

УДК 614.876

**ПРИМЕНЕНИЕ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ
БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ****С.А. Золотов^{1,2}, У.А. Близнюк^{1,2}, А.П. Черняев^{1,2}, Ф.Р. Студеникин^{1,2}, П.Ю. Борщевская^{1,2},
А.Д. Никитченко¹, Н.Д. Кречетов¹, С.А. Соколов¹, И.А. Родин^{1,3}**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский Институт
Ядерной Физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия

Радиационная обработка является удобной и универсальной технологией для обработки различных биологических объектов и материалов. Возможности ее применения весьма разнообразны – от ингибирования прорастания корнеплодов и полного подавления патогенной микрофлоры в пищевой продукции до радиационной модификации полимеров и повышения износостойкости металлов, очистки сточных вод и окрашивания минералов [1–7]. При этом технология является экологически чистой, и её безопасность подтверждена многолетними международными исследованиями [8–13].

Метод радиационной обработки биологических объектов базируется на ионизации и возбуждении атомов путем передачи веществу энергии излучения. В результате облучения возникают продукты радиолиза, которые далее инициируют химические реакции, образование свободных радикалов, реакции радиолиза воды [14, 15]. Образующиеся химически активные соединения оказывают воздействие на бактериальные клетки, вызывая цепные реакции окисления липидов мембран и разрывы нитей ДНК в ядрах, подавляя тем самым размножение и рост патогенных микроорганизмов, а при определенных условиях приводят к их непосредственной гибели.

Для проведения радиационной обработки разрешено использовать γ – излучение, испускаемое радиоизотопами⁶⁰ Co и¹³⁷ Cs, тормозное излучение с энергией до 5 МэВ (до 7.5 МэВ в США) и пучки ускоренных электронов с энергией до 10 МэВ [16, 17]. Такой выбор верхнего энергетического предела обусловлен тем, что в данном диапазоне энергий не происходит ядерных реакций с наработкой нестабильных изотопов, т. е. в процессе обработки не возникает наведенной радиоактивности.

В большинстве центров радиационной обработки сегодня используются ускорители электронов [14]. Это обусловлено тем, что в сравнении с гамма – установками использование ускорителя дает возможность варьирования тока пучка и энергии электронов [18]. Изменяя ток пучка, можно изменять интенсивность излучения и, соответственно, мощность дозы, поглощаемой обрабатываемым объектом. Изменение энергии электронов позволяет контролировать глубину проникновения электронов в объект в зависимости от цели облучения.

Поглощенная доза – это один из ключевых факторов, определяющих воздействие ускоренных электронов на вещество. Величина дозы облучения представляет собой отношение энергии, поглощенной объемом, к его массе. При этом диапазон доз, применяемый в радиационной обработке электронами, очень широк. Так, например, при модификации полимеров используются дозы от 1 кГр до 400 кГр [19]. Для дезинсекции зерна, круп и специй требуются дозы до 0.2 кГр [20]. Для стерилизации древесины, деструкции целлюлозы и обработки старых архивов используются дозы до 10 кГр [21]. Стерилизация пищевых продуктов, медицинских изделий и материалов, используемых в трансплантологии, происходит при дозах до 35 кГр [22]. При облучении пищевых продуктов доза варьируется от 0.2 кГр для ингибирования проростков дозой до 50 кГр для стерилизации продуктов [23]. Обработка биоотходов для инактивации широкого спектра вирусов и бактерий проводится в дозах до 1 МГр, что является максимальной дозой, используемой для контроля загрязнения органических объектов [24].

