

І. О. Гірка¹, В. Т. Лазурик¹, Є. В. Рудичев², О. О. Золотухін^{1,*}¹ *Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна*² *Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків, Україна**Відповідальний автор: oozolutukhin@karazin.ua**ВИЗНАЧЕННЯ ЕМПІРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЕЙ ГЛИБИННОГО РОЗПОДІЛУ ДОЗИ
ДЛЯ ВИПАДКІВ, КОЛИ СПЕКТР ПУЧКА ЕЛЕКТРОНІВ НЕ КОНТРОЛЮЄТЬСЯ**

Відомі напівемпіричні моделі дають змогу розрахувати глибинні розподіли дози за наявності детальної інформації про спектр пучка електронів та залежності емпіричних параметрів моделі від енергії й кута падіння пучка на об'єкт опромінення. Однак у технологічних центрах у процесі радіаційної стерилізації спектр пучка електронів, як правило, не контролюється. У цій роботі поставлено й розв'язано задачу розробки процедури використання наявних напівемпіричних моделей для розрахунку глибинних розподілів дози у випадку, коли спектр пучка електронів не контролюється.

Описано процедуру визначення емпіричних параметрів моделі на основі вибору одного режиму опромінення з набору значень енергій електронів та кутів падіння пучка електронів на шар, які дають суттєвий внесок у розрахунок глибинного розподілу дози. Проведено оцінку діапазону енергій електронів у спектрі на основі апроксимації спектра трикутним розподілом з параметрами, що відповідають стандартним характеристикам глибинного розподілу дози електронів. Проведено оцінки похибок визначення емпіричних параметрів моделі з використанням набору режимів опромінення в діапазоні енергій електронів від 5 до 10 MeV та кутів падіння пучка електронів на шар від 0 до 60°.

Похибку моделі SEM2U визначено на основі відхилень передбачень цієї моделі від результатів числових експериментів, отриманих моделюванням глибинних кривих дози в шарі методом Монте-Карло. Для оцінок похибок використовуються стандартні характеристики процесу радіаційної стерилізації: значення оптимальних товщин шару, показники однорідності дози та коефіцієнти використання енергії пучка.

Описано метод використання напівемпіричних моделей для випадку, коли спектр електронів не контролюється. Метод полягає в обробці вимірювань, виконаних з використанням дозиметричного клина, для отримання залежності дози від глибини при нормальному падінні пучка електронів на об'єкт опромінення (базова залежність моделей) та виборі одного режиму опромінення для визначення емпіричних параметрів моделей. Проведено порівняння глибинних кривих дози в напівнескінченному середовищі, розрахованих описаним методом, з результатами моделювання глибинних кривих дози методом Монте-Карло. Для цих порівнянь використовується пучок електронів із широким спектром Spectrum_8 при різних кутах падіння пучка на середовище. Проведено оцінку похибки розрахунків глибинних кривих дози для пучків електронів зі спектром Spectrum_8 згідно з характеристиками процесу двостороннього опромінення, стандартними при проведенні радіаційної стерилізації. Оцінку похибки проведено за величиною відхилення передбачень напівемпіричної моделі SEM2U від результатів числових експериментів, отриманих моделюванням глибинних кривих дози в шарах оптимальної товщини методом Монте-Карло.

Показано, що процедура визначення емпіричних параметрів моделі на основі вибору одного режиму опромінення дає змогу достатньо коректно проводити розрахунки в моделі SEM2U для пучків електронів із широким спектром. Обговорюються можливості запропонованого методу використання напівемпіричних моделей для розрахунків глибинних кривих дози при виборі оптимальних режимів опромінення в радіаційній стерилізації у випадку, коли спектр не контролюється.

Ключові слова: дозиметрія електронного пучка, стерилізація, двостороннє опромінення, крива глибинної дози, вибір оптимальних режимів, напівемпірична модель, метод Монте-Карло.

