

УДК 539.12:519.245

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ**

©Черняк Е. Н., Моргунов В. В., Трищ Р. М.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Черняк Олена Миколаївна: ORCID: 0000-0001-6167-8809; olena-cherniak@ukr.net; аспірантка кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Моргунов Володимир Вікторович: ORCID: 0000-0002-8681-1941; volodymyr.morgunov@gmail.com; кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики, електротехніки та електроенергетики; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Трищ Роман Михайлович: ORCID: 0000-0003-3074-9736; trich_@ukr.net; доктор технічних наук; завідувач кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

В статті приводиться приклад застосування радіаційних технологій, і в частині прискорених електронів. Визначено і обґрунтовано необхідність використання методу Монте-Карло. Проведено аналіз і вибір можливих програмних комплексів для моделювання проходження іонізуючого випромінювання через речовину з використанням методу Монте-Карло. Стаття містить аналіз параметрів випромінювання радіаційної установки з прискорювачем ЛУ-10. Визначено фізичні процеси при проходженні прискорених електронів через речовину, які повинні бути включені в моделювання. Також визначено технологічні параметри, які необхідно ввести в моделювання. В разі розгляду прискорених електронів в програмний код були включені наступні фізичні процеси: розпад, фотоэффект, комптонівське розсіювання, утворення пар, релєївське розсіювання, іонізація, гальмівне випромінювання, багаторазове розсіювання.

Ключевые слова: іонізуюче випромінювання; прискорені електрони; лінійний прискорювач електронів, чисельне моделювання, метод Монте-Карло.

Черняк О. М., Моргунов В. В., Трищ Р. М. «Застосування методу Монте-Карло для визначення технологічних параметрів радіаційної обробки прискореними електронами».

У статті наводиться приклад застосування радіаційних технологій, та зокрема прискорених електронів. Визначено і обґрунтовано необхідність використання методу Монте-Карло. Проведено аналіз і вибір можливих програмних комплексів для моделювання проходження іонізуючого випромінювання через речовину з використанням методу Монте-Карло. Стаття містить аналіз параметрів випромінювання радіаційної установки з прискорювачем ЛУ-10. Визначено фізичні процеси при проходженні прискорених електронів через речовину, які повинні бути включені в моделювання. Також визначено технологічні параметри, які необхідно ввести в моделювання. У разі розгляду прискорених електронів в програмний код були включені наступні фізичні процеси: розпад, фотоэффект, комптонівське розсіювання, утворення пар, релєївське розсіювання, іонізація, гальмівне випромінювання, багаторазове розсіювання.

Ключові слова: іонізуюче випромінювання; прискорені електрони; лінійний прискорювач електронів, чисельне моделювання, метод Монте-Карло.

Cherniak E., Morgunov V., Trishch R. “Application of the Monte-Carlo method for definitions of technological parameters of radiation processing by accelerated electrons”.

The article provides an example of application of radiation technology and, in particular accelerated electrons. Identified and justified the need to use Monte Carlo. The analysis and selection of possible software for modeling complexes of ionizing radiation passing through the substance using a Monte Carlo method. The article contains an analysis of radiation parameters of a radiation installation with an accelerator ЛУ-10. The determine the physical processes during the passage of accelerated electrons through a substance that should be included in the simulation. Also defined the process parameters that must be entered into the simulation. In cases where the accelerated electrons in the source code included the following physical processes: the decay, the photoelectric effect, Compton scattering, pair formation, Rayleigh scattering, ionization, bremsstrahlung, multiple scattering.

Key words: ionizing radiation; accelerated electrons; linear electron accelerator; numerical modeling; the Monte Carlo method.

1. Актуальность работы

Радиационные технологии находят свое применение во многих сферах жизнедеятельности человека. Область применения радиационных технологий, и в частности, ускорителей электронов очень широка [1]:

1. Радиационное модифицирование материалов:
 - а. Производство кабелей и проводов с радиационно-сшитой изоляцией.
 - б. Изготовление упрочненных и термоусаживающихся изделий.
 - в. Вулканизация эластомеров и изделий из них.
2. Радиационная полимеризация:
 - а. Радиационное отверждение покрытий.
 - б. Радиационная прививочная полимеризация.
 - в. Производство модифицированных пористых материалов.
3. Радиационная деструкция (получение корма и кормовых добавок из целлюлозосодержащих отходов, регулирование молекулярной массы полимеров, деструкция тефлона и резин из бутылкаучука).
4. Радиационная стерилизация медицинских изделий.
5. Использование радиационных технологий в экологии:
 - а. Радиационная очистка природной воды.
 - б. Радиационная очистка сточных вод и осадков сточных вод.
 - в. Радиационная очистка выбросных газов.
 - г. Радиационная обработка твердых отходов.
6. Радиационная обработка пищевых продуктов.
7. Радиационно-физические технологии (ионная имплантация (на ускорителях ионов), легирование полупроводников с помощью ядерных реакций (под действием тепловых нейтронов), модифицирование полупроводниковых материалов и изделий, изготовление полимерных мембран и резисторов для литографии, изменение окраски стекла и кристаллов, тепловое действие мощных электронных пучков).
8. Применение ускорителей электронов в медицине:
 - а. Лучевая терапия злокачественных новообразований.
 - б. Лучевая терапия неопухолевых заболеваний.