Вторым важным фактором, определяющим воздействие ускоренных электронов на вещество, является однородность обработки, определяемая как отношение минимального значения поглощенной дозы D_{\min} к максимальному значению поглощенной дозы D_{\max} в объеме объекта: $K = D_{\min} / D_{\max}$ [1]. Из-за характера глубинного распределения дозы по всему облучаемому объекту, в подавляющем большинстве случаев неизбежна неравномерность облучения, т. е. $K < 1$. Неравномерность распределения поглощенной дозы по объему облучаемого объекта влечет за собой неравномерность

эффекта облучения: переоблучение может вызвать разрушение материала или нежелательные изменения его физико-химических свойств, а недооблучение мешает достичь желаемого эффекта [25]. Поэтому распределение поглощенной дозы по облучаемому объекту должно строго контролироваться. Современные дозиметрические методы определения интегральной дозы, поглощенной объектом, и его дозового распределения при промышленном облучении являются трудоемкими и дорогостоящими [26]. Дозиметрия требует регулярного повторения и калибровки в связи с возможными изменениями спектра электронного пучка в процессе работы промышленного ускорителя [27].

Альтернативой для получения информации о дозовом распределении по глубине биологических объектов для планирования радиационной обработки выступает применение компьютерного моделирования [28]. Распределение дозы в различных объектах может быть смоделировано с помощью транспортных кодов, таких как EGSnrc [29], PENELOPE [30], MCNPx [31], GEANT4 [32]. При этом если коды EGSnrc и PENELOPE ограничены в своем применении объектами простой геометрии, то транспортные коды MCNPX и GEANT4 более широко используются в промышленности, так как являются более комплексными инструментами для моделирования более широкого спектра физических процессов, представляющих собой взаимодействие электронов, фотонов, протонов и нейтронов. Код MCNPX используется в ядерной медицине, радиационной безопасности, разработке ускорителей, моделировании промышленного облучения биологических объектов и материалов. GEANT4 на сегодняшний день является наиболее полным набором инструментов для моделирования прохождения частиц через вещество. В отличие от других кодов, GEANT4 моделирует любую геометрию объектов и источника излучения с любым энергетическим спектром, а также отслеживает физические процессы, выбранные для конкретного метода облучения и объектов, что делает GEANT4 наиболее гибким транспортным кодом с широкой областью применения.

Несмотря на то, что для моделирования взаимодействия ионизирующих излучений с веществом получили распространение транспортные коды, их использование для планирования радиационной обработки биологических объектов в промышленности имеет некоторые ограничения. Так, например, для работы с транспортным кодом пользователь должен обладать достаточно высокими навыками и компетенциями не только в области ядерной физики, но и в области программирования. Кроме того, для получения точных результатов и набора удовлетворительной статистики событий потребуются компьютерное моделирование, которое может занимать от нескольких часов до нескольких дней в зависимости от расчетной мощности используемого компьютера.

Представляется интересным разработка программы, позволяющей на основе базы данных, полученной с использованием предварительно выполненного моделирования Geant4, получать за несколько секунд распределение поглощенной дозы по глубине в объекте с заданными размерами и плотностью. Такая программа позволит существенно сократить время и сложность планирования радиационной обработки.

Примером такой программы может быть разработанный специалистами НИИ Ядерной Физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова софт DosePreview [33, 34]. DosePreview позволяет получать распределение поглощенной дозы по глубине, создаваемые при одностороннем облучении электронами с энергией от 100 кэВ до 20 МэВ в водной, алюминиевой и полимерной средах. Также DosePreview позволяет получать распределение поглощенной дозы по глубине при облучении не только пучками моноэнергетических электронов, но и пучками с заданным спектром энергии. Сравнение результатов, полученных с помощью DosePreview, с результатами, полученными с привлечением инструментария Geant4, показало их отклонение друг от друга не более 3 % во всем диапазоне рассматриваемых энергий, толщин и материалов [34].

Необходимым условием успешного облучения электронными пучками является полная информация о пространственном распределении поглощенной дозы в облучаемом объекте, которое определяется как свойствами облучаемого объекта (т.е. геометрией, элементным составом, плотностью), так и параметрами источника, в первую очередь энергетическим спектром пучка [35]. Современные подходы к определению энергетических спектров ускорителей основаны на прямом измерении энергии электронов с помощью специальной аппаратуры [36] и на косвенных методах, основанных на реконструкции спектров по экспериментально измеренным данным [37].