І. О. Girka¹, V. T. Lazurik¹, Y. V. Rudychev², O. O. Zolotukhin^{1,*}¹ *V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine*² *National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”, Kharkiv, Ukraine**Corresponding author: oozolutukhin@karazin.ua**DETERMINATION OF EMPIRICAL PARAMETERS OF DEPTH-DOSE DISTRIBUTION MODELS FOR
CASES WITHOUT ANY CONTROL OF THE ELECTRON BEAM SPECTRUM**

Two preconditions are crucial for the calculation of depth-dose distributions in existing semi-empirical models. An available detailed information regarding the electron beam spectrum is one precondition. And the dependence of the model's empirical parameters on the energy and incidence angle of the beam on the irradiated object is the other precondition. However, in industrial applications, the electron beam spectrum is typically not controlled during the radiation sterilization process. The present paper addresses and solves the problem of developing a procedure for using existing semi-empirical models to calculate depth-dose distributions if the electron beam spectrum is not controlled.

The procedure for determining the empirical parameters of the model is suggested. It is based on the selection of a single irradiation mode from a set of values for electron energies and electron beam incidence angles on the layer that make a significant contribution to the depth-dose distribution. An estimation of the electron energy range in the spectrum is carried out based on an approximation of the spectrum by a triangular distribution with parameters corresponding to standard characteristics of the electron depth-dose distribution. The errors in determining the empirical parameters of the model are evaluated using a set of irradiation modes in the electron energy range from 5 to 10 MeV and electron beam incidence angles on the layer from 0° to 60°.

The error of the SEM2U model is determined based on the deviations of the model's predictions from the results of numerical experiments obtained by simulating depth-dose curves in the layer using the Monte Carlo method. Standard characteristics of the radiation sterilization process are used to estimate errors: values of optimal layer thicknesses, dose uniformity indices, and beam energy utilization coefficients.

The method for using semi-empirical models is described for the cases without any control of the electron spectrum. The method consists of processing measurements taken using a dosimetric wedge to obtain the depth-dose curve under normal incidence of the electron beam on the irradiated object (the baseline curve for the models) and selecting a single irradiation mode to determine the empirical parameters of the models. The depth-dose curves in a semi-infinite medium, calculated using the described method, are compared with the results of simulating depth-dose curves using the Monte Carlo method. For these comparisons, an electron beam with a broad Spectrum_8 spectrum is used at various beam incidence angles on the medium. The error of the calculations of depth-dose curves for electron beams with the Spectrum_8 spectrum is evaluated according to the characteristics of the two-sided irradiation process, which is standard in radiation sterilization. The error is estimated based on the deviation of the predictions of the semi-empirical SEM2U model from the results of numerical experiments obtained by simulating depth-dose curves in the layers of optimal thickness using the Monte Carlo method.

It is shown that the procedure for determining the empirical parameters of the model, based on the selection of a single irradiation mode, provides sufficient accuracy for the calculations in the SEM2U model for electron beams with a broad spectrum. The possibilities of the proposed method for using semi-empirical models to calculate depth-dose curves when selecting optimal irradiation modes in radiation sterilization in cases without any control of the spectrum are discussed.

Keywords: electron beam dosimetry, sterilization, two-side irradiation, depth-dose curve, selection of optimal modes, semi-empirical model, Monte Carlo method.

