

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

САВАН САЛАХ ІБРАХІМ А.

УДК 004.942:519.6

**ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ ДОЗИМЕТРІЇ
ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У
РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Лазурик Валентин Тимофійович,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
декан факультету комп'ютерних наук

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Угрюмов Михайло Леонідович,
Національний аерокосмічний університет імені
М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»,
професор кафедри інформатики

доктор фізико-математичних наук, професор
Уваров Вячеслав Лаврентійович,
Національний науковий центр «Харківський фізико-
технічний інститут»
начальник лабораторії радіаційних технологій та
метрології випромінень

Захист відбудеться *«15» березня 2017 року о 16.30* годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.09 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 6-52.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий *«14» лютого 2017 р.*

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.051.09

О. Г. Толстолузька

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дозиметрія іонізуючого випромінювання потребує підвищення інформативності результатів обробки вимірювань, виконаних з використанням обладнання, стандартного для радіаційних технологій. Однією з проблем дозиметрії електронних пучків в радіаційних технологіях є визначення характеристик енергії електронів. Методи, які використовуються сьогодні в радіаційних центрах, базуються на вимірюванні глибинного розподілу дози за допомогою дозиметричного клина або стека і, за результатами вимірювань, визначення просторових характеристик розподілу дози електронного випромінювання таких як практичний пробіг електронів R_p і глибина половинного зменшення дози в мішені R_{50} . За значеннями просторових характеристик розподілу дози, на основі емпіричних формул розраховують значення характеристик енергії електронного пучка, таких як найбільш ймовірна енергія E_p і середня енергія E_{av} електронів. У міжнародних стандартах наведено формальні процедури визначення просторових характеристик розподілу дози. Однак результати вимірювань глибинного розподілу дози являють собою набори дискретних даних і, внаслідок цього, формальні процедури потребують вирішення некоректних математичних задач. Для отримання квазірішень цих задач використовують різні методи і види функцій для апроксимації результатів вимірювань.

Дослідження в області обчислювальних методів дозиметрії активно ведуться в усіх державах миру з високим рівнем наукоємних технологій. В цієї області активно працювали: Акерман А. Ф., Кольчужкин А. М., Севастьянов О. А., Уваров В. Л., Хісамутдінов А. I. Baró J., Barradas N. P., Berger M. J., Fuochi P. G., Habbbleib J. A., Kovács A., Li M. M., Lisanti T. F., Mehta K., Mittedorfer J., Rogers D. W. O., Saylor M. C., Tabata T., Vierra A., Weiss D. E., Це далеко не повний список розробників методів й засобів комп'ютерного моделювання процесів взаємодії випромінювання з речовиною, які направили свої зусилля на рішення практичних задач дозиметрії.

Відзначимо, що збільшення інформативності обчислювальних методів спирається на використання фізичних закономірностей в алгоритмах обчислень. У зв'язку з цим становить інтерес метод обробки результатів вимірювань глибинних розподілів дози, що запропонований В.Т. Лазуриком, на основі підгонки параметрів напівемпіричної моделі поглинання енергії електронів у мішені.

У дисертаційній роботі розробка обчислювальних методів обробки результатів вимірювань глибинних розподілів дози електронного випромінювання проводиться на основі використання напівемпіричних моделей процесу формування просторових розподілів енергії електронів, переданої речовині мішені. Такий підхід дозволяє в обчислювальних методах врахувати закономірності фізичних процесів і, отже, істотно підвищити точність та інформативність результатів обробки вимірювань, що важливо як для розвитку спеціалізованих обчислювальних методів, так і для дозиметричного контролю в радіаційних технологіях. Тому, тема досліджень цієї дисертації, що спрямована на вирішення важливої науково-практичної задачі вдосконалення методів комп'ютерного моделювання процесу дозиметрії електронного випромінювання та розвиток обчислювальних методів обробки

глибинних розподілів дози електронного випромінювання, які були виміряні на стандартному дозиметричному обладнанні, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами. Обраний у дисертаційній роботі напрямок досліджень є частиною наукових робіт, які проводяться в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна у рамках завдань НДР МОН України, і пов'язаний з виконанням таких тем досліджень як: «Математичне та комп'ютерне моделювання інформаційних процесів в складних природних та технічних системах» (номер державної реєстрації 0112U002098, термін виконання: 2012 – 2014 рр.), «Розробка методик зменшення дозових навантажень при поводженні та зберіганні радіоактивних відходів на території АЕС» (номер державної реєстрації 0115U000496, термін виконання: 2015 – 2016 рр.), «Моделі інформаційних процесів та методи їх обробки» (номер державної реєстрації 0116U003141, термін виконання: 2016 – 2020 рр.) в яких здобувач розробляв обчислювальні методи для обробки результатів вимірювання.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення інформативності та точності обчислювальних методів обробки результатів вимірювань, проведених з використанням стандартного для радіаційних технологій дозиметричного обладнання.

Для досягнення мети потрібно було виконати наступні завдання:

1. Розробка математичних моделей, щодо процесу визначення характеристик енергії електронів на основі обробки вимірювань глибинних розподілів дози електронного випромінювання, виконаних на стандартному дозиметричному обладнанні.
2. Розвиток методів чисельного диференціювання глибинних розподілів дози електронного випромінювання на базі напівемпіричної моделі поглинання енергії електронів, щодо підвищення інформативності математичної обробки результатів вимірювань, які проводяться на стандартному дозиметричному обладнанні;
3. Аналіз невизначеності характеристик енергії електронного випромінювання, одержуваних на основі методів чисельного диференціювання глибинних розподілів дози електронного випромінювання та формування критеріїв оптимального вибору обчислювального методу обробки результатів вимірювань.
4. Проведення серій комп'ютерних експериментів, та на їх основі статистичні оцінки випадкової похибки методів визначення просторових характеристик глибинних розподілів дози електронного випромінювання.
5. Апробація розвинених обчислювальних методів на вимірюваннях, виконаних на радіаційно-технологічних лініях стерилізаційного центру, та формування рекомендацій по дозиметрії електронного випромінювання високих енергій у радіаційних технологіях.

Об'єктом дослідження є процес дозиметрії електронного випромінювання високих енергій в радіаційних технологіях.

Предметом дослідження є обчислювальні методи обробки глибинних розподілів дози електронного випромінювання, що були виміряні стандартними методами за допомогою дозиметричного клина або стека.

Методи дослідження. Комп'ютерне моделювання методом Монте-Карло проходження електронів в речовині з використанням детальної фізичної моделі –

для проведення серій комп'ютерних експериментів, результати яких дозволяють порівняти точності обчислювальних методів; формалізація емпіричних закономірностей фізичних процесів взаємодії електронів з речовиною мішені – для одержання математичних співвідношень, котрі дозволяють розроблювати нові методи чисельного диференціювання розподілів дози електронного випромінювання; апроксимація наборів даних – для одержання емпіричних формул, які необхідні при розробці обчислювальних методів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- *уперше* запропоновано показник похибки емпіричних формул, які зв'язують характеристики енергії електронів з просторовими характеристиками глибинних розподілів дози. Показник дозволяє розраховувати похибки значень енергії електронів та на їх основі зробити оптимальний, з точки зору точності обробки результатів вимірювань, вибір емпіричних формул, наведених у міжнародних стандартах з дозиметрії електронного випромінювання;

- *уперше* розроблено метод чисельного диференціювання глибинних розподілів дози на базі напівемпіричної моделі поглинання енергії електронів, який дозволяє коректно та з задовільною точністю апроксимувати першу похідну від глибинних розподілів дози електронного випромінювання. Це підвищує інформативність математичної обробки вимірювань, які проводяться на стандартному, для радіаційних технологій, дозиметричному обладнанні;

- *уперше* запропоновано математичну модель, щодо калібрувальної симетрії глибинних розподілів дози високоенергетичного електронного випромінювання та отримано напівемпіричні співвідношення зв'язку похідної дози по енергії електронів з похідною дози по глибині в мішені. Це дозволило розробити новий обчислювальний метод чисельного диференціювання розподілів дози по енергії електронів, який враховує особливості реального радіаційно-технологічного процесу;

- *удосконалено* обчислювальний метод обробки результатів дозиметричних вимірювань, за рахунок використання отриманих емпіричних формул, що дозволяє визначати стандартні характеристики глибинних розподілів дози з малою відносною похибкою (<2%).