- в. Интраоперационная лучевая терапия.
9. Применение ускорителей электронов в досмотровых комплексах.
 10. Применение электронных ускорителей для дефектоскопии.
 11. Применение ионизирующего излучения для сохранения музейных экспонатов.

2. Результаты исследования

Одним из основных критериев радиационной обработки является поглощенная доза (D , Грей), которая равна отношению средней энергии d_E , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе d_m вещества в этом объеме:

$$D = d_E/d_m.$$

Для любого технологического процесса радиационных технологий для достижения требуемого эффекта поглощенная доза должна быть не меньше минимальной D_{min} , и, чтобы не нарушать свойств облучаемого объекта, не больше D_{max} . Значения D_{min} и D_{max} определяются экспериментально для каждого процесса радиационных технологий. В ходе радиационной обработки поглощенная доза контролируется при помощи дозиметров. Но, в некоторых случаях, применение дозиметров невозможно. Такие ситуации возможны, например, при радиационной обработке музейных экспонатов, при лучевой терапии, при очистке минеральных, сточных вод и дымовых газов и т.п. В таких случаях для расчета поглощенной дозы обрабатываемых объектов могут применяться численные методы расчета, например метод Монте-Карло.

Существуют несколько программных оболочек (software toolkit) для моделирования прохождения ионизирующего излучения через вещество. Сравнительный анализ программных комплексов приведен в табл. 1.

Для моделирования взаимодействия ускоренных электронов с веществом был выбран GEANT4 по следующим причинам:

- Программирование в среде GEANT4 осуществляется на современном языке программирования высокого уровня C++;
- GEANT4 является многопоточным программным комплексом (в LINUX версии).
- В GEANT4 возможна загрузка сложных геометрических объектов через доступные C++ библиотеки.

Для проведения моделирования в вышеупомянутых программных комплексах, и в частности, GEANT4 пользователю необходимо задать следующие сведения, параметры и данные:

- характеристика источника ионизирующего излучения (тип, мощность, активность, энергия излучения и др.);
- сведения о камере облучения (геометрические размеры, материал стен) и, если есть, о конвейере (геометрические размеры, материал, скорость и др.);
- сведения об облучаемом объекте (геометрические размеры, материал, координаты расположения в камере облучения и др.).

Все современные ускорители в зависимости от формы траектории ускоряемых частиц делятся на две большие группы: линейные и циклические [3].

Нерезонансными линейными ускорителями, в которых для ускорения используется постоянное электростатическое поле, являются импульсные высоковольтные трансформаторы, высоковольтные установки типа Кокрофта-Уолтона, электростатический генератор Ван де Граафа и др. К таким ускорителям относится и рассматриваемый в данной работе линейный ускоритель электронов (ЛУЭ) ЛУ-10. Характеристики ЛУЭ ЛУ-10 приведены в табл. 2 [4].

Таблиця 1 – Сравнение программных комплексов для моделирования прохождения ионизирующего излучения через вещество

Свойства	MCNPX	GEANT4	FLUKA	MARS	PHITS
Разработчик	LANL	CERN IN2P3 INFN KEK SLAC TRIUMF ESA	CERN INFN	FNAL	JAEA RIST GSI Chalmers Univ.
Язык программирования	Fortran 90/C	C++	Fortran 77	Fortran 95/C	Fortran 77
Многопоточность	yes	yes (only Linux version)	no	no	no
Web Site	https://mcnpx.lanl.gov/	https://geant4.web.cern.ch/geant4/	http://www.fluka.org/fluka.php	http://www-ap.fnal.gov/MARS/	http://phits.jaea.go.jp/
Стоимость	Free	Free	Free	Free	Free
CAD	STEP	STEP	No	No	No
Частиц	34	68	68	41	38
Заряженные частицы Потери энергии Рассеяние Stragglng XTR/Cherenkov	CSDA Bethe-Bloch Rossi Vavilov No	CSDA Bethe-Bloch Lewis Urban Yes	CSDA Bethe-Bloch Moliere Custom No/yes	CSDA Bethe-Bloch Moliere Custom No	CSDA Bethe-Bloch Vavilov No
Барионы Нейтроны Low High Протоны Low High Other	Cont. (ENDF) Models	Cont. (ENDF) Models		Cont. (ENDF) Models	Cont. (ENDF) Models
Лептоны Электроны Мюоны Нейтрино Другие	ITS 3.0 CSDA/decay Production Decay	EEDL, EADL Models Production Decay	Custom Models Models Decay	Custom Models Models Models	ITS 3.0 CSDA/decay Models Models
Мезоны	Models	Models	Models	Models	Models
Фотоны Optical x-ray/ γ Фотоядерные	No ITS 3.0 Libraries (IAEA) CEM	Yes EPDL97, EADL CHIPS	Yes Custom, EPDL97 PEANUT VMDM	No Custom Custom CEM	No ITS 3.0 No
Ионы	ISABEL LAQGSM (2.6.D)	AAM EDM BLIC	RQMD-2.4 DPMJET-3	LAQGSM	JQMD JAMQMD > 3 GeV/u

