

МЕТОД РАСЧЕТА ПОГЛОЩЕННОЙ (ЭКВИВАЛЕНТНОЙ) ДОЗЫ И МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЕННОЙ (ЭКВИВАЛЕНТНОЙ) ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. В. МОРГУНОВ^{1*}, Н. В. ДИДЕНКО², Р. М. ТРИЩ¹

¹ УИПА, Харьков, УКРАИНА

² ХНАДУ, Харьков, УКРАИНА

*email: volodymyr.morgunov@gmail.com

АННОТАЦИЯ В статье предложен метод расчета поглощенной (эквивалентной) дозы и мощности поглощенной (эквивалентной) дозы ионизирующего излучения (гамма-, нейтронное и электронное излучение) в точке. Предложены аппроксимирующие функции и рассчитаны соответствующие коэффициенты. Приведены графики зависимостей коэффициентов перевода флюенса частиц и флюенса энергии частиц в поглощенную (эквивалентную) дозу в зависимости от энергии частиц.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, численное моделирование, GEANT4, поглощенная и эквивалентная доза, мощность поглощенной (эквивалентной) дозы.

CALCULATION METHOD OF THE ABSORBED (EQUIVALENT) DOSE AND ABSORBED (EQUIVALENT) DOSE RATE OF THE IONIZING RADIATION

V. MORGUNOV^{1*}, N. DIDENKO^{2*}, R. TRISHCH¹

¹ UEPA, Kharkov, UKRAINE

² KhNAHU, Kharkov, UKRAINE

*email: volodymyr.morgunov@gmail.com

ABSTRACT One of the perspective way to calculate absorbed (equivalent) dose and their rate is numerical simulation. GEANT4 is one of the software toolkit for the simulation of the passage of particles through matter. The article is devoted to define correct way of dose and dose rate calculation as dose rate should be calculated at the point; correct way of dose conversion coefficient approximation by piecwise continuous function. Calculation method of the absorbed (equivalent) dose and absorbed (equivalent) dose rate of ionizing radiation (gamma, neutron and electron radiation) at the point is proposed in the article. Approximating functions are proposed and the corresponding coefficients are calculated. Figures with coefficients dependencies of particles fluence and particle fluence energy depending on the energy of the particles are given. These coefficients are needed for calculations of absorbed (equivalent) dose. The absorbed dose rate calculation method which is used in GEANT4 can not be used for dose rate calculation. Proper mathematical method for absorbed dose rate calculation was chosen and was described in the article. Also, the method of absorbed (equivalent) dose rate calculation are given. Proposed calculation method of the absorbed (equivalent) dose and absorbed (equivalent) dose rate of the ionizing radiation may be used for numerical simulation of ionization radiation passage through the matter, for example, with the use of GEANT4.

Keywords: ionization radiation, numerical simulation, GEANT4, absorbed and equivalent dose, absorbed (equivalent) dose rate.

Введение

Численные методы расчета поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы от радиоактивных источников находят широкое применение. Это обусловлено прогрессом в разработке, усовершенствованию, верификации программного обеспечения и ростом производительности компьютерной техники.

Программы для численного моделирования прохождения ионизирующего излучения через вещество используют метод Монте-Карло [1]. За последние десятилетия разработано большое количество (около десятка) программных комплексов для такого моделирования, но чаще всего используются следующих три программных комплекса: GEANT4 [2, 3], MCNP [4] и FLUKA [5].

Хотя эти программные комплексы используют метод Монте-Карло и дают согласующиеся результаты [6], разница в их частном применении может делать один комплекс предпочтительнее других. В программных комплексах, моделирующих прохождение ионизирующего излучения через вещество, можно получить следующую информацию: кинетическую энергию, момент частицы; длину шага; поглощенную энергию частицы; вещество, в котором произошло поглощение энергии частицы; поглощенную дозу и др.

Поглощенная доза в упомянутых программных комплексах рассчитывается в конечном объеме. Для последующего расчета мощности поглощенной дозы желательно знать поглощенную дозу в точке. Приведенный метод позволяет рассчитать поглощенную дозу и мощность поглощенной дозы в

точке, что дает более точные расчеты.