Практичне значення отриманих результатів. На основі теоретичних результатів дисертаційної роботи, здобувачем розроблені обчислювальні методи дозиметрії високоенергетичного електронного випромінювання, придатного до використання в радіаційно-технологічних центрах:

- Метод оцінки невизначеності результатів відновлення характеристик енергії електронів, отриманих стандартними методами дозиметрії електронного випромінювання, на основі введеного показника похибки емпіричних формул. Показано, що контроль процесу опромінення має проводитись з урахуванням величини відносної невизначеності результатів відновлення енергії електронного випромінювання, так як може перевищувати декілька відсотків.

- Удосконалений метод визначення стандартних характеристик глибинних розподілів дози на основі параметричної підгонки напівемпіричної моделі до результатів вимірювань. Емпіричні формули, що отримані у цьому методі,

забезпечують мінімальну похибку зв'язку просторових характеристик розподілів дози з характеристиками енергії електронного випромінювання.

- Метод чисельного диференціювання розподілів дози по енергії електронів на основі зв'язку похідної дози по енергії електронів з похідною дози по глибині в мішені. Метод дозволяє коректно оцінювати допустимі зміни енергії електронів у радіаційно-технологічному процесі.

Проведено апробацію цих обчислювальних методів дозиметрії на результатах вимірювань, виконаних на радіаційно-технологічних лініях стерилізаційного центру інституту ядерної хімії та технологій (INCT) у Варшаві, Польща.

Результати роботи використані в навчальному процесі кафедри моделювання систем і технологій факультету комп'ютерних наук Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна в дисциплінах «Методологія наукових досліджень і обробка даних», «Системи обробки наукових даних» та «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»

Особистий внесок здобувача. Здобувач приймав участь у виконанні усіх досліджень, викладених в оригінальній частині дисертації, і в опублікованих у співавторстві наукових працях: в [1] виконав серію комп'ютерних експериментів, отримав емпіричні формули та провів апробацію PFSEM методу дозиметрії на результатах вимірювань, виконаних на радіаційно-технологічних лініях стерилізаційного центру; у [2] запропонував показник похибки емпіричних формул, що дозволило виявити причини відмінностей емпіричних формул, наведених у міжнародних стандартах з дозиметрії електронного випромінювання, також встановив, що напівемпірична модель поглинання енергії електронів дозволяє з задовільною точністю апроксимувати першу похідну глибинних розподілів дози електронного випромінювання; у [3] запропонував програмне забезпечення щодо зберігання та статистичної обробки результатів моделювання тестових прикладів вимірювань, які проводяться з використанням стандартного дозиметричного обладнання; у [4] виконав серію комп'ютерних експериментів, на яких провів порівняння точності обчислювальних методів визначення практичного пробігу електронів; у [5] формалізував калібрувальну симетрію глибинних розподілів дози та запропонував метод чисельного диференціювання розподілів дози по енергії електронів; у [6] провів порівняння похибок обчислювальних методів при обробці експериментальних даних та сформулював рекомендації щодо використання цих методів; у [7] запропонував програмні сервіси, які реалізують алгоритми розвинених у дисертації обчислювальних методів; у [12] на основі запропонованого методу чисельного диференціювання розподілів дози по енергії електронів провів оцінки допустимих змін енергії електронів в процесі опромінення.

Здобувач брав участь в обговоренні та тлумаченні результатів, обробляв експериментальні дані, готував ілюстративний матеріал для публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та одержали позитивну оцінку на таких науково-технічних конференціях: I Всеукраїнська науково-технічна конференція «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» (Житомир - 2015 р.); Науково-технічна конференція «Інформатика, Математика, Автоматика ІМА::2015» (Суми – 2015 р.); VIII Міжнародна науково-технічна конференція

«Інформаційно-комп'ютерні технології» (Житомир – 2016 р.); Всеукраїнська науково-практична інтернет- конференція «Сучасні методи, інформаційне та програмне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами» (Луцьк – 2016 р.); Міжнародна наук.-техн. конференція «Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях» (Харків – 2016 р.); Четверта міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні системи і технології» (Суми – 2016 р.); XVII Міжнародна Конференція по Математичному Моделюванню МКММ 2016 (Херсон – 2016 р.).

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 13 наукових праць, 7 у наукових фахових виданнях України з технічних наук [1–7], у тому числі 4, які входять до наукометричних баз Google Scholar, RSCI, Index Copernicus [3, 4, 6, 7], і 6 – у матеріалах та тезах доповідей фахових науково – технічних конференцій [8–13].

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний обсяг роботи складає 142 сторінки, що містять в собі 48 рисунків, 19 таблиць, список використаних джерел з 120 найменувань на 13 сторінках та два додатки на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дисертації, сформульована мета, задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, зв'язок роботи з науковими програмами та планами.

Перший розділ присвячено дозиметрії високоенергетичного електронного випромінювання в радіаційних технологіях. Представлено огляд радіаційних технологій на базі прискорювачів електронів. Описані методи дозиметрії високоенергетичних електронних пучків.

У **другому розділі** представлені результати порівняння емпіричних співвідношень, які зв'язують характеристики енергії електронного пучка (найбільш ймовірна енергія E_p і середня енергія E_{av} електронів) з просторовими характеристиками глибинного розподілу дози електронного випромінювання, таких як практичний пробіг R_p електронів і глибина половинного зменшення дози в мішені R_{50} , рекомендованих у різних міжнародних звітах і стандартах з методів дозиметрії високо енергетичного електронного випромінювання.

При проведенні порівнянь точності емпіричних залежностей для розподілів дози електронів в алюмінії, були виділені три групи співвідношень: група 1 - емпіричні формули наведені в ICRU Report 35; група 2 - формули у відповідності з ISO/ASTM Standard: 51649; група 3 - формули з ASTM Standard: E 1649-94.

В якості показника похибки $K_{j,i}(E)$ емпіричних формул, використовували відносне відхилення енергії електронів E , для якої взято значення просторового параметра R_i , від енергії електронів $E_j(R_i)$ яка розрахована за допомогою емпіричної формули з j -ї групи:

$$K_{j,i}(E) = [E_j(R_i(E)) - E] / E, \quad (1)$$

де: $R_i(E)$ – залежність просторового параметра з індексом i ($i = p$ для R_p та $i = 50$ для R_{50}) від енергії електронів E ; $E_j(R_i)$ – емпірична формула з групи j ($j = 1, 2, 3$) для залежності енергії електронів від просторового параметра з індексом i .

Розраховані показники похибки емпіричних формул $K_{j,i}(E)$ для набору значень енергій електронів E і просторових параметрів $R_i(E)$, наведених у ASTM Standard: E 1649-94. Як впливає з розрахунків показників похибки, відмінності в оцінці енергії електронів з використанням емпіричних формул можуть складати декілька відсотків і суттєво залежать від діапазону енергій. Відмінності емпіричних формул пов'язані з наступними чинниками: невизначеністю вибору методу і виду функції при обробці результатів вимірювань глибинного розподілу дози; невизначеністю вибору методу і функції апроксимації залежностей просторових характеристик розподілу дози від енергії електронів.

Метод визначення просторових характеристик розподілу дози на основі двохпараметричної підгонки напівемпіричної моделі до результатів вимірювань (PFSEM метод) вимагає знання залежностей $R_i^*(E)$ просторових характеристик розподілу дози від енергії електронів E в напівемпіричній моделі дози електронного випромінювання. Для отримання емпіричних формул, що описують ці залежності, виконана серія розрахунків глибинних розподілів дози в напівемпіричній моделі дози електронного випромінювання та проведено апроксимацію результатів.