В рамках промышленного комплекса первый путь является весьма затруднительным, поэтому применяют второй. В исследовании [38] авторы предлагают алгоритм, позволяющий рассчитать распределение поглощенной дозы в однородном материале при его облучении пучком ускоренных электронов, если известно распределения поглощенной дозы, создаваемые этим же пучком в другом материале. Опорные данные рассчитываются с помощью компьютерного моделирования и затем используются для решения обратной задачи с применением регуляризирующих операторов. Интересной отметить, что алгоритм позволяет уточнять экспериментально измеренные глубинные дозовые распределения. Так, проверка алгоритма на данных с искусственно внесенной 30 % – погрешностью показала восстановление изначального дозового распределения с погрешностью не более 5 % на значимых глубинах.

Заключение

Обработка биологических объектов пучками ускоренных электронов одной из наиболее широко изученных технологий XX века. Анализ различных областей применения электронных пучков показывает, что с каждым годом технология распространяется все больше. Принимаются новые стандарты [39], вводятся поправки в существующие законы [40]. Будущее пищевого облучения будет зависеть от информированности общественности и лучшего понимания той роли, которую этот процесс может сыграть в борьбе с патогенами, передающимися с пищей. Принятие облучения потребителями – это вопрос просвещения и правильной коммуникации, снижающей несправедливое представление об облучении продуктов питания как о ядерной технологии [41]. Маркетинговые исследования показали, что все большее число потребителей готовы покупать облученные продукты, если они должным образом проинформированы о процессе и его влиянии на продукты питания [42]. Успешность внедрения технологии в существующие производственные процессы напрямую зависит от кооперации промышленности и научных коллективов. Имеющийся фундамент в виде многолетних исследований обещает безболезненное внедрение радиационной обработки в индустрию и повышение эффективности пищевой отрасли.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ
в рамках научного проекта № 22-63-00075.*

Литература

1. Trends in Radiation Sterilization of Health Care Products. Vienna, International Atomic Energy Agency; July 2008. ISBN 978–92–0–111007–7
2. Abou Elmaaty T, Okubayashi S, Elsisy H, Abouelenin S. Electron beam irradiation treatment of textiles materials: a review. *Journal of Polymer Research*. 2022; 29:117. DOI: 10.1007/s10965–022–02952–4
3. Manaila E, Craciun G, Ighigeanu D, Lungu IB, Dumitru Grivei MD, Stelescu MD. Degradation by Electron Beam Irradiation of Some Composites Based on Natural Rubber Reinforced with Mineral and Organic Fillers. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(13):6925. DOI: 10.3390/ijms23136925
4. Working Material Produced by the International Atomic Energy Agency. In: Radiation Effects on Polymer Materials Commonly Used in Medical Devices. Report of the 1st RCM for CRP F2303; 15–19 November 2021; Vienna, Austria; 2021. 170 p.
5. Chulikova N, Malyuga A, Borshchegovskaya P, Zubritskaya Y, Ipatova V, Chernyaev A et al. Electron Beam Irradiation to Control Rhizoctonia solani in Potato. *Agriculture*. 2023; 13:1221. DOI: 10.3390/agriculture13061221
6. Bliznyuk U, Avdyukhina V, Borshchegovskaya P, Bolotnik T, Ipatova V, Nikitina Z et al. Effect of electron and X-ray irradiation on microbiological and chemical parameters of chilled turkey. *Scientific Reports*. 2022; 12:750. DOI: 10.1038/s41598–021–04733–3
7. Hossain K, Maruthi YA, Das NL, Rawat KP, Sarma KSS. Irradiation of wastewater with electron beam is a key to sustainable smart/green cities: a review. *Applied Water Science*. 2018; 8(1). DOI: 10.1007/s13201–018–0645–6
8. Вторичное излучение ускорителей электронов / В.П. Ковалев М.: Атомиздат, 1979
9. Radiological safety aspects of the operatin of electron linear accelerators / Swanson, William P // IAEA Technical reports series № 188 – 1979
10. The development of X-ray machines for food irradiation (proceedings of a consultants' meeting) Vienna IAEA., Austria 16–18 October 1995.
11. Potential Induced Radioactivity in Materials Processed with X-ray Energy Above 5 MeV Hervé Michel, Thomas Kroc, Brian J. McEvoy, Deepak Patil, Pierre Reppert, and Mark A. Smith Industrial Sterilization: Challenging the Status Quo, Driving for Continuous Improvement Spring 2021
12. Наведенная активность вольфрамовой мишени на ускорителе электронов энергией 10 МэВ / Тетерев Ю.Г., Белов А.Г. // Атомная энергия, Т. 91, вып. 3, сентябрь 2001
13. Natural and induced radioactivity in food. IAEA-TECDOC-1287. Vienna: IAEA. 2002. 136 p. 19.

