



Numerical simulation of measurements in radiation technologies

V. Morgunov¹, R. Trishch², S. Lytovchenko¹, V. Chyshkala¹,
H. Hrinchenko², A. Trishch²

¹ V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 4, 61022, Kharkiv, Ukraine
v.morgunov@karazin.ua

² Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Universytetska Str., 16, 61003, Kharkiv, Ukraine
trich_@ukr.net

Abstract

Radiation plays a very important role in the life of humans. Measurements in radiation technologies and radiation processes are very important. Usually measurements in radiation technologies are made with dosimeters of various types: solid state dosimeters, liquid dosimeters and gaseous dosimeters. Dose measurements are based on different principles: temperature increase, collection of electric charge, development of gases, accumulation of free radicals, trapping of electron in the matrix, color change, change of solution conductivity, radiation chemical oxidation, radiation chemical reduction. To measure absorbed doses the dosimetry system should be used which consists of dosimeters, measurement instrumentation, the calibration curve, reference standards and procedure for the system's use.

Computer processing power has increased rapidly and significantly over the past decades. Modern computers with proper software and mathematical methods allow to simulate very complicated processes, for example passage of ionizing radiation through the matter.

Article shows that GEANT4 can be used for numerical simulations to determine the absorbed doses, dose rates, and other values inside irradiated objects under radiation. The relative uncertainty is up to 11.8%. Simulation of radiation processing of complex objects can be performed with good accuracy. In order to use numerical simulations to measure radiation, metrological support should be developed.

Keywords: radiation technologies; radiation measurements; computer simulation; GEANT4.

Received: 23.04.2021

Edited: 20.05.2021

Approved for publication: 25.05.2021

1. Introduction

Radiation technologies are widely used in different aspects of human beings: energy production, medicine, agriculture, health care, ecology, cultural heritage preservation and consolidation and many others. Radiation technologies demand a lot of measurements of different values: absorbed dose, dose rate, kinetic energy, current inside and etc. And many of these values should be measured inside of the irradiated objects. In many cases it is impossible to measure these values (for example, in radiation shielding, in human body, in cultural heritage and others cases). To solve this issue numerical simulation of the passage of particles through matter using Monte Carlo method can be used. A lot of simulations were made for different areas of radiation technologies usage:

- radiation shielding [1–3];
- radiotherapy [4–6];
- assessment of radiation damage to the electronics of satellites [7–9];
- cosmic rays [10–12];

- cultural heritage artefacts treatment [13];
- biological damage studies [14–16];
- dosimetry [17–19].

2. Monte Carlo software toolkits

At present time there are a lot of software toolkits for numerical simulation of the passage of ionizing radiation through the matter: FLUKA [20], GEANT4 [21], MCNPX [22], MARS15 [23], PHITS [24].

The main demands to them such as follows:

- Possibility to input complex geometrical objects, preferably made by CAD software (CATIA, Autodesk AutoCAD, 3D Max, Maya, Archicad, FreeCAD and etc.).
- Utilization of high-level programming language.
- Have a multithreading mode to speed up calculations.
- Have a good support.

All revised packages have almost the same possibilities. Most popular are MCNPX and GEANT4. Both packages allow to use CAD files (through the STEP stan-

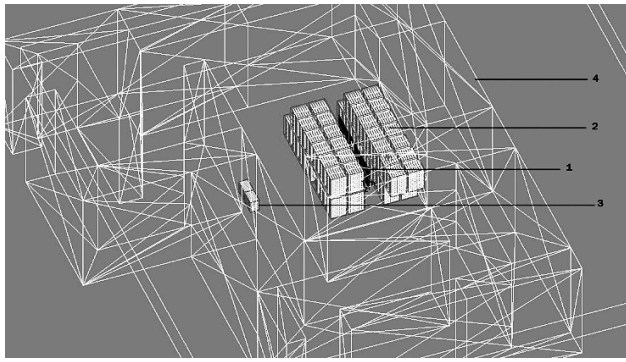


Fig. 1. Irradiation chamber and maze: 1 – radiation source; 2 – tote boxes; 3 – treated objects; 4 – walls

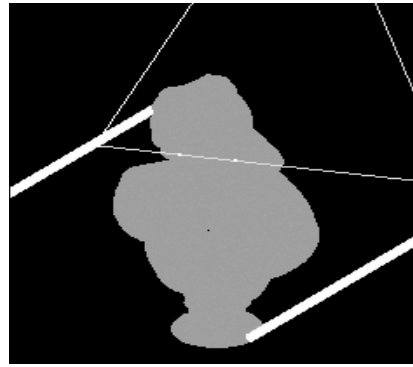


Fig. 2. Example of treated object imported into simulation

ard), have multithreading mode. The main difference between these both packages is supported language. And only one of them, GEANT4, supports C++, the modern programming language. So, Monte Carlo radiation transport code GEANT4 was chosen for use.