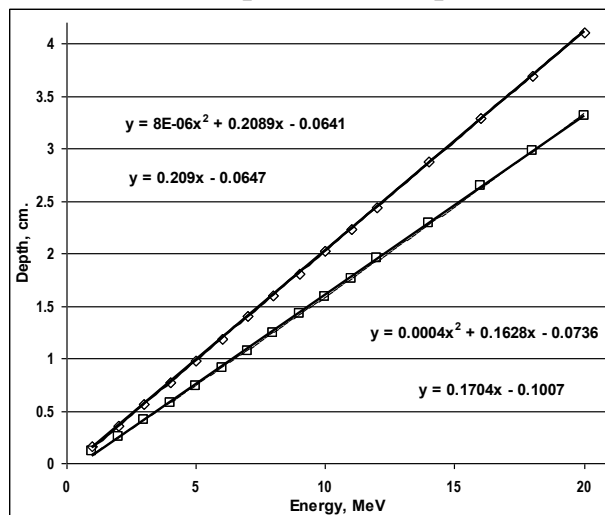


Рис. 1. Залежності $R_i^*(E)$ розподілу дози від енергії електронів E . Ромби – значення R_p^* , квадрати – значення R_{50}^* . Суцільні криві – лінійна та квадратична апроксимація даних.

Відмінність значення лінійної від квадратичної апроксимації малі, і отримані емпіричні формули (рис.1) задовільно описують залежності просторових характеристик $R_p^*(E)$ і $R_{50}^*(E)$ розподілу дози електронного випромінювання від енергії електронів E .

Проведено апробацію PFSEM методу при обробці результатів вимірювань, виконаних з використанням стандартного алюмінієвого дозиметричного клина, що опромінюється пучком електронів з лінійного прискорювача Elektronika 10/10 (INCT, Варшава). Використання PFSEM методу при обробці одного з вимірювань розподілу дози електронного випромінювання проілюстровано на рис. 2.

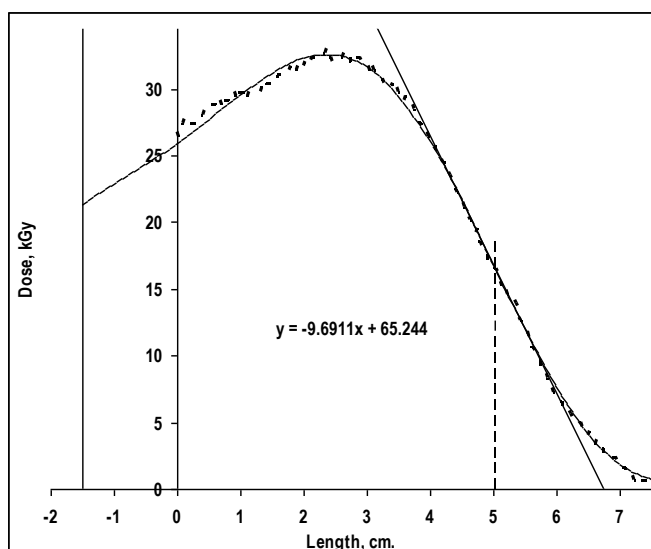


Рис. 2. Двохпараметрична підгонка результатів вимірювань. Точки – результати вимірювань. Суцільна крива – розрахунок дози в напівемпіричній моделі з підігнаними параметрами моделі.

Для визначення просторових характеристик розподілу дози R_p , R_{50} при обробці результатів вимірювань з використанням методу двохпараметричної підгонки застосовуються наступні співвідношення:

$$R_p = R_p^*(E_0) - dX, \quad R_{50} = R_{50}^*(E_0) - dX, \quad (2)$$

де E_0 , dX – значення параметрів, які визначаються PFSEM методом.

Для всіх вимірних глибинних розподілів дози, з використанням PFSEM методу, розраховані параметри $(E_0, dX)_i$ та визначено просторові характеристики $(R_p, R_{50})_i$ згідно з емпіричними формулами (2). Показано, що обробка результатів вимірювань PFSEM методом дозволяє отримати дані, за якими можна з малою похибкою (<2%) визначати характеристики розподілів дози, такі як R_p та R_{50} .

Третій розділ присвячено розробці обчислювальних методів визначення практичного пробігу електронів на основі чисельного диференціювання глибинних розподілів дози електронного випромінювання.

Формалізація процедури визначення практичного пробігу R_p , яка описана в ICRU Report 35, приводить до співвідношень:

$$D_{rad} = D(x_p) + D'(x_p) \cdot (R_p - x_p), \quad (3)$$

$$x_p = \arg \max_{x \in [R_m, R_0]} (-D'(x)),$$

де $D(x)$ і $D'(x)$ – глибинний розподіл дози електронного випромінювання і його похідна, x_p – точка максимального спадання дози в діапазоні від глибини R_m , де доза має максимальне значення, до глибини R_0 – повного пробігу електронів, D_{rad} – екстрапольоване значення дози гальмівного випромінювання.

Відзначимо, що величина x_p може бути визначена з використанням другої похідної розподілу дози $D''(x)$ з рівняння $D''(x_p) = 0$. Тому, для коректного розрахунку потрібні знання похідних глибинного розподілу дози. Результати

вимірювань глибинного розподілу дози, виконані з використанням стандартного обладнання, є набори дискретних даних. Тому, процедура визначення практичного пробігу потребує вирішення некоректної математичної задачі – диференціювання функції, заданої таблицею.

У зв'язку з цим, становить інтерес вивчення залежності відхилення величини практичного пробігу R_p від похибки визначення точки x_p . Для цього розглянуто функцію $R(x)$, яка узагальнює співвідношення (3) щодо процедури визначення практичного пробігу

$$R(x) = x - \frac{D(x) - D_{rad}}{D'(x)} \quad (4)$$

$$R'(x) = \frac{(D(x) - D_{rad}) \cdot D''(x)}{(D'(x))^2}.$$

У разі $x = x_p$, в силу $D''(x_p) = 0$, маємо $R'(x_p) = 0$, отже величина R_p є мінімальним значенням функції $R(x)$ при значенні аргументу $x = x_p$ так як $R_p = R(x_p)$. Зазначимо, що при отриманні цього висновку не використовуються які-небудь припущення щодо функції $D(x)$, тому, для всіх чисельних методів обробки результатів вимірювань глибинних розподілів дози електронного випромінювання слід очікувати слабку залежність відхилення величини практичного пробігу R_p від похибки при визначенні точки x_p .

Для оцінки можливостей методів чисельного диференціювання глибинних розподілів дози, проведено серії комп'ютерних експериментів, з використанням програмного забезпечення RT-Office. Отримано розподіли дози, які розраховано методом Монте-Карло у детальній фізичній моделі та з використанням напівемпіричної моделі поглинання енергії електронів в речовині, в мішенях з алюмінію, вуглецю, полістирену, води і деревини при опроміненні електронами з енергіями 2, 5 і 10 МеВ. Моделювання дози методом Монте-Карло виконано з відносною статистичною невизначеністю не більш ніж 10^{-4} . Результати комп'ютерних експериментів апроксимувалися методом найменших квадратів з використанням лінійної функції та поліномів 3-ї і 4-го ступеня. Вирази для першої та другої похідних від апроксимуючих функцій отримано в аналітичному вигляді.

Результати розрахунків значення дози, першої та другої похідних розподілу дози показані на рис. 3а і 3б для мішені з алюмінію, опромінюваної електронами з енергіями 10 і 5 МеВ. На рис. 3в і 3г представлені результати розрахунків для мішеней з вуглецю і полістирену, опромінюваних електронами з енергією 10 МеВ. Маркерами представлені результати, отримані на основі моделювання розподілів дози методом Монте-Карло; колами показані значення дози; ромби і трикутники – значення першої та другої похідної розподілу дози відповідно.

Безперервні криві відображають результати, отримані на основі розрахунків розподілів дози у напівемпіричної моделі; пунктирні криві – результати, отримані на основі моделювання розподілів дози методом Монте-Карло і наближення цих даних поліномами 4-го ступеня. Вертикальна пунктирна пряма зазначає точку максимального спадання дози x_p , яка визначається з рівняння $D''(x_p) = 0$. На

рисунках приведені апроксимуючі поліноми розподілів доз, які були отримані методом Монте-Карло. Напівемпірична модель і методи поліноміальної апроксимації дозволяють з задовільною точністю розраховувати значення розподілу дози та її першої похідної (рис.3).

