною енергії іонізуючого випромінювання. ТЛД-дозиметр використовується для моніторингу дози від фотонів та бета-частинок.

Дозиметри-кільця видаються ММС на певний період часу (від трьох до шести місяців відповідно до кількості проведених за цей період робіт). Використання ТЛД-дозиметрів є індивідуальним. Дозиметр розміщується під рукавичками на першій фаланзі середнього пальця детектором всередину долоні. Дані, зчитані з ТЛД-дозиметрів трьох ММС за обраний для дослідження період, наведені в таблиці 3.

Конструкція ТЛД-дозиметрів та відповідне програмне забезпечення з алгоритмами оцінки доз дозволяють визначати дози в широкому діапазоні умов опромінення персоналу (енергія випромінювання, кутові характеристики поля випромінювання), кожний чутливий елемент дозиметра калібрується окремо відповідно до призначення. ТЛД-система Harshaw 8800 має вбудовану систему калібрування, контролю параметрів та перевірки якості; втрата інформації через ефект федингу – до 5 % за рік при температурі 20°C. Відповідно до Свідоцтва про повірку ТЛД-системи Harshaw 8800 границі допустимої похибки вимірювань індивідуального фотонного випромінювання при $P = 0,95$ становлять ± 15 %.

Між тим, комбіноване випромінювання та різний кутовий відгук під час застосування по одному детектору на кожну руку та фединг дозиметрів при тривалих інтервалах використання роблять великий внесок у «бюджет невизначеності» під час інтер-

претації результатів, зчитаних з ТЛД-дозиметрів, в умовах різних типів маніпуляцій з ^{18}F -ФДГ. Відповідно до [6] розширена невизначеність при визначенні дози на руки за таких умов може сягати 42 %.

Для оцінки дози на руки та порівняння із дозовими лімітами Міжнародна комісія з радіаційного захисту (МКРЗ) рекомендує використовувати індивідуальний еквівалент дози $H_p(0,07)$ – дозу на глибині 0,07 мм [5]. Ліміт річної дози в 500 мЗв відповідно до рекомендацій застосовується до усередненої на один квадратний сантиметр площі, що зазнала найбільшого опромінення [5].

ТЛД-дозиметри у формі кільця накопичують дозу в місці розташування детектора, але для порівняння із лімітом дози необхідно визначитись, яку площу усереднення необхідно обрати для подальшого обрахунку дози, усередненої для найбільш опромінених 10 cm^2 шкіри. Це дозволить оцінити дозу на руки за показаннями ТЛД-дозиметрів. Обрахунок індивідуальної еквівалентної дози на руки за усереднення дози на площу 1 cm^2 та 10 cm^2 не вимагає введення додаткових коригуючих коефіцієнтів за умови носіння ТЛД-дозиметра на першій фаланзі середнього пальця відповідно до [7]. Отже, робоча величина, рекомендована МКРЗ для кількісного визначення дози на руки – індивідуальний еквівалент дози $H_p(0,07)$, усереднений на шкіру площею 1 cm^2 , у нашому випадку – величина, ідентична еквіваленту поверхневої дози на глибині шкіри 7 mg/cm^2 , усередненому на 10 cm^2 .

Розрахунок еквівалентної дози на руки у відділенні ПЕТ/КТ

Опис програмного коду. VARSKIN+ – програмний код, що зазвичай використовується для обрахунку дози на руки працівників, отриманої від впливу випромінювання гарячих частинок чи інших радіоактивних речовин, розташованих безпосередньо на або близько до шкіри. Така оцінка вимагається відповідно до Розділу 10 Code of Federal Regulations (10 CFR) 20.1201(c) [8], який визначає, що еквівалент поверхневої дози частини тіла, яка

Таблиця 3 – Дози ММС відділення ПЕТ/КТ, накопичені за перший та другий періоди дослідження

ММС	Еквівалентна доза на руку за перший період, мЗв		Еквівалентна доза на руку за другий період, мЗв	
	ліва	права	ліва	права
1	11,9	56,4	23,9	44,8
2	0,67	27	0,1	35,4
3	22,8	13,4	85	29,1
Сума доз домінуючої руки за перший період, мЗв			106,2	
Сума доз домінуючої руки за другий період, мЗв			165,2	

знає найбільшого опромінення, має бути визначений на усередненій на 10 см² площі шкіри на глибині тканини 0,07 мм (7 мг/см²).