Цель работы

В статье приведен метод определения поглощенной (эквивалентной) дозы и мощности поглощенной (эквивалентной) дозы для различных источников ионизирующего излучения: гамма-лучей, нейтронов и электронов в точке, что необходимо для проведения численного моделирования прохождения ионизирующего излучения через вещество. Приведены аппроксимирующие функции для расчета коэффициентов перевода флюенса частиц и флюенса энергии частиц в поглощенную (эквивалентную) дозу в зависимости от энергии частиц.

Расчет поглощенной (эквивалентной) дозы

Для расчета **поглощенной дозы гамма-излучения** используется следующий подход. Поглощенная доза гамма излучения в точке рассчитывается по следующей формуле:

$$dD_{\gamma} = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot \Psi \frac{\mu_{en}}{\rho}, \tag{1}$$

где dD_{γ} – поглощенная доза в точке от гамма-излучения (Флюенс энергии — количество энергии, перенесенной частицами через элементарную площадку, перпендикулярную пучку (для случая

пучка), или через поверхность элементарной сферы (для случая диффузного поля частиц)), Гр; Ψ – флюенс энергии гамма излучения¹, МэВ/см²; $\frac{\mu_{en}}{\rho}$ – массовый коэффициент ослабления, см²/г.

Для расчета массового коэффициента ослабления $\frac{\mu_{en}}{\rho}$, входящего в формулу (1) данные взяты из [7]. На рис. 1 приведены зависимость массового коэффициента ослабления для воды от энергии гамма кванта (обозначены точками). Отображенные на рис. 1 данные в источнике приведены в табличном виде, с большим шагом между соседними значениями энергий гамма кванта, поэтому для расчета поглощенной (эквивалентной) дозы необходимо табличные данные аппроксимировать. С этой целью применялся программный комплекс ROOT [8]. В связи с тем, что с увеличением энергии гамма кванта значение массового коэффициента ослабления быстро уменьшается подобрать аппроксимирующую функцию на весь диапазон энергий не удалось. Для решения этой проблемы диапазон энергий разбивался на малые интервалы энергий гамма кванта, и для каждого интервала подбирались аппроксимирующая функция.