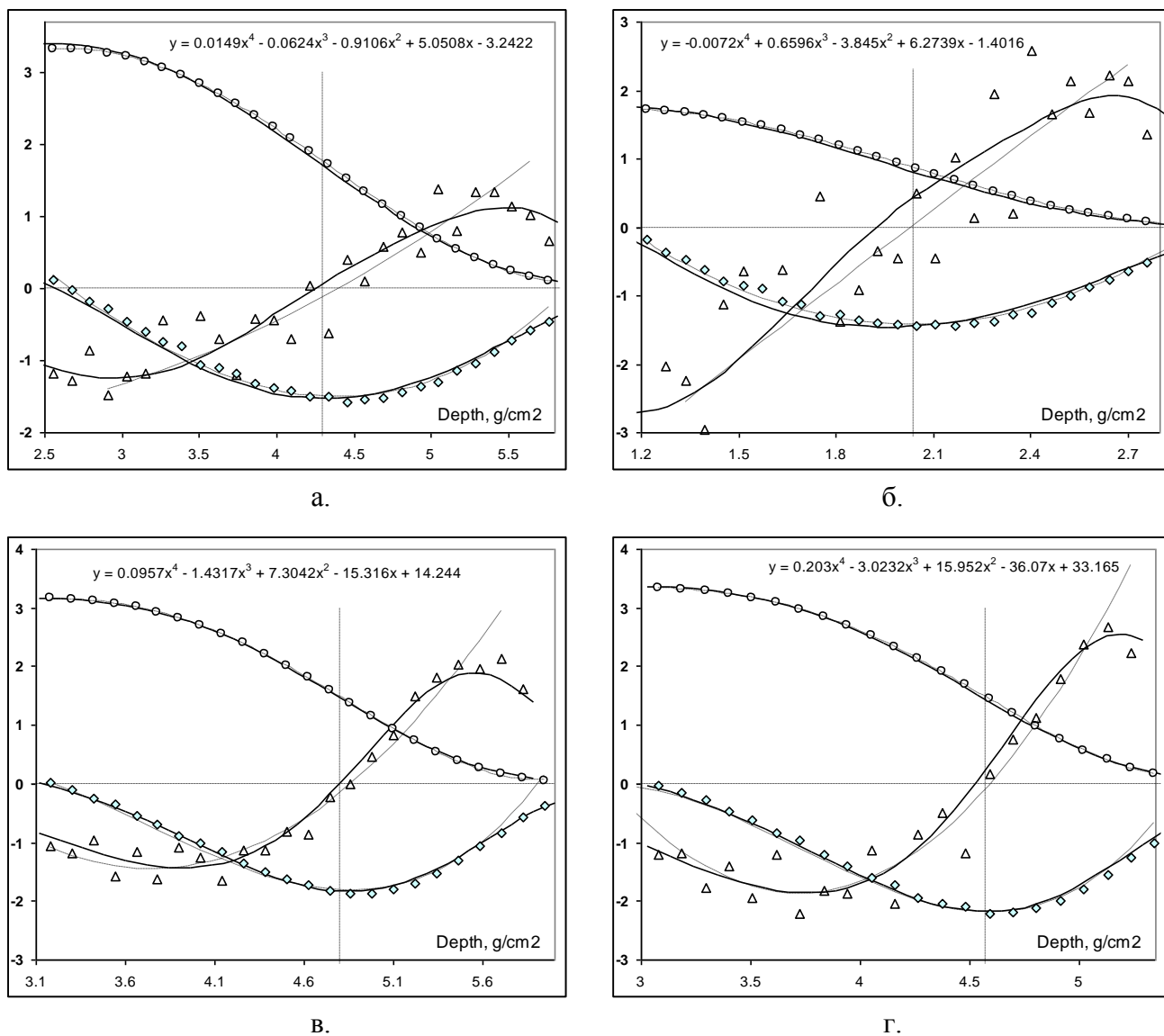


Рис. 3. Результати розрахунків дози, першої та другої похідних розподілу дози.

Проведено порівняння різних методів чисельного диференціювання розподілу дози на основі похибки результату розрахунку величини практичного пробігу, отриманого кожним з цих методів. Для цього були використані розподіли доз з малою статистичною невизначеністю, розраховані методом Монте-Карло. Обробка отриманих розподілів доз, як наборів дискретних даних, була проведена методами:

- чисельне диференціювання даних з використанням мінімальної кількості вузлів,
- підгонка параметрів напівемпіричної моделі до дискретних даних з подальшим розрахунком похідних чисельними методами,
- лінійна апроксимація даних в заданій області значень доз, або глибин в мішені,

- апроксимація дискретних даних поліномом 3-го ступеня в області глибин від точки максимуму дози до повного пробігу електронів R_0 ,
- апроксимація дискретних даних поліномом 4-го ступеня в області глибин від точки максимуму дози до повного пробігу електронів R_0 ,

Порівняння показало, що результати розрахунку величин практичного пробігу R_p мають відносно невелику невизначеність, пов'язану з використанням різних обчислювальних методів. Найбільші значення невизначеності спостерігаються для випадку алюмінієвої мішені, опромінюваної електронами з енергіями 2 і 5 MeV, при використанні методу підгонки параметрів напівемпіричної моделі. Отже, напівемпірична модель не може забезпечити рівень похибки менший 1% для широкого діапазону енергій електронного випромінювання. Використання методу лінійної апроксимації дискретних даних в обмеженій області значень приводить до систематичного завищення результатів розрахунку величини практичного пробігу R_p , що пов'язано з наявністю безумовного мінімуму в залежності $R(x)$ в точці x_p .

Четвертий розділ присвячено розробці методів визначення області допустимих значень енергії електронів на основі визначення часткової похідної за енергією електронів від розподілів дози електронного випромінювання, виміряної з використанням стандартного обладнання в промислових стерилізаційних центрах.

Досліджено можливості використання емпіричних закономірностей розподілів дози електронного випромінювання, зокрема, калібрувальної (масштабної) симетрії. На рис. 4 і 5 ілюструється калібрувальна симетрія для набору глибинних розподілів доз $D_M(x, E)$ в мішенях з вуглецю, поліетилену і алюмінію при опроміненні електронами з енергіями 3, 5, 8, 10, 12 MeV. Величина $z(x, E)$ є глибина в мішені x , нормована на екстрапольований пробіг електронів в речовині мішені $R_{ex}(E)$ [ICRU REPORT 35]. На рис. 4 для вуглецю відзначена оптимальна товщина мішені R_{opt} (точка, в якій величина дози дорівнює значенню дози на передній межі мішені) при односторонньому опроміненні і глибина розташування критичної точки X_c (точка, в якій величина дози дорівнює половині значення дози на передній межі мішені) при двосторонньому опроміненні.

Область значень $z(x, E)$, в якій спостерігається калібрувальна симетрія, має малий розмір (від 0.8 до 1.0), однак, зміна величини дози в цій області велика. Відносне положення критичних точок R_{opt} і X_c (точки перетину розподілу доз з горизонтальними прямими) для різних матеріалів і енергій електронів змінюються слабо (рис. 4, 5).

Для області глибин x , в якій спостерігається калібрувальна симетрія розподілів дози $D_M(x, E)$, будемо вважати справедливими наступні тотожності:

$$D_M(x, E) \equiv D_M^*(z(E)), \quad z(E) \equiv x/R_{ex}(E), \quad (5)$$

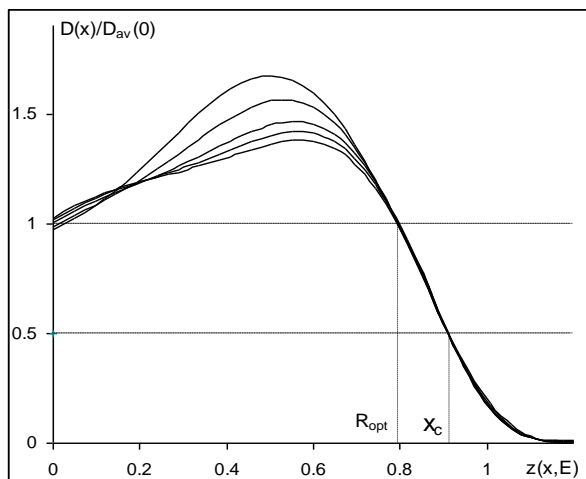


Рис. 4. Глибинні розподіли доз пучків електронів з енергіями 3, 5, 8, 10, 12 MeV в мішені з вуглецю.