REFERENCES

1. S. Schiller, U. Heisig, S. Panzer. *Electron Beam Technology* (New York: John Wiley & Sons Inc, 1982) 508 p.
2. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). *Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies between 1 and 50 MeV*. ICRU Report 35 (Bethesda, MD, ICRU, 1984) 168 p.
3. R.J. Woods, A.K. Pikaev. *Applied Radiation Chemistry: Radiation Processing* (New York: Wiley, 1994) 535 p.
4. ISO/ASTM Standard 51649. Practice for dosimetry in an e-beam facility for radiation processing at energies between 300 keV and 25 MeV. ASTM Standards 12.02 (West Conshohocken, PA, ASTM International, 2005) 30 p.
5. Yu. Pavlov, P. Bystrov. Software and hardware complex for radiation processing facility control. *Radiat. Phys. Chem.* 196 (2022) 110110.
6. Z. Zimek, L. Waliś, A.G. Chmielewski. EB industrial facility for radiation sterilization of medical devices. *Radiat. Phys. Chem.* 42 (1993) 571.
7. R. Pomatsalyuk et al. Real time luminescent dosimetry system for product processing at an electron accelerator. *Probl. At. Sci. Technol.* 5 (2024) 131.
8. S.V. Denbovetsky et al. Investigation of electron beam formation in glow-discharge electron guns with an additional electrode. In: *Proceedings of the XVIIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*. Cat. No. 98CH36073. Eindhoven, The Netherlands, August 17–21, 1998 (Piscataway, NJ, IEEE Service Center, 1998) p. 637.
9. ASTM E2232-21. Standard Guide for Selection and Use of Mathematical Methods for Calculating Absorbed Dose in Radiation Processing Applications (West Conshohocken, PA, ASTM International, 2021) 19 p.
10. F. Salvat, J. Fernández-Varea, J. Sempau (Eds.) *PENELOPE-2011: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*. Workshop Proceedings. Barcelona, Spain, July 4–7, 2011 (Paris: OECD Publishing, 2012) 385 p.
11. V.T. Lazurik et al. *Information System and Software for Quality Control of Radiation Processing* (Warsaw, Institute of Nuclear Chemistry and Technology, 2011) 232 p.
12. V.L. Uvarov et al. Development and validation of an analytical model of isotope production by bremsstrahlung radiation. *Appl. Radiat. Isot.* 199 (2023) 110890.
13. V.G. Rudychev et al. Optimization of converter and bremsstrahlung characteristics for object irradiation. *Radiat. Phys. Chem.* 206 (2023) 110815.
14. V.L. Uvarov et al. An analytical approach to optimization of isotope production by bremsstrahlung radiation. *Radiat. Phys. Chem.* 214 (2024) 111547.

15. V.G. Rudychev, V.T. Lazurik, Y.V. Rudychev. Influence of the electron beams incidence angles on the depth-dose distribution of the irradiated object. [Radiat. Phys. Chem. 186 \(2021\) 109527](#).
16. M. Rosenstein, H. Eisen, J. Silverman. Electron depth-dose distribution measurements in finite polystyrene slabs. [J. Appl. Phys. 43 \(1972\) 3191](#).
17. V. Lazurik et al. Implementation of a semi-empirical model for controlling radiation sterilization processes. In: [Proceedings of the 4th International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering \(MI-STA 2024\)](#). Tripoli, Libya, May 19–21, 2024 (IEEE, 2024) p. 649.
18. I.O. Girka, V.T. Lazurik. Semi-empirical models of electron beam control for radiation sterilization. [East Eur. J. Phys. 3 \(2025\) 422](#).
19. V. Lazurik, V. Moskvina. Monte Carlo calculation of charge-deposition depth profile in slabs irradiated by electrons. [Nucl. Instrum. Methods B 108 \(1996\) 276](#).
20. I. Melnyk, A. Pochynok. Theoretical justification of application possibility of different order root-polynomial functions for interpolation and approximation of boundary trajectory of electron beam. [Radioelectron. Commun. Syst. 66 \(2023\) 53](#).
21. V. Lazurik et al. Control of process parameters of two-sided irradiation of electron beam in radiation technologies. In: [Proceedings of the 3rd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering \(MI-STA 2023\)](#) Benghazi, Libya, May 21–23, 2023 (IEEE, 2023) p. 25.
22. T. Tabata, P. Andreo, K. Shinoda. An algorithm for depth-dose curves of electrons fitted to Monte Carlo data. [Radiat. Phys. Chem. 53 \(1998\) 205](#).
23. V.M. Lazurik, T. Tabata, V.T. Lazurik. A database for electron-material interactions. [Radiat. Phys. Chem. 60 \(2001\) 161](#).
24. V.T. Lazurik et al. Dosimetry method based on a two-parametric model of electrons beam for radiation processing. [Probl. At. Sci. Technol. 6 \(2017\) 137](#).

Надійшла / Received 20.05.2026