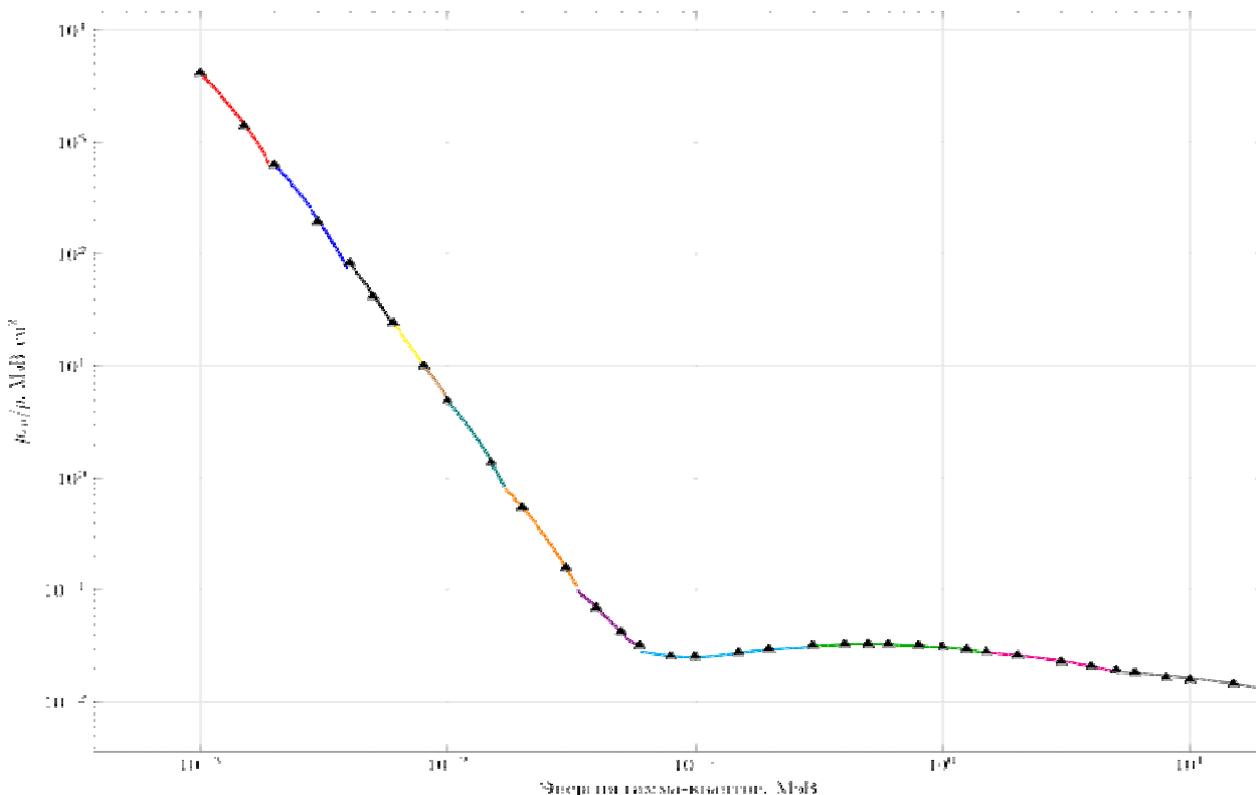


Рис. 1 – Зависимость массового коэффициента ослабления для воды от энергии гамма кванта. ▲ - табличные данные зависимости коэффициента массового ослабления для воды.

Результаты подбора аппроксимирующих функций приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Зависимость коэффициентов аппроксимирующих функций от диапазона энергий гамма-кванта.

| Диапазон энергий, МэВ | Вид функции | p ₀ | p ₁ | p ₂ | p ₃ | p ₄ | p ₅ | p ₆ | p ₇ |
|-----------------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 0,0÷0,002 | эсп. | 10.371 | -2063,95 | | | | | | |
| 0,002÷0,004 | эсп. | 8,64225 | 6,9475 | | | | | | |
| 0,004÷0,006 | эсп. | -1111,52 | -636,505 | | | | | | |
| 0,006÷0,008 | эсп. | 5,83839 | -443,043 | | | | | | |
| 0,008÷0,01 | эсп. | 5,07754 | -347,937 | | | | | | |
| 0,01÷0,016 | эсп. | 4,15907 | -256,09 | | | | | | |
| 0,016÷0,032 | | 1,927770.34753 | -126,253 | | | | | | |
| 0,032÷0,06 | полином. | 0.34753 | -10.3335 | 84.65 | | | | | |
| 0,06÷0,3 | полином. | 0.06051 | -0.98887 | 9.59759 | -34.3428 | -5.00379 | 347.751 | -835.313 | 621.782 |
| 0.3÷1.5 | полином. | 0.022611 | 0.0318272 | 0.0640415 | -0.358006 | 0.511662 | -0.309909 | 0.0689375 | |
| 1.5÷5.0 | эсп. | -3.40742 | -0.115632 | | | | | | |
| 5.0÷20.0 | эсп. | -3.8712 | -0.0238322 | | | | | | |

Примечание. В случае, когда в таблице указан вид функции — «эсп.» вид функции соответствует экспоненциальной функции: $y = \exp(p_0 + p_1 \cdot x)$; «полином.» соответствует полиномиальной функции: $y = p_0 + p_1 \cdot x + p_2 \cdot x^2 + p_3 \cdot x^3 + \dots$ причем порядок полиномиальной функции соответствует индексу коэффициента p, для которого указано значение.

Для расчета **поглощенной (эквивалентной) дозы нейтронного излучения** используется подход, аналогичный к расчету поглощенной дозы гамма-излучения. Рассмотрим расчет эквивалентной дозы

нейтронного излучения. Коэффициенты перевода флюенса энергии нейтронов в эквивалентную дозу приведены в табл. А.42 ICRP74 [9] и показаны на рис. 2.