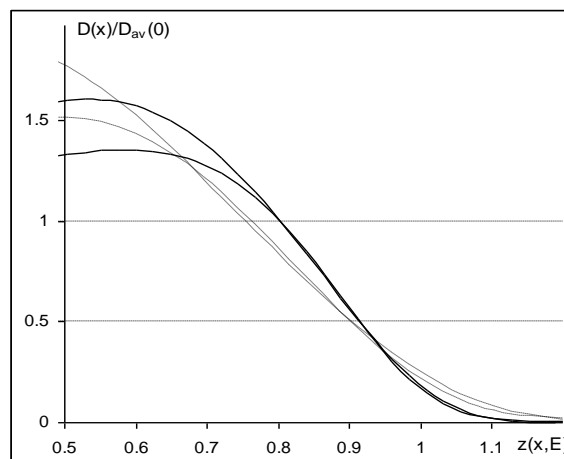


Рис. 5. Глибинні розподіли доз електронів з енергіями 3 і 12 MeV в мішені з поліетилену (суцільні криві) і алюмінію (пунктирні криві).

У цьому припущенні, часткові похідні розподілу дози за енергією і за глибиною можуть бути представлені у вигляді:

$$\frac{\partial D_M(x, E)}{\partial E} = \frac{-x}{R_{ex}^2(E)} \cdot \frac{\partial D_M^*(z)}{\partial z} \cdot \frac{\partial R_{ex}(E)}{\partial E}$$

$$\frac{\partial D_M(x, E)}{\partial x} = \frac{1}{R_{ex}(E)} \cdot \frac{\partial D_M^*(z)}{\partial z}$$

Звідки випливає співвідношення між частковими похідними розподілу дози

$$\frac{\partial D_M(x, E)}{\partial E} = -z(E) \cdot \frac{\partial R_{ex}(E)}{\partial E} \cdot \frac{\partial D_M(x, E)}{\partial x} \quad (6)$$

Співвідношення (6) представляє практичний інтерес тому, що дозволяє розрахувати часткову похідну дози за енергією електрона на основі результатів вимірювань, виконаних за допомогою дозиметричного клину.

Для перевірки одержаного співвідношення (6) були проведені розрахунки методом Монте-Карло розподілів дози $D_M(x, E)$ в мішенях з поліетилену, вуглецю, води, тефлону, дерева та алюмінію при опроміненні пучками електронів з різними енергіями з двох наборів – (4.95, 5, 5.05) і (9.9, 10, 10.1) MeV. Результати розрахунків, отримані з малою статистичною похибкою (<0.03%) для мішені з поліетилену, опромінюваної електронами з енергією 5 і 10 MeV, як приклад, наведені на рис. 6 і 7 відповідно. Точки – значення часткових похідних дози за енергією електронів, розраховані за результатами моделювання дози $D_M(x, E)$ методом Монте-Карло. Незаповнені кола – результати чисельного диференціювання набору дискретних даних по енергії електронів. Заповнені кола – результати, отримані на основі чисельного диференціювання розподілів дози за глибиною і використання співвідношення (6) між частковими похідними. Суцільні криві – похідні дози за енергією електронів, отримані на основі напівемпіричної моделі дози електронів.

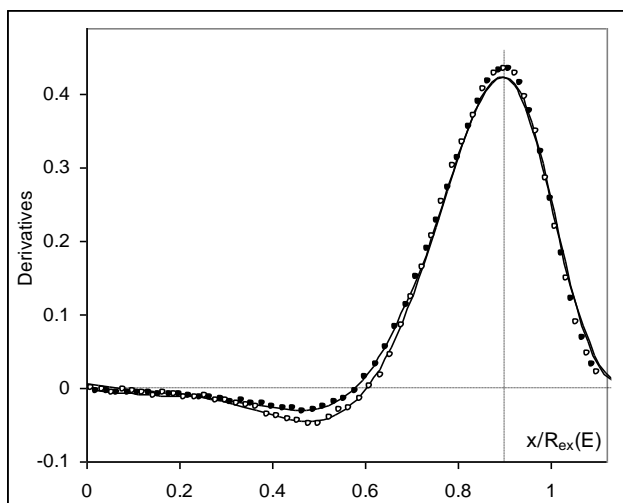


Рис. 6. Похідні дози за енергією електронів у поліетиленовій мішені, енергія опромінювання 10 MeV

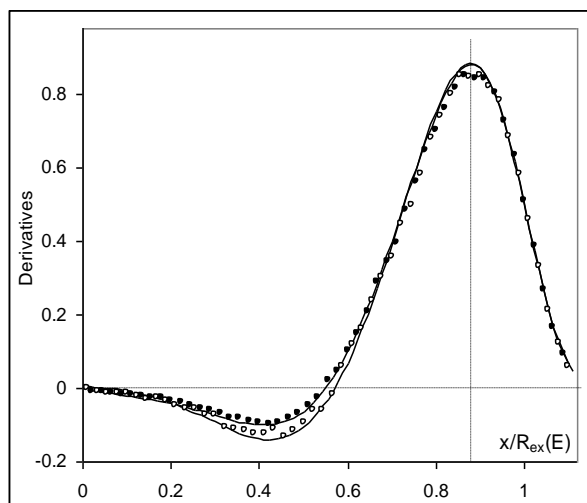


Рис. 7. Похідні дози за енергією електронів у поліетиленовій мішені, енергія опромінювання 5 MeV

Істотні відмінності в результатах, отриманих різними методами, спостерігаються лише в області порушення калібрувальної симетрії глибинних розподілів доз, тобто для глибин $x < 0.6 \cdot R_{ex}(E)$ (рис. 6, 7).

Для області глибин x , в якій спостерігається калібрувальна симетрія, з тотожності (5) маємо:

$$\frac{\partial D_M(x, E)}{\partial E} \equiv \frac{-z(x, E)}{R_{ex}(E)} \cdot \frac{dR_{ex}(E)}{dE} \cdot \frac{dD_M^*(z)}{dz}. \quad (7)$$

У випадку лінійної залежності екстрапольованого пробігу від енергії електронів, співвідношення (7) буде мати вигляд:

$$\frac{\partial D_M(x, E)}{\partial E} \equiv \frac{-z(x, E) \cdot A_M}{A_M \cdot E + B_M} \cdot \frac{dD_M^*(z)}{dz}, \quad (8)$$

де A_M і B_M – коефіцієнти лінійної апроксимації $R_{ex}(E) = A_M \cdot E + B_M$.

Значення величини

$$\eta_M(x, E) = E \cdot \partial D_M(x, E) / \partial E \quad (9)$$

слабо залежить від енергії електронів тому, що внесок величини B_M в області енергій електронів від 5 до 10 MeV не великий для всіх розглянутих речовин.

Слабка залежність $\eta_M(x, E)$ від E була перевірена в чисельних експериментах з використанням напівемпіричної моделі поглинання енергії електронів та чисельного диференціювання даних, отриманих методом Монте-Карло. Деякі результати розрахунків величини $\eta_M(x, E)$ для мішеней з поліетилену і алюмінію, опромінюваних електронами різних енергій показані на рис.8. На рисунку окремі точки – результати чисельного диференціювання даних, отриманих методом Монте-Карло. Таким чином, введена величина $\eta_M(x, E)$ буде корисною при плануванні процесу радіаційної стерилізації.