Таблица 2 – Параметры излучения радиационной установки с ускорителем ЛУ-10

Электронное излучение	
Энергия электронов, МэВ	8...18
Номинальное значение энергии электронов, МэВ	10
Длительность импульса, мкс	3.5
Частота следования импульсов пучка, Гц	12.5...300
Ток пучка (среднее значение), мкА	до 1000
Частота сканирования пучка, Гц	3
Геометрические размеры пучка (на выпускном окне), см	2×30
Неравномерность линейной плотности потока электронов вдоль рабочей зоны развертки пучка, % не более	±3
Мощность поглощенной дозы электронного излучения в дакриле, Гр/с	
Тормозное излучение	
Поток энергии (мощность) тормозного излучения (ТИ), кВт	до 1.6
Геометрические размеры потока ТИ (на конвертере), см	3×35
Мощность поглощенной дозы ТИ в дакриле, Гр/с	до 1.0

Кроме введения в программный код характеристики источника ионизирующего излучения необходимо задать физические процессы, происходящие во время прохождения ионизирующего излучения через вещества, свойственное данному виду излучения.

При прохождении ускоренных электронов через вещество происходят следующие физические процессы, которые должны быть включены в моделирование:

- ионизационные потери;
- радиационные потери;
- эффект Комптона;
- фотоэффект;
- рождение пар;
- рэлеевское рассеяние.

Эти физические явления необходимо учитывать при проведении моделирования.

Одним из важных факторов при численном моделировании радиационных технологий является внедрение в программный код сложных геометрических объектов. Эта задача решается при помощи сторонних C++ библиотек: ASSIMP, TETGEN. Пример применения этих библиотек для внедрения в программный код представлен на рис. 1

В результате численного моделирования будут получены значения следующих технологических параметров:

1. D_{min} ;
2. D_{max} ;
3. время обработки;
4. карта доз и карта мощности доз.



а) Оригинальное изображение скульптуры б) импортированный CAD-файл скульптуры в программный код

Рис. 1 – Пример применения библиотек для внедрения в программный код

Выводы

После рассмотрения возможных программных комплексов для моделирования прохождения ионизирующего излучения через вещество был выбран GEANT4. Операционная система - Linux (поскольку только версия Linux GEANT4 имеет режим многопоточности). CADMesh был выбран для импорта CAD-файлов в программный код на основе GEANT4. Для упрощения сложных CAD-файлов использовался Meshlab. Определены технологические параметры, которые необходимо ввести в моделирование. Были выбраны физические процессы и частицы, участвующие в моделировании. В случае рассмотрения ускоренных электронов в программный код были включены следующие физические процессы: распад, фотоэффект, комптоновское рассеяние, образование пар, рэлеевское рассеяние, ионизация, тормозное излучение, многократное рассеяние.

Список использованных источников:

1. Алимов А. С. Практическое применение электронных ускорителей / А. С. Алимов. – Москва: Препринт НИИЯФ МГУ № 2011-13/877, 2011. – 41 с.
2. Allison, J. Recent developments in Geant4 / J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, P. Arce, M. Asai, T. Aso, et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. – 2016. – 835. – P. 186–225.
3. Ливингстон, Стенли М. Ускорители: Установки для получения заряженных частиц больших энергий / Пер. с англ. Э. Л. Бурштейна ; Под ред. [и с предисл.] М. С. Рабиновича. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1956. – 148 с.
4. Борискин В.Н. Развитие радиационных технологий и испытаний в НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ / В.Н. Борискин, С.А. Ванжа, В.Н. Верещака и др. // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2008. – № 5. – С. 150-154.
5. Poole, C. M., Cornelius, I., Trapp, J. V., & Langton, C. M. (2012). A CAD interface for GEANT4. *Australasian physical & engineering sciences in medicine*, 35(3), 329-334.

References

1. Alimov, A 2011, *Prakticheskoye primeneniye elektronnykh uskoriteley*, Preprint NIIYaF MGU, Moskva.
2. Allison, J, Amako, K, Apostolakis, J, Arce, P, Asai, M & Aso, T 2016, 'Recent developments in Geant4', *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, iss. 835, pp. 186–225.
3. Livingston, Stenli M 1956, *Uskoriteli: Ustanovki dlya polucheniya zaryazhennykh chastits bolshikh energiy*, Izd-vo inostr. lit., Moskva.
4. Boriskin, V, Vanzha, S & Vereshchaka, V 2008, 'Razvitiye radiatsionnykh tekhnologiy i ispytaniy v NIK «Uskoritel» NNTs KhFTI', *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*, no. 5, pp. 150-154.
5. Poole, C, Cornelius, I, Trapp, J & Langton, C 2012, 'A CAD interface for GEANT4', *Australasian physical & engineering sciences in medicine*, no. 35(3), pp. 329-334.

Стаття надійшла до редакції 16 листопада 2017 р.