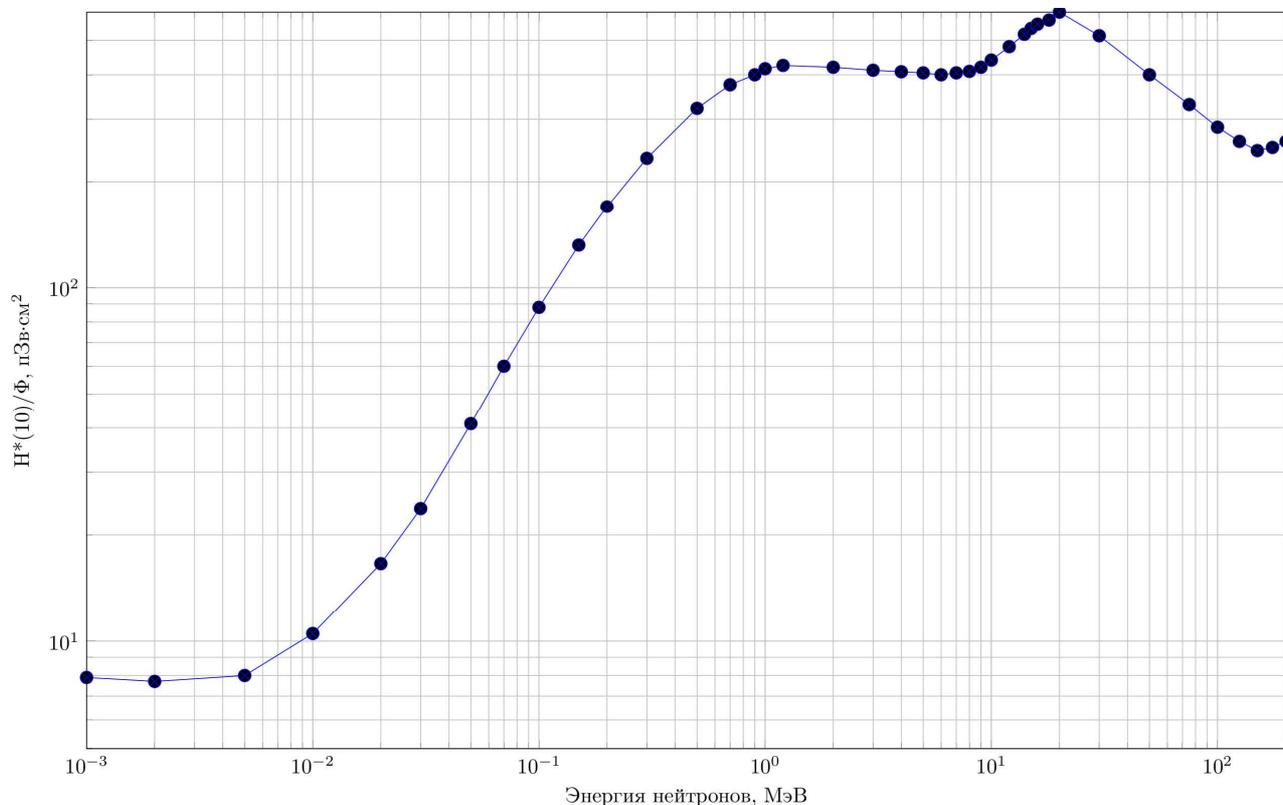


Рис. 2 – Зависимость значения коэффициента перевода флюенса энергии нейтронов в эквивалентную дозу от энергии нейтронов. □ - табличные данные.

Расчет эквивалентной дозы проводится в соответствии со следующей формулой:

$$dD_n = \Phi_n(E) \cdot H(10) / \Phi, \quad (1)$$

где dD_n — эквивалентная доза в точке от нейтронного излучения, Гр; $\Phi_n(E)$ — флюенс нейтронного излучения, МэВ/см²; $H^*(10)/\Phi$ — коэффициент перевода флюенса нейтронов в эквивалентную дозу, пЗв/см².

Коэффициент перевода для нейтронов с энергиями, приходящимися между точками графика, аппроксимируется при помощи линейной интерполяции. Для вычисления поглощенной дозы от **электронов** используется следующий подход. Поглощенная доза рассчитывается по следующей формуле:

$$dD_{e^-} = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot \Phi_{e^-}(E) \cdot \frac{S_{col}}{\rho}, \quad (2)$$

где, dD_{e^-} - поглощенная доза от электронов, Гр;

$\Phi_{e^-}(E)$ - флюенс электронов, см⁻²; $\frac{S_{col}}{\rho}$ - тормозная способность воды для электронов, МэВ·см²/г.

Значения тормозной способности воды для электронов различных энергий приведены в [10] (см. рис. 3).

Также, как и для гамма-излучения, для определения значений тормозной способности воды для электронов для различных значений энергий электронов, подбирались аппроксимирующие функции. Результаты подбора аппроксимирующих функций приведены в табл. 3.