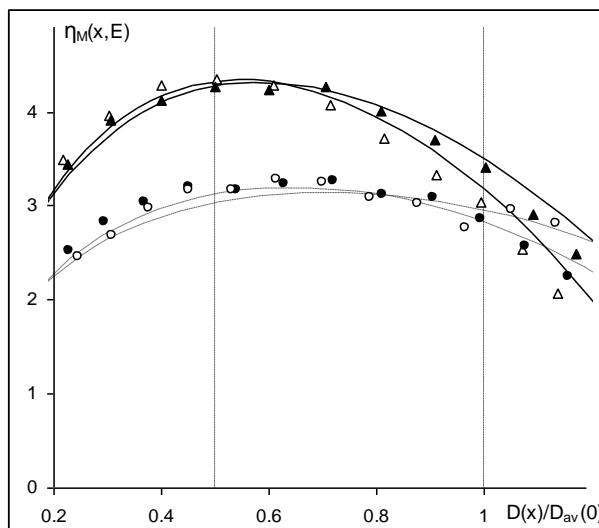


Рис. 8. Величини $\eta_M(x, E)$, в алюмінієвій (пунктирні криві) та поліетиленовій (суцільні криві) мішенях, опромінованих електронами з енергією 5 і 10 МеВ. Окремі точки – результати чисельного диференціювання даних, отриманих методом Монте-Карло.

Допустимі відносні зміни енергії електрона $\Delta E_M(E)/E$ визначаються відносною похибкою вимірювань дози $\Delta D_M(z_c)/D_M(0, E)$ у критичних точках z_c і можуть бути представлені у вигляді:

$$\frac{\Delta E_M(E)}{E_e} = \frac{1}{\eta_M(z_c, E)} \frac{\Delta D_M(z_c)}{D_M(0, E)}, \quad (10)$$

де $-D_M(0, E)$ величина дози на передній межі мішені $z=0$ при опроміненні електронами з енергією E . Зазначимо, що при плануванні процесів радіаційної стерилізації, як правило, вважають значення дози на передній межі об'єкта опромінення величиною стерилізаційної дози $D_M(0, E) = D_{st}$.

Таким чином, співвідношення (10) дозволяє оцінювати допустимі зміни енергії електронів в процесі радіаційної стерилізації. Так, наприклад, у разі одностороннього опромінення поліетилену в оптимальному режимі, коли $D_M(R_{opt})/D_{st} = 1$ згідно з даними, наведеними на рис. 8, маємо $\eta_M(R_{opt}, E) \approx 3.2$. У цьому випадку для випадкової похибки вимірювання дози $\Delta D_M(R_{opt})/D_{st} = 5\%$, згідно з (10), межа допустимих змін енергії електронів $\Delta E_M(E)/E$ не повинна перевищувати 1.6%. У разі двостороннього опромінення поліетилену в оптимальному режимі $D_M(x_c)/D_{st} = 0.5$, оцінка дає $\eta_M(x_c, E) \approx 4.3$ і для $\Delta D_M(x_c)/D_{st} = 5\%$ отримуємо $\Delta E_M(E)/E \leq 1.1\%$. Оцінки для мішеней з матеріалів з істотно більшими ефективними атомними номерами, ніж у поліетилену, наприклад, алюмінію, дають межу допустимих змін енергії електронів близькою до 1.7%.

Наведені вище чисельні оцінки меж допустимих змін енергії електронів показують, що контроль енергії електронів в процесі радіаційної стерилізації не можливий без обчислювальних методів, які забезпечують точність визначення величини енергії електронів не гірше одного відсотка.

У п'ятому розділі представлені результати досліджень стійкості обчислювальних методів до величини випадкової складової похибки оброблених даних. Для порівняння методів обробки результатів вимірювань був використаний набір тестових глибинних розподілів дози в алюмінієвій мішені, що опромінювалась електронами з енергією 10 МеВ. Розподіли дози були одержані моделюванням методом Монте-Карло з використанням 50 просторових інтервалів від межі мішені до повного пробігу електрона R_0 та 10^3 траєкторій електронів. У 26 комп'ютерних експериментах відносна статистична похибка результатів моделювання була на рівні 4 %, що порівняно з величинами похибок результатів вимірювань.

Проведена статистична оцінка щільності ймовірності випадкових відхилень дози в наборі тестових розподілів дози. Величини відхилень дози для кожної глибини нормувалися на значення середньоквадратичного відхилення дози на цій глибині. Результати статистичної оцінки показують, що розподіл відхилень дози в тестовому наборі можна вважати нормальним розподілом ймовірності.

Для проведення порівняння були обрані наступні методи обробки результатів вимірювань: лінійна апроксимація глибинного розподілу дози в обмеженій області значень доз; апроксимація глибинного розподілу дози в обмеженій області значень доз з використанням поліномів 4-го ступеня; параметрична підгонка напівемпіричної моделі до глибинного розподілу дози.

При порівнянні методів вибиралися набори значень доз з різних областей з симетричними межами щодо величини дози $D(x_p)$ в точці перегину x_p глибинного розподілу дози. На основі чисельних досліджень показано, що для алюмінієвої мішені, опромінюваної електронами з енергією 10 МеВ, можна вважати

$$K_p = \frac{D(x_p)}{D_{\max}} \approx 0.50, \quad \text{де } D_{\max} = \max_{x \in [R_m, R_0]} (D(x)).$$

Результати порівняння показують, що середні значення величин практичного пробігу, отримані різними обчислювальними методами, задовільно узгоджуються в межах середньоквадратичних відхилень. Однак, порівняння значень коефіцієнтів впливу випадкової похибки оброблених даних на результати обробки, дозволяє обґрунтовано рекомендувати метод двохпараметричної підгонки напівемпіричної моделі для дозиметрії електронного випромінювання в радіаційних технологіях.

Апробація методів чисельного диференціювання глибинного розподілу дози електронного випромінювання виконувалась на основі результатів вимірювань, виконаних з використанням стандартного алюмінієвого дозиметричного клина, що опромінюється пучком електронів з лінійного прискорювача Elektronika 10/10 (INCT, Варшава).

На рис. 9 представлені результати чисельного диференціювання глибинних розподілів дози, отримані з використанням методів апроксимації результатів вимірювань поліномами 4-го ступеня у «широкій» - (рис. 9а, 9б) і «вузькій» - (рис. 9в, 9г) областях глибин та підгонкою параметрів напівемпіричної моделі. Глибинні розподіли дози отримані в одному вимірюванні наведені на рис. 9б, 9г. Результати, отримані осередненням трьох вимірювань, проведених під час роботи радіаційно-технологічної установки, наведені на рис. 9а, 9в.