SkinDose використовує робусти електронні та фотонні моделі розрахунку дози на шкіру. Розрахунок дози проводиться на безкінечно тонкий диск на завданій глибині тканини. Моделювання дози від фотонів охоплює різну базову геометрію джерела, а розрахунок дози проводиться на об'єм усереднення у вигляді диску безпосередньо під поверхню шкіри на глибині, завданою користувачем. Площу усереднення шкіри, на яку здійснюється розрахунок дози, також визначає користувач [9].

Розподілення активності в тканині моделюється за допомогою спрощеного метода із ядром дози в точці, суть якого полягає в числовому інтегруванні точкового ядра по всьому об'єму джерела та об'єму дослідження дози. Переваги такого спрощення у швидкості розрахунку, недоліки – відносна неточність, оскільки доза в обраній точці обраховується від джерела випромінювання в точці однорідного середовища (зазвичай води). В іншому середовищі для кількісного визначення витрат енергії вздовж всього шляху заряджених частинок використовуються відповідні методи масштабування розсіювання енергії частинок [9].

Параметри обрахунку. Відстані до джерела випромінювання та час, витрачений на проведення відповідної процедури, були обраховані експериментально та усереднені до оптимальних значень. Відстань від домінуючої руки ММС до флакона з мультидозою враховувала також довжину диспенсера, який використовується під час процедури набору.

Дані щодо розпаду ¹⁸F для розрахунку дози були обрані відповідно МКРЗ 107 [10] та наведені в таблиці 4. Радіонуклід ¹⁸F, який використовується для проведення позитронно-емісійної діагностики у відділенні ПЕТ/КТ Центру, налічує два типи розпаду: позитронний розпад із випусканням позитронів з максимальною енергією 0,635 MeV та електронний захват. Внаслідок позитронного розпаду утворюються два гамма-кванти анігіляції з енергією 0,511 MeV.

Геометрія «шприц» була наново додана до нової версії програмного коду VARSKIN+ в модуль «SkinDose». Для обрахунку дози від цієї геометрії випромінювання необхідно задати довжину та діаметр об'єму радіоактивного розчину, набраного в шприц, тобто розміри вмісту шприца, а не зовнішні фізичні розміри самого шприца.

Значення параметрів дозиметричної моделі для різних етапів зведені в таблицях 5 та 6.

Таблиця 4 – Основні дані щодо емісії ¹⁸F

Випромінювання/емісія	% на один розпад	Середня енергія
Позитрон (β+)	96,7	249,8 кеВ
Гамма (як результат позитронної аннігіляції)	193,5	511,0 кеВ

Таблиця 5 – Значення параметрів дозиметричної моделі, яка була використана для розрахунку дози під час етапу 2 – підготування шприца з ін'єкцією ¹⁸F-ФДГ

Параметр	Матеріал	Значення
Глибина розрахунку дози	-	7 мг/см ²
Час експозиції	-	20 с
Площа усереднення	тканина шкіри	10 см ²
Товщина повітряного зазору	повітря	13 см
Товщина захисного шару	1) гума	5 мм
	2) пластик	0,675 мм
	3) нітрилові рукавички	0,05 мм
Щільність захисного шару	1) гума	1,34 г/см ³
	2) пластик	0,905 г/см ³
	3) нітрилові рукавички	0,9 г/см ³
Діаметр джерела (циліндр)	¹⁸ F-ФДГ	22 мм
Товщина джерела (циліндр)	¹⁸ F- ФДГ	7 мм
Щільність джерела	¹⁸ F- ФДГ	1,59 г/см ³