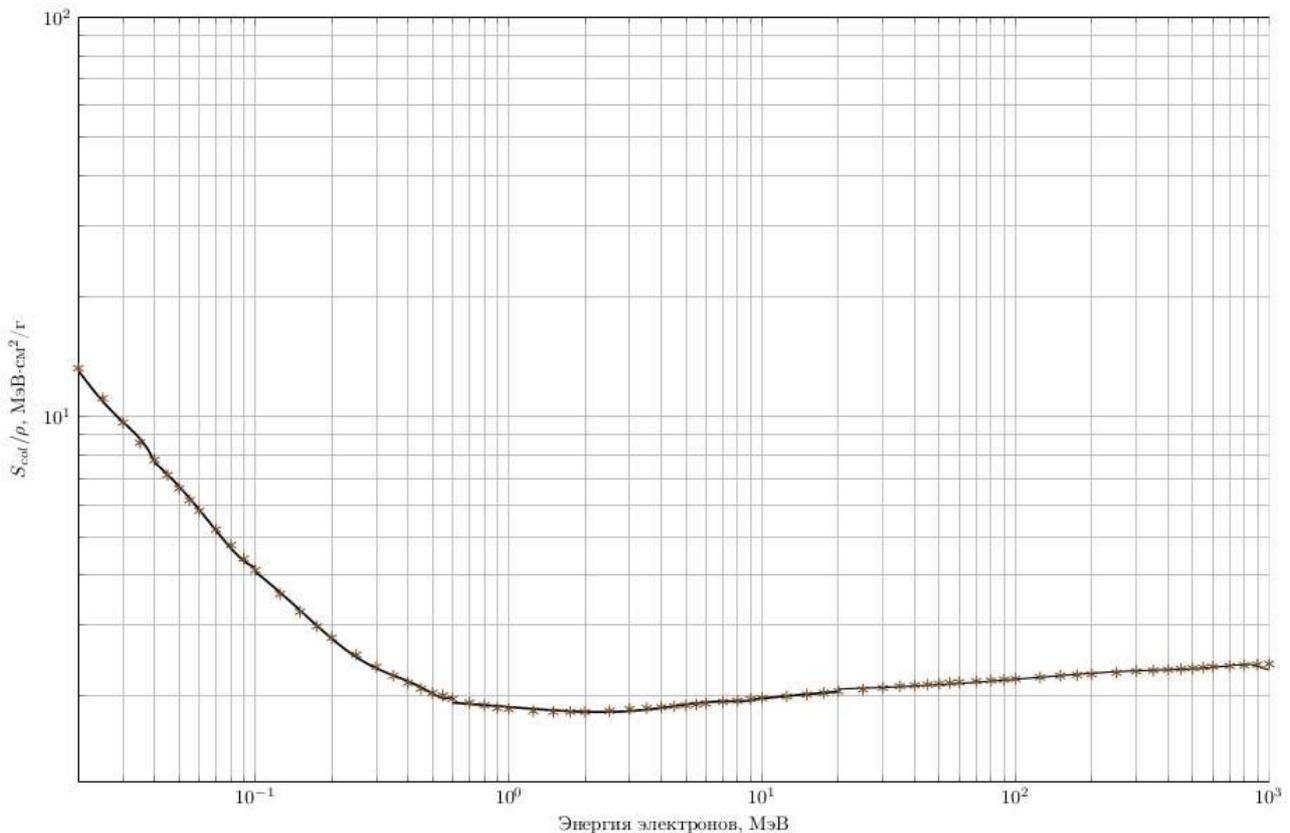


Рис. 3 – Зависимость тормозной способности воды для электронов от энергии электронов.
* - табличные данные.

Выводы

В статье предложен метод определения поглощенной (эквивалентной) дозы и мощности поглощенной (эквивалентной) дозы для различных источников ионизирующего излучения: гамма-лучей, нейтронов и электронов в точке, что необходимо для проведения

численного моделирования прохождения ионизирующего излучения через вещество. Приведены аппроксимирующие функции для расчета коэффициентов перевода флюенса частиц и флюенса энергии частиц в поглощенную (эквивалентную) дозу в зависимости от энергии частиц.