Software toolkit means that the user have to construct stand-alone application to use the toolkit. To use GEANT4 the following aspects should be defined:

- the geometry of the system;
- the materials involved;
- the fundamental particles of interest;
- the physical processes of interest;
- the generation of primary events;
- the response of sensitive detector components.

The geometry of the system. The geometry of the system (location, dimensions, shape) includes

- irradiation chamber and maze and its components;
- part of the conveyor system (if exists);
- irradiated object(s);
- sources of radiation.

GEANT4 provides a very rich library of basic geometrical shapes, often referred to as primitives, plus the ability to define compound geometries via Boolean operations

such as union, subtraction, and intersection. It is therefore capable of supporting extremely complex physical geometries composed of simple primitives. In spite of that historical objects are more complex and it is difficult to create them programmatically from simple primitives. The easiest way to import complicated geometrical objects is via CADMesh – a direct CAD¹ model import interface for GEANT4 leveraging built-in readers [6]. This interface can read .stl, .ply, .obj files.

Examples of imported CAD objects into simulation are shown in Fig. 1 and 2.

3. Results and discussion

As a result code on the base of GEANT4 software toolkit was developed. The comparison between measured and simulated results were conducted for absorbed dose in the air and in the materials. In [13] wood samples of two types (soft and hard) were irradiated by X rays received from electron beam accelerator (1 kW, 5 MeV). The absorbed doses were measured and numerical simulation of this process was performed. The result of measured and simulated comparison is given (See Table 1). The reached accuracy of simulation is between 1.5% and 11.8%.

Table 1

Comparison between measured and calculated values of absorbed doses

Depth of the measurements (mm)	Irradiation parameters								
	$f_z=120$ Hz, $f_s=1$ Hz			$f_z=40$ Hz, $f_s=0.5$ Hz			$f_z=20$ Hz, $f_s=1$ Hz		
	Absorbed dose, Gy								
	Measured	Simulated	Difference, %	Measured	Simulated	Difference, %	Measured	Simulated	Difference, %
Spruce									
35	9.05	8.34	7.8	3.66	3.23	11.7	1.66	1.47	11.5
65	8.95	8.71	2.7	3.29	3.03	7.9	1.62	1.51	6.8
100	7.21	7.81	8.3	2.81	3.11	10.7	1.39	1.33	4.3
230	5.83	6.07	4.1	2.16	2.36	9.3	1.06	1.04	1.8
Oak									
35	9.16	9.58	4.6	3.29	3.24	1.5	1.62	1.70	4.9
65	8.58	8.0	6.8	3.15	3.22	2.2	1.58	1.66	5.1
100	7.57	7.8	3.0	2.75	2.64	2.9	1.39	1.54	10.8
230	4.39	4.6	4.8	1.61	1.8	11.8	0.82	0.89	8.5

¹ CAD – Computer-aided design is the use of computers to aid in the creation, modification, analysis, or optimization of a design.

4. Conclusion

For determination of absorbed doses, dose rates and other quantities inside irradiated objects under radiation treatment, GEANT4 can be used for numerical simulation. The final simulation results are sufficiently precise for the careful treatment of cul-

tural heritage. The uncertainties are up to 11.8% [13]. The simulation of the radiation treatment of complicated cultural objects can be performed with good accuracy. To use numerical simulation for prediction of radiation measurements metrological base should be developed.

Чисельне моделювання вимірювань у радіаційних технологіях

В.В. Моргунов¹, Р.М. Трищ², С.В. Литовченко¹, В.О. Чишкала¹, Г.С. Грінченко², А.Р. Трищ²

¹ Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, 61022, Харків, Україна
v.morgunov@karazin.ua

² Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, 61003, Харків, Україна
trich_@ukr.net

Анотація

Радіація відіграє дуже важливу роль у житті людини. Зазвичай вимірювання в радіаційних технологіях проводяться з використанням дозиметрів різного типу: твердотільних, рідинних та газових. Вимірювання дози базується на різних принципах: підвищення температури, збір електричного заряду, розвиток газів, накопичення вільних радикалів, захоплення електрона в матриці, зміна кольору, зміна провідності розчину, хімічне окислення, хімічне відновлення. Для вимірювання поглинених доз слід використовувати систему дозиметрії, яка складається з дозиметрів, вимірювальних приладів, калібрувальної кривої, еталонних стандартів та процедури використання системи.