Таблиця 6 – Значення параметрів дозиметричної моделі, яка була використана для розрахунку дози під час етапу 3 – проведення ін'єкції ^{18}F -ФДГ

Параметр	Матеріал	Значення
Глибина розрахунку дози	-	7 мг/см ²
Час експозиції	-	15 с
Площа усереднення	тканина шкіри	10 см ²
Товщина повітряного зазору	повітря	0 мм
Товщина захисного шару	1) пластик	0,675 мм
	2) нітрилові рукавички	0,05 мм
	3) вольфрам	9 мм
Щільність захисного шару	1) пластик	0,905 г/см ³
	2) нітрилові рукавички	0,9 г/см ³
	3) вольфрам	19,3 г/см ³
Діаметр джерела (шприц)	^{18}F -ФДГ	12,5 мм
Товщина джерела (шприц)	^{18}F -ФДГ	20,5 мм

Допущення, використані для розрахунку та аналізу:

для отримання розрахункового значення використовувалася найбільш консервативна модель опромінення;

для розрахунку дози під час процедури введення пацієнту розчину ^{18}F -ФДГ значення загальної активності було прийняте як половина середньої активності, що вводиться, відповідно до лінійного зменшення об'єму ін'єкції за час введення;

довжина джерела випромінювання геометрії «шприц» дорівнює половині довжини розчину ^{18}F -ФДГ плюс NaCl, об'ємом 5 мл, набраного в шприц для ін'єкцій відповідно до лінійного зменшення об'єму ін'єкції за час введення;

сумарну активність за звітний період, з якою працюють ММС, було віднесено до дози, накопиченою сумарно трьома ММС;

за значення дози, що співставлятиметься із розрахунковим значенням, було прийняте максимальне значення на руку, зчитане з лівого або правого

кільцевого дозиметра ММС. Було припущено, що рука, доза на яку відповідно до показань ТЛД-дозиметрів максимальна, є домінуючою для кожної ММС;

обрахунок здійснювався для «типового робочого дня» із середньою кількістю пацієнтів, середньою величиною активності, яка вводилася, відповідно величиною напрацьованої активності мультидозу у флаконі під час підготовки ін'єкції (з урахуванням розпаду ^{18}F).

Результати та їх обговорення

Отримані результати від проведених розрахунків та вимірян за допомогою ТЛД-дозиметрів значення еквівалентної дози на руки ММС Центру наведені в таблиці 7.

Результати розрахунку еквівалентної дози на руки ММС Центру під час різних етапів процедури маніпуляції з ^{18}F -ФДГ зображені на рисунку 6.

Таблиця 7 – Результати розрахунку еквівалентної дози на руки трьох ММС

Період	Розрахункова середня доза на руки за день, мЗв	Розрахункова доза на руки за період, мЗв		Доза на руки за відповідний період, мЗв	Доза на руки за даними ТЛД, мЗв	Розрахункова очікувана доза за рік*, мЗв	Доза за рік за даними ТЛД (\pm розширена невизначеність**), мЗв
		Підготування шприца з ін'єкцією	Процедура ін'єкції				
1-й	2,5	92,4	21,6	114	106,2	376,7	287,4 \pm 120,7
2-й	2,2	157,3	40,4	197,6	165,2		

* значення, отримане лінійною екстраполяцією даних розрахунку на період 12 міс.