Таблиця 3 – Зависимость коэффициентов аппроксимирующих функций от диапазона энергий электронов.

| Диапазон энергий, МэВ | Вид функции | p ₀ | p ₁ | p ₂ | p ₃ | p ₄ |
|-----------------------|-------------|----------------|----------------|---------------------|----------------|----------------|
| 0.01÷0.04 | полином. | 42,2388 | -2673.44 | 76059.4 | -770632 | |
| 0.04÷0.1 | полином. | 13,3505 | -175,489 | 838,396 | | |
| 0.1÷0.6 | полином. | 7.17108 | -43.8685 | 151.899 | -240.324 | 141.624 |
| 0.6÷10.0 | полином. | 2.02582 | -0.22147 | 0.07693 5 | -0.00956 | 0.0004 |
| 10.0÷20.0 | полином. | 1.898 | -0.00407 | 0.00207 | -0.00012 | 2.13333e-06 |
| 20,÷100,0 | полином. | 2.03675 | 0.00214 | - 6.29101e -6 | 8.35556e -9 | -3.9225e-12 |

Примечание. В случае, когда в таблице указана вид функции — «эксп.» вид функции соответствует экспоненциальной функции: $y = \exp(p_0 + p_1 \cdot x)$; «полином.» соответствует полиномиальной функции: $y = p_0 + p_1 \cdot x + p_2 \cdot x^2 + p_3 \cdot x^3 + \dots$ причем порядок полиномиальной функции соответствует индексу коэффициента p, для которого указано значение.

Список литературы

1. **Brown, F. B.** Recent advances and future prospects for Monte Carlo / **F. B. Brown** // *Progress in nuclear science and technology*. – 2011. – № 2. – P. 1-4.
2. **Allison, J.** Geant4 developments and applications / **J. Allison, K. Amako, J. E. A. Apostolakis, H. A. A. H. Araujo, P. A. Dubois, M. A. A. M. Asai, G. A. P. Cirrone** // *Nuclear Science, IEEE Transactions on*. – 2006. – № 53(1). – P. 270-278. – doi:10.1109/TNS.2006.869826.
3. **Agostinelli, S.** Geant4 - a simulation toolkit / **S. Agostinelli, J. Allison, K. A. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, F. Behner** // *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2003. – № 506(3). – P. 250-303. – doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
4. **Goorley, J. T.** Initial MCNP6 release overview-MCNP6 version 1.0. / **J. T. Goorley, M. James, T. Booth, F. Brown, J. Bull, L. J. Cox, J. Hendricks** // *Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, LA-UR-13-22934*. – 2013. – № 1. – P. 1-42. – doi:10.2172/1086758.
5. **Battistoni, G.** The FLUKA code: Description and benchmarking / **G. Battistoni, F. Cerutti, A. Fasso, A. Ferrari, S. Muraro, J. Ranft, P. R. Sala** // *In Hadronic Shower Simulation Workshop(AIP Conference Proceedings)*. – 2007. – Vol. 896. – P. 31-49. – doi:10.1063/1.2720455.
6. **Colonna, N.** Simulations of neutron transport at low energy: A comparison between GEANT and MCNP / **N. Colonna, S. Altieri** // *Health physics*. – 2002. – № 82(6). – P. 840-846.
7. **Hubbell, J. H.** Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest / **J. H. Hubbell, S. M. Seltzer** // *Tech. rep., National 110 Inst. of Standards and Technology-PL, Gaithersburg, MD (United States). Ionizing Radiation Div.* – 1995.
8. **Antcheva, I.** ROOT – A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization / **I. Antchevaa, M. Ballintijna, B. Bellenota, M. Biskupa, R. Bruna, N. Buncica, Ph. Canalb, et al.** // *Computer Physics Communications*. – 2009. – 12(180). – P. 2499-2512. – doi:10.1016/j.cpc.2009.08.005.
9. International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. *ICRP Publication 74. Ann. ICRP*. – 1996. – 26(3-4).
10. **Berger, M. J.** Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions / **M. J. Berger, J. Coursey, M. Zucker, J. Chang** // *NIST Physics Laboratory*. – 1998.