14. Черняев А.П. Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина / Черняев А.П. // Москва: Издательство Московского университета, 2019. – 231 с.
15. Дозиметрический контроль при проведении радиационной обработки пищевых продуктов / Павлов А.Н., Санжарова Н.И., Черняев А.П. и др. // в журнале Радиационная гигиена, том 13, № 4, с. 40–50, 2020. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-4-40-50>
16. ISO 11137-3-2006 Sterilization of health care products Radiation Part 3: Guidance on dosimetric aspects. Стерилизация медицинской продукции. Облучение. Часть 3. Руководство по вопросам дозиметрии.
17. ISO 14470-2011 Food irradiation – Requirements for the development, validation and routine control of the process of irradiation using ionizing radiation for the treatment of food. Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением.
18. Shvedunov VI et al. Electron accelerators design and construction at Lomonosov Moscow State University. Radiation Physics and Chemistry. 2019; 159:95–100. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2019.02.044
19. Sabharwal S. Electron beam irradiation applications. In: Proceedings of PAC2013; Pasadena, CA USA; 2013. p. 745–748
20. Физико-механические меры борьбы со свредителями хлебных запасов [Электронный ресурс] // www.rsnso.ru: управление Россельхознадзора по Свердловской области URL: <http://www.rsnso.ru/documents/publications/?n=310> (дата обращения 31.07.2023)
21. Технологии на базе электронных пучков [Электронный ресурс] // inp.nsk.su: Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН URL: http://inp.nsk.su/~tararysh/accel/el_pu_r.html#ET16 (дата обращения 31.07.2023)
22. Working Material Produced by the International Atomic Energy Agency. In: Radiation Effects on Polymer Materials Commonly Used in Medical Devices. Report of the 1st RCM for CRP F2303; 15–19 November 2021; Vienna, Austria; 2021. 170 p.
23. Vega-Hernández MÁ, Cano-Díaz GS, Vivaldo-Lima E, Rosas-Aburto A, Hernández-Luna MG, Martínez A et al. A Review on the Synthesis, Characterization, and Modeling of Polymer Grafting. Processes. 2021; 9(2):375. DOI: 10.3390/pr9020375
24. Alimov S. Practical applications of electron accelerators. Preprint SINP MSU, Moscow. 2011–13/877. 41 p.
25. Development of electron beam and x ray applications for food irradiation. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2022. 372 p. (TECDOC series, ISSN 1011-4289; no. 2008)
26. Helt-Hansen J, Miller A, Sharpe P, Laurell B, Weiss D, Pageau G. Dμ – A new concept in industrial low-energy electron dosimetry. Radiation Physics and Chemistry. 2010; 79(1):66–74. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2009.09.002
27. Studenikin FR, Bliznyuk UA, Chernyaev AP, Krusanov GA, Nikitchenko AD, Zolotov SA, Ipatova VS. Electron beam modification for improving dose uniformity in irradiated objects. The European Physical Journal Special Topics. 2023. DOI: 10.1140/epjs/s11734-023-00886-6
28. IAEA Radiation Technology Series No. 1. Use Of Mathematical Modelling In Electron Beam Processing: A Guidebook. International Atomic Energy Agency Vienna, 2010.