** розширена невизначеність була взята максимальною відповідно до [6].

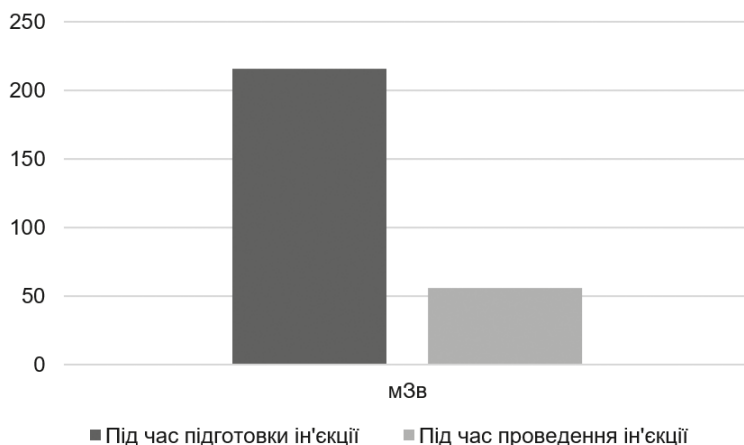


Рисунок 6 – Розрахункова доза на руки ММС відділення ПЕТ/КТ Центру за десять місяців

Середня розрахункова доза на руки за день для трьох ММС за другий період (2,2 мЗв) менша за середню дозу в першому періоді (2,5 мЗв) через більшу низьку середню активність на день, з якою працювали ММС у першому періоді (24,4 ГБк – в першому періоді, 22,8 ГБк – в другому). Розрахована доза на руки під час процедури ін'єкції (21,6 мЗв – в першому періоді, 40,4 мЗв – в другому) суттєво менша за дозу, розраховану для процедури приготування шприца з ін'єкцією (92,4 мЗв – в першому періоді, 157,3 мЗв – в другому). Сумарна еквівалентна доза на руки, розрахована для першого періоду (114 мЗв), менша за дозу для другого періоду (197,6 мЗв), що відповідає даним, отриманим за допомогою ТЛД-дозиметрів відповідно за перший та другий періоди (106,2 мЗв та 165,2 мЗв відповідно). Розрахункова очікувана доза на руки за рік (376,7 мЗв) для трьох ММС відповідає значенням, отриманим за допомогою ТЛД за 2021 рік ($287,4 \pm 120,7$ мЗв).

Аналіз отриманих розрахункових значень еквівалентних доз на руки медичного маніпуляційного персоналу та порівняння цих результатів із вимірними дозами, накопиченими на кільцевих дозиметрах, демонструють надійне узгодження між величинами, отриманими експериментально та за допомогою моделювання. Програмний код VARSKIN+ виявився корисним інструментом для оцінки еквівалентної дози на руки ММС на глибині 0,07 мм у відділенні ПЕТ/КТ Центру: зафіксоване відхилення між розрахованою та вимірною дозами складає 10,8% для першого періоду та 12,5% для другого періоду.

На різницю між розрахованою та вимірною дозами вплинули складні умови опромінення через різні етапи маніпуляцій із ^{18}F -ФДГ, що призводить до значної кількості допущень в розрахунках, а також вносить значний внесок у невизначеність під час визначення дози за допомогою ТЛД-дозиметрів. Обмежувальними щодо точності визначення дози на руки можна вважати також такі фактори, як невелика кількість ММС, що брали участь у

дослідженні, час досліджень, обмежений двома нерівномірними періодами, усереднення при врахуванні відстаней та часу проведення різних етапів маніпуляцій із ^{18}F -ФДГ, похибку через спрощену геометрію джерела, невизначеність калібрування ТЛД-дозиметрів щодо енергій випромінювання ^{18}F -ФДГ та геометрії, що відповідає фактичним умовам опромінення.

ММС Центру у своїй роботі не використовують автоматичні системи дозування та ін'єкції, натомість проводять маніпуляції із високою активністю ^{18}F -ФДГ, через що доза на руки суттєво підвищується. Як видно з діаграми на рисунку 6 еквівалентна доза, яку отримують на руки ММС під час етапу 2, майже в чотири рази перевищує дозу, отриману під час етапу 3.

Річна еквівалентна доза для ММС відділення ПЕТ/КТ Центру відповідно до розрахунку та вимірювань не перевищує річний ліміт еквівалентної дози на руки у 500 мЗв та складає в середньому відповідно 125,6 мЗв та $95,8 \pm 40,2$ мЗв на одного працівника. Водночас, доза на руки для відповідних працівників залишається на доволі високому рівні – більше ніж 20% від річного ліміту, а отже, існує гіпотетичний ризик перевищення річного ліміту еквівалентної дози на руки в разі аварійної ситуації із розлиттям РФП. Випадків аварійного опромінення за визначений для дослідження час зафіксовано не було.