Bibliography (transliterated)

1. **Brown, F. B.** Recent advances and future prospects for Monte Carlo. *Progress in nuclear science and technology*, 2011, 2, 1-4.
2. **Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J. E. A., Araujo, H. A. A. H., Dubois, P. A., Asai, M. A. A. M., Cirrone, G. A. P.** Geant4 developments and applications. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 2006, 53(1), 270-278, doi:10.1109/TNS.2006.869826.
3. **Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K. A., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Behner, F.** Geant4 – a simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, 506(3), 250-303, doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
4. **Goorley, J. T., James, M., Booth, T., Brown, F., Bull, J., Cox, L. J., Hendricks, J.** (2013). Initial MCNP6 release overview-MCNP6 version 1.0. *Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, LA-UR-13-22934*, 2013, 1, 1-42, doi:10.2172/1086758.
5. **Battistoni, G., Cerutti, F., Fasso, A., Ferrari, A., Muraro, S., Ranft, J., Sala, P. R.** The FLUKA code: Description and benchmarking. In *Hadronic Shower Simulation Workshop(AIP Conference Proceedings Volume 896)*, 2007, 896, 31-49, doi:10.1063/1.2720455.
6. **Colonna, N., Altieri, S.** Simulations of neutron transport at low energy: A comparison between GEANT and MCNP. *Health physics*, 2002, 82(6), 840-846.
7. **Hubbell, J. H., Seltzer, S. M.** Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements z=1 to 92 and 48

- additional substances of dosimetric interest. *Tech. rep., National 110 Inst. of Standards and Technology-PL, Gaithersburg, MD (United States). Ionizing Radiation Div, 1995.*
8. **Antchevaa, I., Ballintijna, M., Bellenota, B., Biskupa, M., Bruna, R., Buncica, N., Canalb, Ph., et al.** ROOT – A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization. *Computer Physics Communications*, 2009, **12(180)**, 2499-2512, doi:10.1016/j.cpc.2009.08.005.
 9. International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. *ICRP Publication 74. Ann. ICRP*, 1996, **26(3-4)**.
 10. **Berger, M. J., Coursey, J., Zucker, M., Chang, J.** Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions, *NIST Physics Laboratory*, 1998.

Сведения об авторах (About authors)

Моргунов Владимир Викторович – кандидат технических наук, Украинская инженерно-педагогическая академия, доцент кафедры физики, теоретической и общей электротехники; г. Харьков, Украина; e-mail: volodymyr.morgunov@gmail.com.

Volodymyr Morgunov – Ph. D., Docent, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine; e-mail: volodymyr.morgunov@gmail.com.

Триш Роман Михайлович – доктор технических наук, Украинская инженерно-педагогическая академия, профессор кафедры охраны труда, стандартизации и сертификации; г. Харьков, Украина; e-mail: trich_@ukr.net.

Roman Trishch – Doctor of Technical Sciences, Professor, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine; e-mail: trich_@ukr.net.

Диденко Наталья Викторовна – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ассистент кафедры метрологии и БЖД, г. Харьков, Украина; e-mail: nataly.v.didenko@gmail.com.

Natalya Didenko – Assistant lecturer, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: nataly.v.didenko@gmail.com.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Моргунов, В. В. Метод расчета поглощенной (эквивалентной) дозы и мощности поглощенной (эквивалентной) дозы ионизирующего излучения / **В. В. Моргунов, Р. М. Триш, Н. В. Диденко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 101-106. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.15.

Please cite this article as:

Morgunov, V., Trishch, R., Didenko, N. Calculation method of the absorbed (equivalent) dose and absorbed (equivalent) dose rate of the ionizing radiation. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 101-106, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.15.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Моргунов, В. В. Метод розрахунку поглиненої (еквівалентної) дози і потужності поглиненої (еквівалентної) дози іонізуючого випромінювання / **В. В. Моргунов, Р. М. Триш, Н. В. Діденко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 101-106. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.15.

АНОТАЦІЯ У статті запропоновано метод розрахунку поглиненої (еквівалентної) дози і потужності поглиненої (еквівалентної) дози іонізуючого випромінювання (гамма-, нейтронне і електронне випромінювання) в точці. Запропоновано апроксимуючі функції і розраховані відповідні коефіцієнти. Наведено графіки залежностей коефіцієнтів перекладу флюенса частинок і флюенса енергії частинок в поглинену (еквівалентну) дозу в залежності від енергії частинок.

Ключові слова: іонізуюче випромінювання, чисельне моделювання, GEANT4, поглинена і еквівалентна доза, потужність поглиненої (еквівалентної) дози.

Поступила (received) 22.05.2016