За останні десятиліття обчислювальна потужність комп'ютера швидко зростала. Сучасні комп'ютери з належним програмним забезпеченням та математичними методами дозволяють моделювати дуже складні процеси, наприклад, проходження іонізуючого випромінювання через речовину.

У статті показано, що чисельне моделювання може бути використано як альтернатива інструментальним вимірюванням у радіаційних технологіях. Чисельне моделювання може бути застосовано там, де не може бути використано традиційні методи вимірювань: для розрахунку радіаційного захисту, поглинених доз у радіології, при радіаційній обробці музейних експонатів та ін.

Для визначення поглинених доз, потужності дози та інших величин усередині опромінених об'єктів, що перебувають під випромінюванням, GEANT4 можна використовувати для чисельного моделювання. Відносна невизначеність становить до 11,8%. Моделювання променевої обробки складних об'єктів може бути виконано з хорошою точністю. Для використання чисельного моделювання з метою вимірювань радіації слід розробити метрологічне забезпечення.

Ключові слова: радіаційні технології; радіаційні вимірювання; комп'ютерне моделювання; GEANT4.

Численное моделирование измерений в радиационных технологиях

В.В. Моргунов¹, Р.М. Трищ², С.В. Литовченко¹, В.А. Чишкала¹, А.С. Гринченко², А.Р. Трищ²

¹ Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, 61022, Харьков, Украина
v.morgunov@karazin.ua

² Украинская инженерно-педагогическая академия, ул. Университетская, 16, 61003, Харьков, Украина
trich_@ukr.net

Аннотация

Измерения в радиационных технологиях очень важны. Обычно они проводятся с использованием дозиметров разного типа. Измерение дозы основывается на различных принципах: повышение температуры, сбор электрического заряда, образование газов, накопление свободных радикалов, захват электрона в матрице, изменение цвета, изменение проводимости раствора, химическое окисление, химическое восстановление. Для измерения поглощенных доз следует использовать систему дозиметрии, которая состоит из дозиметров, измерительных приборов, калибровочных кривых, эталонных стандартов и процедуры использования системы.

За последние десятилетия вычислительная мощность компьютера выросла. Современные компьютеры с должным программным обеспечением и математическими методами позволяют моделировать очень сложный процесс, например, прохождение ионизирующего излучения через вещество.

В статье показано, что численное моделирование может быть использовано как альтернатива инструментальным измерениям в радиационных технологиях. Для определения поглощенных доз, мощности дозы и других величин внутри облучаемых объектов программный комплекс GEANT4 может быть использован для численного моделирования. Относительная погрешность таких вычислений не превышает 11,8%.

Ключевые слова: радиационные технологии; радиационные измерения; компьютерное моделирование; GEANT4.