Для забезпечення принципу ALARP (as low as reasonably practicable) необхідно постійно, наскільки це доцільно з діагностичного та економічного погляду, впроваджувати заходи для зменшення дози опромінення персоналу. Цими заходами можуть бути зменшення часу проведення певного етапу процедури завдяки кращому плануванню робочого процесу та використанню додаткових захисних засобів і пристроїв для оптимізації процедур поводження із РФП. Використання напівавтоматичного пристрою для набору ^{18}F -ФДГ з флакона в шприц та автоматичної системи для

внутрішньовенного введення РФП у повсякденній практиці є цілком виправданим для зниження радіаційного опромінення персоналу [4]. Система внутрішньовенного введення дозволяє усунути етап 2, який є найбільш дозоформуєчим під час проведення маніпуляцій із ^{18}F -ФДГ у відділенні ПЕТ/КТ медичних центрів (рисунок 6), і також дозволяє підвищити точність дозування та мінімізувати контакт ММС з РФП під час процедури ін'єкції. Заразом, необхідно зважати на вартість наборів для проведення ін'єкції (змінюються для кожного пацієнта), а також наборів для адміністрування джерела, які потребують заміни два рази на зміну, що може створювати додаткове опромінення на руки працівників. На організаційному рівні потрібно ретельно контролювати чергування персоналу на тих робочих місцях, які задіяні в операціях з високою активністю РФП.

Розподіл дози опромінення у працівників відділення ПЕТ/КТ медичних центрів є неоднорідним і складним. Значення вимірної дози залежить від положення дозиметра та процедур, що виконуються певною групою працівників. Суттєва різниця в значеннях вимірної еквівалентної дози (таблиця 3) для трьох ММС одного відділення може бути пояснена, зокрема, відмінностями в індивідуальному досвіді та робочих звичках працівників. В інтересах персоналу, який займається підготовкою та проведенням ін'єкцій РФП, у кожному відділі має бути впроваджено найбільш відповідний засіб індивідуальної дозиметрії. Щоденний підхід завжди повинен бути спрямований на зниження радіаційного опромінення, навіть якщо отримана персоналом доза за існуючих рівнів опромінення набагато нижча за встановлені ліміти.

Висновки

У результаті дослідження було порівняно результати вимірювань ТЛД-дозиметрів і розрахунків VARSKIN+ для геометрії «шприц» та «циліндр» джерела випромінювання ^{18}F . Результати порівняння між вимірюваннями ТЛД-дозиметрів та обчисленням з використанням програмного коду VARSKIN+ для випадку сумарної дози від різних моделей джерела та складних умов опромінення для визначення еквівалентної дози на руки $\text{Hr}(0,07)$ є співставними. Використання програмного коду VARSKIN+ для моделювання ситуацій поточного опромінення є виправданим та надійним.

Враховуючи, що кільцеві ТЛД-дозиметри на основі детекторів із фториду літію добре підходять для вимірювання еквівалентної дози на руки, рекомендується їх використання із розміщенням на першій фаланзі домінуючої руки ММС. Водночас, якщо технологічно підтримувати дозу опромінення на тому самому або нижчому рівні завдяки ви-

користанню пристроїв для оптимізації процедур маніпуляцій з ^{18}F -ФДГ, вимірювання еквівалентної дози на руки за допомогою ТЛД-дозиметрів можна на певні періоди часу замінити розрахунковими значеннями за умови прогнозованої річної еквівалентної дози на руки, не більшої за половину встановленого в Україні ліміта [3], [11]. Водночас необхідно зважати на те, що:

- 1) розрахунок доз має виконувати кваліфікований працівник, який добре знайомий зі всіма етапами процесу підготовки та проведення ін'єкцій;
- 2) розрахунок доз повинен проводитися на основі задокументованих даних щодо активності РФП, кількості пацієнтів, випадків аварійного опромінення внаслідок розлиття розчину ^{18}F -ФДГ тощо;
- 3) методи моделювання мають бути змінені за будь-якої зміни в технологічному процесі;
- 4) через певні інтервали часу (визначених заздалегідь як частина процесу забезпечення контролю якості) необхідно проводити вимірювання дози на руки за допомогою ТЛД-дозиметрів для перевірки точності розрахунків.

Список використаної літератури

1. Adliene D., Gričienė B., Skovorodko K., Laurikaitienė J., Puiso J. Occupational radiation exposure of health professionals and cancer risk assessment for Lithuanian nuclear medicine workers. *Environmental Research*. 2020. Vol.183, 109144.
2. Garaj-Vrhovac V., Kopjar N., Poropat M. Evaluation of cytogenetic damage in nuclear medicine personnel occupationally exposed to low-level ionising radiation. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*. 2006. Vol. 57, no. 1. P. 31-8. PMID: 16605164.
3. Державні гігієнічні нормативи «Норми радіаційної безпеки України» (НРБУ-97), введені в дію постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1997 № 62.
4. Pavičar B., Davidović J., Petrović B., Vuleta G., Trivić S., Šajinović V., Egeljić-Mihailović N., Todorović N., Predojević B. Nuclear medicine staff exposure to ionising radiation in ^{18}F -FDG PET/CT practice: a preliminary retrospective study. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*. 2021. Vol. 72, no. 3. P. 216-224. doi: 10.2478/aiht-2021-72-3517. PMID: 34587667; PMCID: PMC8576747.
5. ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5).
6. Stadtmann H., Hranitzky C. Uncertainty assessment and comparison of different dose algorithms used to evaluate a two element LiF:Mg,Ti TL personal dosimeter. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/004/43004023.pdf.