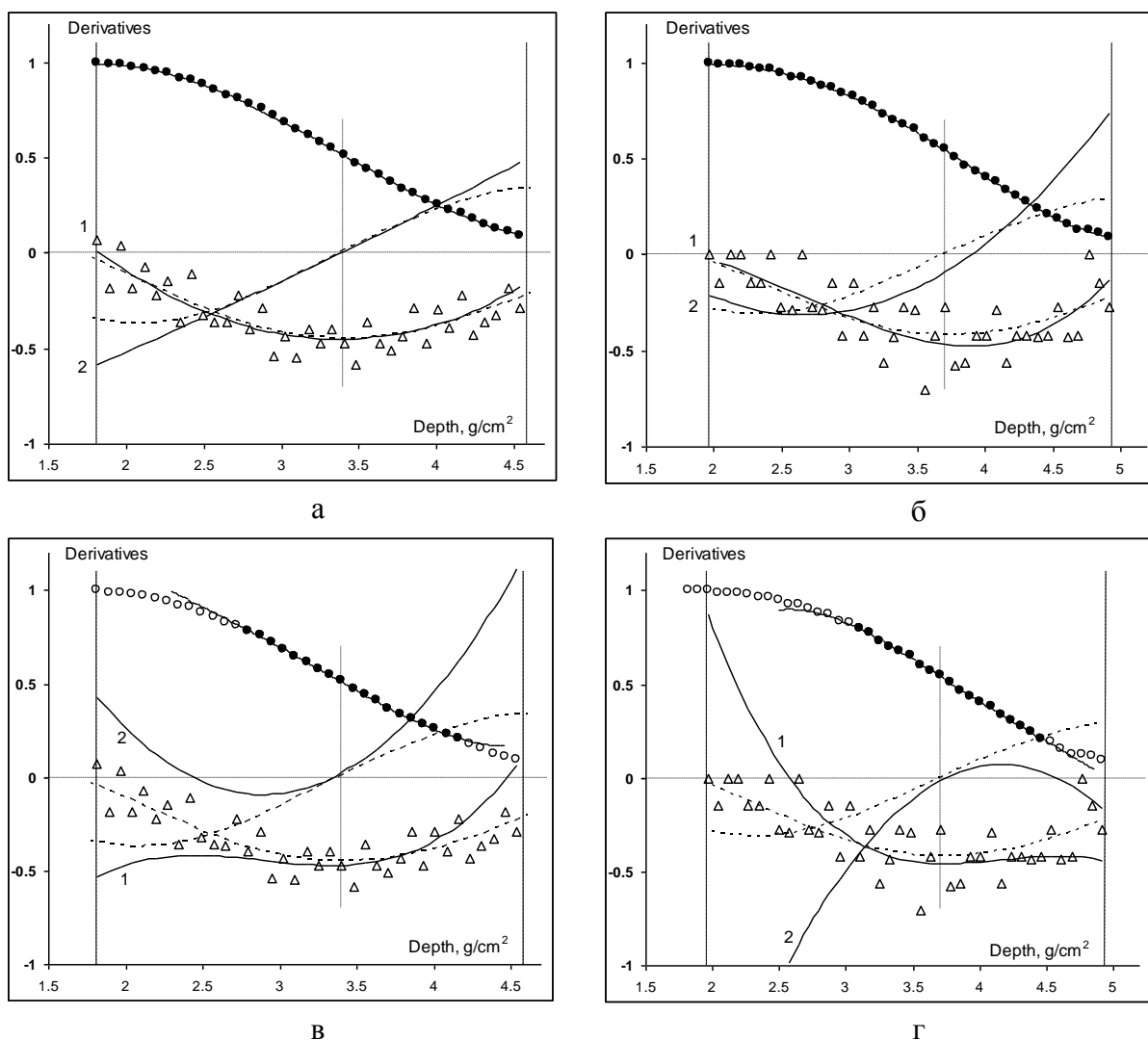


Рис. 9. Результати чисельного диференціювання глибинних розподілів дози, отримані різними методами обробки вимірювань. Заповнені кола – вимірювання, вибрані для апроксимації. Крива, що проходить через заповнені кола – апроксимація результатів вимірювань. Суцільні криві 1 і 2 – перша і друга похідні розподілів дози, розраховані на основі поліноміальної апроксимації. Пунктирні криві - перша і друга похідні дози, розраховані на основі параметричної підгонки напівемпіричної моделі.

Рисунки ілюструють наступні висновки:

- Методи параметричної підгонки напівемпіричної моделі та апроксимації даних поліномом 4-го ступеня в широкій області глибин, є методами чисельного диференціювання розподілу дози, стійкими до випадкової складової похибки оброблюваних даних. Це підтверджує рекомендації, які було сформульовано на основі чисельних експериментів, щодо вибору методів обробки результатів вимірювань для визначення характеристик енергії електронів.
- Методи поліноміальної апроксимації результатів вимірювань у вузькій області глибин, де спостерігається близьке до лінійного спадання глибинного розподілу дози, є не стійкими до випадкової складової похибки оброблюваних даних. Зокрема, цей висновок відноситься до добре відомого методу визначення практичного пробігу електронів на основі апроксимації поліномом 4-го ступеня.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу вдосконалення методів математичного моделювання процесу дозиметрії електронного випромінювання і розвитку обчислювальних методів обробки вимірювань глибинних розподілів дози за рахунок використання напівемпіричних моделей процесу формування розподілів дози електронного випромінювання.

До основних наукових результатів належать такі:

1. Запропоновано показник похибки емпіричних формул, що зв'язують характеристики енергії електронів з просторовими характеристиками глибинних розподілів доз, та встановлено причини відмінностей результатів дозиметрії високоенергетичного електронного випромінювання, отриманих з використанням різних формул, наведених у міжнародних стандартах з дозиметрії електронів.

2. Аналіз процесу дозиметрії електронного випромінювання в радіаційних технологіях показав, що істотне зменшення похибки визначення характеристик енергії електронів можна досягти встановивши відповідність між використовуваним методом апроксимації результатів вимірювань розподілів дози та емпіричними формулами для розрахунку енергії електронів.

3. Встановлено відповідність PFSEM методу апроксимації результатів вимірювань з емпіричними формулами, які отримано на базі серії комп'ютерних експериментів з використанням напівемпіричної моделі розподілів дози.

4. Апробація методу дозиметрії з використанням отриманих емпіричних формул та PFSEM методу апроксимації результатів вимірювань, виконаних на радіаційно-технологічних лініях стерилізаційного центру, показала, що розвинутий метод дозиметрії дозволяє значення практичного пробігу електронів R_p і глибини половинного зменшення дози R_{50} визначати з малою відносною похибкою (<2%).

5. Розвинуто математичну модель процесу визначення характеристик енергії електронів та встановлено, що стандартна процедура визначення практичного пробігу електронів R_p еквівалентна процедурі знаходження мінімального значення R_p , що пояснює спостережувані завищення значень практичного пробігу, отриманих з використанням лінійної апроксимації результатів вимірювань.

6. Розроблено метод чисельного диференціювання глибинних розподілів дози на базі напівемпіричної моделі поглинання енергії електронів, який дозволяє коректно та з задовільною точністю апроксимувати першу похідну від глибинних розподілів дози електронного випромінювання. Цей обчислювальний метод підвищує інформативність результатів вимірювань, які проводяться на стандартному дозиметричному обладнанні;.

7. Розвинуто математичну модель, щодо калібрувальної симетрії глибинних розподілів дози високоенергетичного електронного випромінювання та отримано напівемпіричні співвідношення зв'язку похідної дози по енергії електронів з похідною дози по глибині в мішені. Це дає змогу у обчислювальних методах враховувати особливості реального радіаційно-технологічного процесу;

8. Розроблено новий обчислювальний метод чисельного диференціювання розподілів дози по енергії електронів, який підвищує інформативність результатів

вимірювань, проведених на стандартному дозиметричному обладнанні радіаційно-технологічних ліній.

9. Розроблене програмне забезпечення зберігання та статистичної обробки розрахункових і експериментальних тестових даних. Проведено порівняння точності обчислювальних методів визначення практичного пробігу електронів та сформульовані рекомендації щодо використання цих методів у дозиметрії електронного випромінювання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Lazurik V.T. Determination of the standard characteristics of depth-dose distributions on the base of semiempirical model of electrons energy deposition / V. T. Lazurik, G. F. Popov, Z. Zimek, R.V. Lazurik, Sawan Salah Ibrahim // *East European Journal of Physics*. – 2015. – Vol.2. – No.4. – P. 45–51.

2. Lazurik V.T. Evaluation of accuracy of the methods for obtaining spatial characteristics of electron radiation depth-dose distribution / V. T. Lazurik, G. F. Popov, Sawan Salah, Z. Zimek // *Bulletin of V. Karazin Kharkiv National University*, – 2015. – Series «Mathematical Modelling. Information Technology. Automated Control Systems», Issue 28. – P. 126–139.

3. Лазурик В. М. Подготовка эталонных наборов данных для оценки неопределенности методов компьютерной дозиметрии электронного излучения / В. М. Лазурик, Саван Салах, Р. В. Лазурик, А. В. Починок // *Системы обработки информации*. – 2016. – № 2(139). – С. 35–39.

4. Lazurik V.T. Comparison of the methods of processing the results of depth dose distribution measurements initiated by electron beam / V. T. Lazurik, G. F. Popov, Z. Zimek, R. V. Lazurik, Sawan Salah // *Information Processing Systems*. – 2016. – № 3(140). – С. 82-87.

5. Lazurik V. T. Methods of calculating the partial derivatives of the electron radiation dose which is measured with dosimetric wedge / V. T. Lazurik, G. F. Popov, Sawan Salah, Z. Zimek // *Bulletin of V. Karazin Kharkiv National University*, – 2016. – Series «Mathematical Modelling. Information Technology. Automated Control Systems», Issue 30. – P. 59–68.

6. Lazurik V. T. Approbation methods of numerical differentiation the depth dose distribution measured with application dosimetry wedge method / V. T. Lazurik, G. F. Popov, Sawan Salah, Z. Zimek // *VISNYK of Kherson National Technical University* – 2016. – 3(58). – P. 357–360.