References

1. MacFadden N., Peggs S., Gulliford C. Development and Validation of a Geant4 Radiation Shielding Simulation Framework. Brookhaven National Lab. (BNL), Upton, NY (United States), 2018. doi: 10.2172/1515417
2. Issa S.A., Tekin H., Elsaman R., Kilicoglu O. et al. Radiation shielding and mechanical properties of Al₂O₃-Na₂O-B₂O₃-Bi₂O₃ glasses using MC-NPX Monte Carlo code. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, vol. 223, pp. 209–219. doi:10.1016/j.matchemphys.2018.10.064
3. Al-Buriah M., Singh V. Comparison of shielding properties of various marble concretes using GEANT4 simulation and experimental data. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2020, vol. 56, pp. 1127–1133. doi: 10.1007/s41779-020-00457-1
4. Jan S., Santin G., Strul D., Staelens S. et al. GATE: a simulation toolkit for PET and SPECT. *Physics in Medicine & Biology*, 2004, vol. 49, p. 4543. doi: 10.1088/0031-9155/49/19/007
5. Arbor N., Gasteuil J., Noblet C., Moreau M., Meyer P. A GATE/Geant4 Monte Carlo toolkit for surface dose calculation in VMAT breast cancer radiotherapy. *Physica Medica*, 2019, vol. 61, pp. 112–117. doi: 10.1016/j.ejmp.2019.04.012
6. Jang E.-S., Choi J.-H. Verification of Dose Evaluation of Human Phantom using Geant4 Code. *Journal of the Korean Society of Radiology*, 2020, vol. 14, issue 5, pp. 529–535. doi: https://doi.org/10.7742/jksr.2020.14.5.529
7. Uzel R., Özyildirim A. A study on the local shielding protection of electronic components in space radiation environment. Proceedings of 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). doi: 10.1109/RAST.2017.8003007
8. Lv H., Zhang H., Mei B., Sun Y., Yu Q. Simulation and Calculation Method of Total Ionizing Dose Radiation Resistance of Aerospace Components based on in-Orbit Data. Proceedings of 3rd International Conference on Circuits, System and Simulation (ICCS), 2019. doi:10.1109/CIRSYS-SIM.2019.8935615
9. Ma K., Song N., Jin J., Zio E. et al. Radiation-Induced Degradation Analysis and Reliability Modeling of COTS ADCs for Space-Borne Miniature Fiber-Optic Gyroscopes. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021. doi: 10.1109/tim.2021.3054419
10. Hung N.Q., Hai V. H., Nomachi M. Investigation of cosmic-ray induced background of Germanium gamma spectrometer using GEANT4 simulation. *Applied Radiation and Isotopes*, 2017, vol. 121, pp. 87–90. doi: 10.1016/j.apradiso.2016.12.047
11. Ohishi M., Yoshikoshi T., Yoshida T. A Monte Carlo simulation study for cosmic-ray chemical composition measurement with Cherenkov Telescope Array, 2017. arXiv preprint arXiv:1709.03241.
12. Kimura S.S., Murase K., Zhang B.T. Ultra-high-energy cosmic-ray nuclei from black hole jets: Recycling galactic cosmic rays through shear acceleration. *Physical Review D* 97 (2), 023026, 2018. doi: https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.023026
13. Morgunov V., Hybler P., Zachar M. GEANT4 validation for X-ray treatment of wooden cultural heritage artefacts. *Applied Radiation and Isotopes*, 2021, vol. 169, p. 109565. doi: 10.1016/j.apradiso.2020.109565
14. De la Fuente Rosales L., Incerti S., Francis Z., Bernal M.A. Accounting for radiation-induced indirect damage on DNA with the Geant 4-DNA code. *Physica Medica*, 2018, vol. 51, pp. 108–116. doi: 10.1016/j.ejmp.2018.06.006

15. Mavragani I.V., Nikitaki Z., Kalospyros S.A., Georgakilas A.G. Ionizing Radiation and Complex DNA Damage: From Prediction to Detection Challenges and Biological Significance. *Cancers*, 2019, vol. 11, p. 1789. doi: <https://doi.org/10.3390/cancers11111789>
16. Chegeni N., Kouhkan E., Hussain A., Hassanvand M. The effect of the nucleus random location on the cellular S-values – Based on Geant4-DNA. *Applied Radiation and Isotopes*, 2021, vol. 168, p. 109427. doi: [10.1016/j.apradiso.2020.109427](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109427)
17. Medhat M., Abdel-Hafiez A., Singh V. Optimization of fast neutron flux in an irradiator assembly using Monte Carlo simulations. *Vacuum*, 2017, vol. 138, pp. 105–110. doi: [10.1016/j.vacuum.2017.01.026](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.01.026)
18. Queiróz Filho P.P., Da Silva C. Geant4 simulation of ion chambers response to ^{60}Co spectrum of LNMRI/IRD Shepherd 81-14D Radiator. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 975, p. 012051.
19. Majer M., Roguljić M., Knežević Ž., Starodumov A. et al. Dose mapping of the panoramic ^{60}Co gamma irradiation facility at the Ruđer Bošković Institute – Geant4 simulation and measurements. *Applied radiation and Isotopes*, 2019, vol. 154, p. 108824. doi: [10.1016/j.apradiso.2019.108824](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.108824)
20. Battistoni G., Muraro S., Sala P.R., Cerutti F. et al. The FLUKA code: description and benchmarking. Proceedings of the Hadronic shower simulation workshop 2006, vol. 896. Fermilab, 2007, pp. 31–49.
21. Agostinelli S., Allison J., Amako K.A., Apostolakis J. et al. GEANT4 – a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, vol. 506(3), pp. 250–303. doi: [10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
22. Goorley T., James M., Booth T., Brown F. et al. Initial MCNP6 Release Overview. *Nuclear Technology*, 2012, vol. 180, pp. 298–315. doi: <https://doi.org/10.13182/NT11-135>
23. Mokhov N.V. Recent MARS15 developments: nuclide inventory, DPA and gas production, 2012. arXiv preprint arXiv:1202.2383.
24. Sato T., Niita K, Matsuda N., Hashimoto S. et al. Particle and Heavy Ion Transport code System, PHITS, version 2.52. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2013, vol. 50, issue 9, pp. 913–923. doi: <https://doi.org/10.1080/00223131.2013.814553>