7. Sherbini S., Ilas D., Eckerman K., DeCicco J. Correction factors applied to finger dosimetry: a theoretical assessment of appropriate values for use in handling radiopharmaceuticals. *Health Physics*. 2011. Vol. 101, no. 1. P. 1–12. doi: 10.1097/HP.0b013e318207ce10. PMID: 21617388.
8. Code of Federal Regulations (10 CFR) 20.1201(c).
9. Hamby D. M., Mangini C. D., Luitjens J. M., Shaffer V., Boozer D. L., Tucker Z. G., Rose C. T., Flora R. S. VARSKIN+ A Computer Code for skin contamination and dosimetry. NUREG/CR-6913/Rev 4. Washington, DC : US Nuclear Regulatory Commission, 2021.
10. ICRP, 2008. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. Ann. ICRP 38 (3).
11. Occupational Radiation Protection. IAEA General Safety Guide No. GSG-7. Vienna : IAEA, 2018. 335 p.
12. Emad El-din, M. M., Mahmoud, R.M.M., Abaza, A., Ez El-din, M.R., Eid, I., Rizk, R.A. Occupational Radiation Exposure in PET/CT Units. *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*, 2017. Vol. 50, Iss. 3. P. 58-65.
13. Adliene D., Grieciene B., Skovorodko K., Laurikaitiene J., Puiso J. Occupational radiation exposure of health professionals and cancer risk assessment for Lithuanian nuclear medicine workers. *Environmental Research*. 2020. Vol. 183. P. 109144. doi: 10.1016/j.envres.2020.109144. PMID: 32028181.
14. Yuen P.S., Freedman N.O., Frketch G., Rotunda J. Evaluation of BICRON NE MCP DXT-RAD passive extremity dosimeter (AECL--12017). Canada, 1999.
15. Salesses F, Perez P, Maillard AE, Blanchard J, Mallard S, Bordenave L. Effect of dosimeter's position on occupational radiation extremity dose measurement for nuclear medicine workers during (18)F-FDG preparation for PET/CT. *EJNMMI Physics*. 2016 Vol. 3, no. 1. Article number 16. doi: 10.1186/s40658-016-0152-5. PMID: 27495913; PMCID: PMC4975735.
16. Pavičar B., Davidović J., Petrović B., Vuleta G., Trivić S., Šajinović V., Egeljić-Mihailović N., Todorović N., Predojević B. Nuclear medicine staff exposure to ionising radiation in ¹⁸F-FDG PET/CT practice: a preliminary retrospective study. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*. 2021. Vol. 72, no. 3. P. 216–224. doi: 10.2478/aiht-2021-72-3517. PMID: 34587667; PMCID: PMC8576747.
17. Olszewski J., Jankowski J., Jankowski J., Wrzesien M. Dose equivalent to fingertips of nuclear medicine personnel. *Second European IRPA congress on radiation protection - Radiation protection: from knowledge to action*, Paris (France), 15-19 May 2006.
2. Garaj-Vrhovac, V., Kopjar, N., Poropat, M. (2006). Evaluation of cytogenetic damage in nuclear medicine personnel occupationally exposed to low-level ionising radiation. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*. 57(1). 31-8. PMID: 16605164.
3. State Health and Safety Standards "Radiation Safety Standards of Ukraine (NRBU-97)", introduced by Ordinance No. 62 of the Chief State Medical Doctor of Ukraine on 1 December 1997.
4. Pavičar, B., Davidović, J., Petrović, B., Vuleta, G., Trivić, S., Šajinović, V., Egeljić-Mihailović, N., Todorović, N., Predojević, B. (2021). Nuclear medicine staff exposure to ionising radiation in ¹⁸F-FDG PET/CT practice: a preliminary retrospective study. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*. 72(3), 216-224. doi: 10.2478/aiht-2021-72-3517. PMID: 34587667; PMCID: PMC8576747.
5. ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5).
6. Stadtmann, H., Hranitzky, C. Uncertainty assessment and comparison of different dose algorithms used to evaluate a two element LiF:Mg,Ti TL personal dosimeter. Retrieved from: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/004/43004023.pdf.
7. Sherbini, S., Ilas, D., Eckerman, K., DeCicco, J. (2011). Correction factors applied to finger dosimetry: a theoretical assessment of appropriate values for use in handling radiopharmaceuticals. *Health Physics*. 101(1), 1–12. doi: 10.1097/HP.0b013e318207ce10. PMID: 21617388.
8. Code of Federal Regulations (10 CFR) 20.1201(c).
9. Hamby, D. M., Mangini, C. D., Luitjens, J. M., Shaffer, V., Boozer, D. L., Tucker, Z. G., Rose, C. T., Flora R. S. (2021). VARSKIN+ A Computer Code for skin contamination and dosimetry. NUREG/CR-6913/Rev 4. Washington, DC : US Nuclear Regulatory Commission.
10. ICRP, 2008. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. Ann. ICRP 38 (3).
11. International Atomic Energy Agency, International Labour Office, Occupational Radiation Protection, IAEA Safety Standards Series No. GSG-7, IAEA, Vienna (2018).
12. Emad El-din, M. M., Mahmoud, R. M. M., Abaza, A., Ez El-din, M. R., Eid, I., Rizk, R. A. (2017). Occupational Radiation Exposure in PET/CT Units. *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*, 50(3), 58-65.11.
13. Adliene, D., Grieciene, B., Skovorodko, K., Laurikaitiene, J., Puiso, J. (2020). Occupational radiation exposure of health professionals and cancer risk assessment for Lithuanian nuclear medicine workers. *Environ Res*. 2020 Apr;183:109144. doi: 10.1016/j.envres.2020.109144. PMID: 32028181.
14. Yuen, P. S., Freedman, N. O., Frketch, G., Rotunda, J. (1999). Evaluation of BICRON NE MCP DXT-RAD passive extremity dosimeter (AECL--12017). Canada.
15. Salesses F., Perez P., Maillard A. E., Blanchard J., Mallard S., Bordenave L. (2016). Effect of dosimeter's position on occupational radiation extremity dose measurement for nuclear medicine workers during (18)F-FDG preparation for PET/CT. *EJNMMI Physics*, 3(1):16. doi: 10.1186/s40658-016-0152-5. PMID: 27495913; PMCID: PMC4975735.