29. Kawrakow I. The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. Manual – Guides. NRC: Canada, 2001–2021. 2023. 323 p.
30. Nuclear Energy Agency. PENELOPE 2018: A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport. In: Workshop Proceedings; 28 January – 1 February 2019; Barcelona, Spain; 2019. 420 p. DOI: 10.1787/32da5043-en
31. The MCNP® Code [Internet]. 2023. <https://mcnp.lanl.gov> [Accessed: 2023-07-23]
32. Allison J, Amako K, Apostolakis J, Arce P, Asai M, Aso T et al. Recent developments in Geant 4. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2016; 835:186–225. DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125
33. DosePreview [Электронный ресурс] // <https://industrial-rt.ru>: ООО «Промышленные радиационные технологии» URL: <https://industrial-rt.ru/dosepreview> (дата обращения 31.07.2023)
34. Студеникин Ф.Р., Черняев А.П., Близняк У.А., Золотов С.А., Борщевская П.Ю., Антипина Н.А., Николаева А.А., Кречетов Н.Д., Соколов С.А. Расчет распределения поглощенной дозы по глубине в однородных объектах при радиационной обработке ускоренными электронами // Сборник тезисов докладов под редакцией профессора В.В. Белокурова, издательство Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва), 2023, с. 170–172
35. Li G, Wu A, Lin H, Wu Y. Electron spectrum reconstruction as nonlinear programming model using micro-adjusting algorithm. In: Peng Y, Weng X. (eds) 7th Asian-Pacific Conference on Medical and Biological Engineering. IFMBE Proceedings; Berlin, Heidelberg: Springer; 2008; 19. DOI: 10.1007/978-3-540-79039-6_112
36. Kozyrev AV, Kozhevnikov VY, Vorobyov MS, Baksht EK, Burachenko AG, Koval NN, Tarasenko VF. Reconstruction of electron beam energy spectra for vacuum and gas diodes. Laser and Particle Beams. 2015; 33(02):183–192. DOI: 10.1017/s0263034615000324
37. Torres-Díaz J, Grad GB, Bonzi EV. Measurement of linear accelerator spectra, reconstructed from percentage depth dose curves by neural networks. Physica Medica: European Journal of Medical Physics. 2022; 96:81–89. DOI: 10.1016/j.ejmp.2022.02.019
38. Bliznyuk UA, Borshchegovskaya PYu, Zolotov SA, Ipatova VS, Krusanov GA, Nikitchenko AD et al. Reconstruction of Depth Dose Distributions in Materials Created by Electron Beam. Physics of Particles and Nuclei. 2023; 54(4): 575–580. DOI: 10.1134/S1063779623040081
39. ГОСТ 33339-2015. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. РАДИАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ. Основные технические требования. Radiation processing of food products. General specifications. М., 2017, 7 с.
40. Федеральный закон от 18.03.2023 № 67-ФЗ "О внесении изменений в статью 16 Федерального закона "О радиационной безопасности населения" и Федеральный закон "О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами"
41. Teisi, M.F., Fein, S.B., & Levy, A.S. (2009). Information effects on consumer attitudes toward three food technologies: organic production, biotechnology and irradiation. Food Quality and Preference, 20, 586–596.
42. Eustice, R.E., & Bruhn, C.M. (2006). Consumer acceptance and marketing of irradiated foods. In C.H. Sommers, & X. Fan (Eds.), Food irradiation research and technology (pp. 63e83). Oxford: Blackwell Publ., Ltd.