7. Лазурик В. М. Программная реализация определения энергии электронов по экспериментальным данным, полученным методом дозиметрического клина / В. М. Лазурик, Ю. А. Шаптала, Салах Саван // *ВЕСТНИК Херсонского национального технического университета* – 2016. – № 3(58). – С. 245–248.

8. Popov G. F. Dependences between parameters of various models of electron beams / Popov G. F., Salah Sawan, Lazurik R.V // *Тези І Всеукраїнської науково-технічної конференції «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» (17–18 травня 2015 р.)*. – Житомир : ЖДТУ, 2015 – С. 23–24.

9. Popov G. F. Verification of two-parametric fitting method for determination of electron beam characteristics / Popov G. F., Salah Sawan, Lazurik R. V // *Матеріали та*

програма науково-технічної конференції «Інформатика, Математика, Автоматика ІМА::2015» (20–25 квітня 2015 р.). – Суми : СДУ, 2015 – С. 203.

10. Popov G. F. Uncertainty of the methods of numerical differentiation of depth dose distributions of electron radiation / Popov G. F., Sawan S. I., Shaptala Ju. A., Lazurik R. V. // Тези VIII Міжнародної наук.-техн. конф. «Інформаційно-комп'ютерні технології» (22–23 квітня 2016 р.). – Житомир : ЖДТУ, 2016 – С. 89–90.

11. Popov G. F. The Use of Semiempirical Models into Computational Dosimetry of Electron Beams / Popov G. F., Sawan S. I., Lazurik R. V., Pochynok A. V. // Тези Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Сучасні методи, інформаційне та програмне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами» (11 травня 2016 р.). – Луцьк : РВВ Луцького НТУ, 2016 – С. 65–66.

12. Lazurik V. T. Estimation of the allowable energy spread of electrons beam in radiation sterilization / Lazurik V. T., Popov G. F., Sawan Salah, Zimek Z. // Труды международной науч.-техн. конференции «Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях». (26–31 травня 2016 р.) — Харьков: ХНУ им. В.Н.Каразина, 2016 — С. 202–205.

13. Popov G. F. Selection of calculation methods for the analysis of absorbed depth-dose distributions of electron beams / G. F. Popov, S. I. Sawan, R. V. Lazurik, A. V. Pochynok. // Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні системи і технології» (25–27 травня 2016 р.). – Суми : СДУ, 2016 – С. 19–20.

АНОТАЦІЯ

Саван Салах Ібрахім А. Обчислювальні методи дозиметрії високоенергетичного електронного випромінювання у радіаційних технологіях. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2016.

Особливістю цієї роботи є використання напівемпіричних моделей глибинних розподілів дози електронного випромінювання, що дозволило врахувати фізичні закономірності і, отже, істотно підвищити інформативність і точність розвинених обчислювальних методів обробки результатів вимірювань.

Розвинуті математичні моделі, щодо емпіричних закономірностей розподілу дози високоенергетичного електронного випромінювання та отримані математичні співвідношення для розрахунку часткових похідних розподілу дози за енергією і за глибиною в мішені. На основі цих співвідношень, розроблені методи чисельного диференціювання глибинних розподілів дози, виміряних стандартними методами дозиметрії електронного випромінювання.

Проведено порівняння методів обробки вимірювань і показано, що метод, який використовує напівемпіричну модель поглинання енергії електронів для апроксимації результатів вимірювань, дозволяє з задовільною точністю розраховувати часткові похідні розподілу дози.

Запропоновано показник похибки емпіричних формул і, на його основі, проведено порівняння залежностей найбільш ймовірної енергії E_p і середньої енергії E_{Av} електронів від величин практичного пробігу R_p електронів і глибини половинного зменшення R_{50} максимального значення дози в мішені. За результатами порівняння, встановлено причини відмінностей емпіричних формул, наведених у міжнародних стандартах з дозиметрії електронного випромінювання.

Отримано емпіричні формули для обчислювального методу дозиметрії електронного випромінювання на основі параметричної підгонки напівемпіричної моделі до результатів вимірювань. Апробація методу, з використанням отриманих формул, на результатах вимірювань, виконаних на радіаційно-технологічних лініях стерилізаційного центру, показала, що метод дозволяє визначати характеристики енергії електронів E_p і E_{Av} з малою похибкою (<2%).

Ключові слова: чисельне диференціювання, напівемпірична модель, моделювання методом Монте-Карло, глибинний розподіл дози, електронне випромінювання, емпіричні формули, практичний пробіг, база тестових даних.

АННОТАЦІЯ

Саван Салах Ібрахим А. Вычислительные методы дозиметрии высокоэнергетического электронного излучения в радиационных технологиях. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2016.

Особенностью этой работы является использование полуэмпирических моделей глубинных распределений дозы электронного излучения, что позволило учесть физические закономерности и, следовательно, повысить информативность и точность развитых вычислительных методов обработки результатов измерений.

Развиты математические модели описания эмпирических закономерностей распределений дозы высокоэнергетического электронного излучения и получены математические соотношения для расчета частных производных дозы по энергии электронов и по глубине в мишени. На основе этих соотношений, разработаны методы численного дифференцирования глубинных распределений дозы, измеренных стандартными методами дозиметрии электронного излучения.

Проведено сравнение методов обработки измерений и показано, что метод, использующий полуэмпирическую модель поглощения энергии электронов для аппроксимации результатов измерений, позволяет с удовлетворительной точностью рассчитывать частные производные распределения дозы.

Предложен показатель погрешности эмпирических формул и, на его основе, проведено сравнение зависимостей наиболее вероятной энергии E_p и средней энергии E_{Av} электронов от величин практического пробега R_p электронов и глубины половинного уменьшения R_{50} максимального значения дозы в мишени. По результатам сравнения, установлены причины отличий эмпирических формул, приведенных в международных стандартах по дозиметрии электронного излучения.

Получены эмпирические формулы для вычислительного метода дозиметрии электронного излучения на основе параметрической подгонки полуэмпирической модели к результатам измерений. Апробация метода, с использованием полученных формул, на результатах измерений, выполненных на радиационно-технологических линиях стерилизационного центра, показала, что метод позволяет определять характеристики энергии электронов E_p и E_{Av} с малой погрешностью (<2%).

Ключевые слова: численное дифференцирование, полуэмпирическая модель, моделирование методом Монте-Карло, глубинное распределение дозы, электронное излучение, эмпирические формулы, практический пробег, база тестовых данных.

ABSTRACT

Sawan Salah Ibrahim A. Computational methods of dosimetry of high-energy electron radiation in radiation technology. – The manuscript.

The thesis for Candidate's of sciences Degree by speciality 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. – V. N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2016.

The peculiarity of this work is the use of semiempirical models for depth dose distributions of electron radiation, which allowed taking into account physical laws and, therefore, significantly improving the information content and accuracy of the developed computational methods of processing of measurement results.

The empirical regularities of dose distributions of high-energy electron radiation were formalized and the mathematical relations for the calculation of partial derivatives of dose with respect electron energy and depth in the target were obtained. On the basis of these relations, was developed methods for the numerical differentiation of the depth dose distributions which measured by standard methods of dosimetry of electron radiation.

Comparison of methods of processing of measurement results was performed and it is shown that the method which uses semi-empirical model of absorption of energy of the electron for approximation of measurement results with a satisfactory accuracy to calculate partial derivatives of the dose distribution. Systematic downward bias of values of the practical range of electrons, calculated using the linear approximation of the measurement results of the depth-dose distribution was explained.

The magnitude error empirical formula have been proposed and, on its basis, the comparison of the dependences of the most probable energy E_p and average energy E_{Av} from the practical range R_p and half-value depth R_{50} , were performed. The reasons for the differences between the empirical formulas given in international standards for dosimetry of electron radiation were identified and recommendations for application of these formulas were formed.

The empirical formulas for the method of dosimetry of electron radiation based on to fit parameters of the semiempirical model to the measurement results were obtained. Testing the method using the derived formulas, the results of measurements made on the radiation-technological lines sterilization center, showed that the method allows to determine the characteristics of the electron energy (E_p , E_{50}) with a small error (<2%).

Keywords: numerical differentiation, semiempirical model, simulation by Monte-Carlo method, depth-dose distribution, electron radiation, empirical formulas, practical range, database test data. two-parameter fitting.