References

1. Adliene, D., Grieciene, B., Skovorodko, K., Laurikaitiene, J., Puiso, J. (2020). Occupational radiation exposure of health professionals and cancer risk assessment for Lithuanian nuclear medicine workers. *Environmental Research*. 183:109144.

16. Pavičar, B., Davidović, J., Petrović, B., Vuleta, G., Trivić, S., Šajinović, V., Egeljić-Mihailović, N., Todorović, N., Predojević, B. (2021). Nuclear medicine staff exposure to ionising radiation in 18F-FDG PET/CT practice: a preliminary retrospective study. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 72(3), 216–224. doi: 10.2478/aiht-2021-72-3517. PMID: 34587667; PMCID: PMC8576747.

17. Olszewski, J., Jankowski, J., Jankowski, J., Wrzesien, M. (2016). Dose equivalent to fingertips of nuclear medicine personnel. *Second European IRPA congress on radiation protection - Radiation protection: from knowledge to action*, Paris (France), 15-19 May 2006.

Evaluation of the Nursing PET-CT Staff Hand Dose Equivalent: A Comparative Analysis of the Data Obtained from the Ring TLD Dosimeters and VARSKIN+ Computer Code Calculation Results

Ye. Kudriashova¹, B. Bondar², Ya. Kmetiuk², O. Viskov³

¹ State Enterprise “State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety”, Kyiv, Ukraine

² Feofania Clinical Hospital, State Management of Affairs, Kyiv, Ukraine

³ State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The paper compares information on the values of the equivalent dose to hands that are read from ring DXT-RAD thermoluminescent dosimeters of the manipulation nurse in the Positron Emission Computed Tomography Department of the All-Ukrainian Center for Radiosurgery at the Feofania Clinical Hospital with calculations of the equivalent dose to hands that are performed using the VARSKIN+ computer code.

Personnel who manipulate radiopharmaceuticals in the Positron Emission Computed Tomography Department are under permanent individual dosimetric control using thermoluminescent dosimeters to determine the effective dose from beta and secondary photon radiation created by the ¹⁸F radionuclide in the 2-[¹⁸F]-2-deoxy-D-glucose, as well as ring dosimeters to determine the equivalent dose to the hands for comparison with category A dose limits.

During the study, information from the ring dosimeters of three manipulation nurses of the Positron Emission Computed Tomography Department was used regarding the dose accumulated over ten months. Over this period, information was extracted from the department's

documents, in particular from journal entries, about the daily number of manipulations performed, the amount of activity administered to each patient, the total activity of radiopharmaceuticals, the evidence of the use of protective equipment during the manipulations, reports of cases involving radioactive substance contact with skin, gloves, etc., which can affect the measured dose on hands. The average time spent on each stage of manipulation with 18F-FDG was determined experimentally.

Comparison of the calculated data and data obtained in the processing of thermoluminescent dosimeters for the same time, taking into account the number of operations performed by the staff and the amount of activity prepared for administration to patients, allowed determining the possibility and effectiveness of using calculations for planning and evaluation of the equivalent dose in manipulations at the Positron Emission Computed Tomography Department, assessing the need for additional local protection against ionizing radiation for hands during injections or optimization of manipulation procedures and determining the obligation to evaluate equivalent doses using thermoluminescent dosimeters.

Keywords: ¹⁸F-FDG, comparative analysis, dose calculation, equivalent dose to hands, Hp(0,07), radiation protection, personnel exposure, PET/CT, thermoluminescent dosimeters, VARSKIN+.

Отримано 02.11.2022