

УДК 539.1.043

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ПРИ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ

© 2021 г. У. А. Близнюк^{1,2}, Ф. Р. Студеникин^{1,2}, *, П. Ю. Борщеговская^{1,2},
Г. А. Крусанов³, В. С. Ипатова^{1,2}, А. П. Черняев^{1,2}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение

“Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр
имени А.И. Бурназяна” Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

*E-mail: f.studenikin@gmail.com

Поступила в редакцию 24.05.2021 г.

После доработки 01.06.2021 г.

Принята к публикации 28.06.2021 г.

Представлены результаты исследования зависимостей характеристик дозовых распределений в биообъектах от их толщины, плотности и энергии пучков электронов, применяемых при радиационной обработке пищевой продукции.

DOI: 10.31857/S0367676521100082

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день задачи обеспечения безопасности продуктов питания, повышения урожайности и улучшения качества пищевой продукции, продления сроков ее хранения с одновременным снижением потерь, уничтожения болезнетворных бактерий, вирусов и насекомых-вредителей на протяжении всего срока хранения являются одними из важнейших для обеспечения здоровья и жизнедеятельности людей по всему миру. Несмотря на развитие технологий логистики и промышленности, регулярно происходят вспышки вирусных эпидемий, сальмонеллеза и отравлений кишечной палочкой. Поэтому возникает необходимость не только наращивать темпы производства продукции, но и повышать эффективность технологических процессов ее хранения и стерилизации. Более 40 лет исследований показали, что обработка продуктов питания ионизирующим излучением является высокотехнологичным методом, который позволяет решать широкий спектр задач. Сейчас более чем в 69 странах мира действуют специализированные центры, ведущие обработку биообъектов и материалов в промышленном масштабе [1, 2].

Для радиационной обработки разрешено применять следующие виды ионизирующего излучения: γ -излучение радиоактивных источников ^{60}Co и ^{137}Cs , тормозное излучение, генерируемое электронными ускорителями с энергией не более 5 МэВ, и электронное излучение с энергией не более 10 МэВ. Выбор верхнего энергетического предела для электронов и фотонов связан с тем, что при указанных энергиях в продуктах отсутствует наведенная радиоактивность [3, 4]. В настоящее время для промышленной радиационной обработки все чаще используют ускорители электронов, что во многом связано с более высокой мощностью дозы, получаемой объектом, по сравнению с разрешенными радиоактивными источниками, и, как следствие, более высокой скоростью обработки продуктов питания [1–3].

По данным Всемирной организации здравоохранения пищевые продукты, обработанные дозами излучения, не превышающими 10 кГр, пригодны к употреблению [5, 6]. Обработка пищевых продуктов в дозах более 10 кГр может применяться для решения узкоспециализированных задач, например, таких как обработка продуктов питания, предназначенных для космонавтов и военнослужащих [7], а также больных с тяжелыми формами нарушения иммунной системы [8], где

необходимо обеспечить высокий уровень стерильности и безопасного хранения на протяжении длительного периода.

На данный момент в России действуют несколько специализированных центров радиационной обработки. В действующих центрах в качестве источников ионизирующего излучения используются промышленные ускорители электронов [9]. Плотность облучаемых продуктов питания варьируется от 0.3 (петрушка) до 1.6 г/см³ (сиропа). Как правило, продукты питания обрабатываются в коробках или контейнерах, размеры которых меняются от 10 × 20 × 30 до 40 × 40 × 80 см³.

Радиационную обработку продуктов питания необходимо осуществлять в “рабочем диапазоне” доз, который отличается для различных категорий продуктов [10–14]. Выход за пределы верхней границы требуемого диапазона приводит к изменениям биохимических и органолептических показателей продуктов питания [9–13]. Выход за пределы нижней границы может не привести к требуемым результатам радиационной обработки, например, стерилизации облучаемого объекта. Для некоторых пищевых продуктов обеспечение однородности обработки в пределах требуемого диапазона доз по всему обрабатываемому объему представляет достаточно сложную технологическую задачу. Факторы, которые приводят к неоднородности облучения ускоренными электронами, связаны как с нелинейностью распределения поглощенной дозы излучения по глубине продукта, так и с неравномерным распределением продуктов в упаковке, их сложной геометрией, структурой и химическим составом. Для соблюдения оптимального диапазона поглощенных доз по всему объему обрабатываемого объекта требуется подбор физических параметров радиационной обработки для каждого типа облучаемых объектов. Одним из таких параметров является энергия ускоренных электронов в пучке, варьируя которую можно изменять дозовые распределения в обрабатываемых объектах и повышать однородность облучения.

Целью данной работы является исследование зависимостей характеристик дозовых распределений в биообъектах от их толщины, плотности и энергии пучков электронов, применяемых при радиационной обработке пищевой продукции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе методом компьютерного моделирования рассчитывались глубинные распределения поглощенной дозы в параллелепипедах различной толщины и плотности, и оценивалась степень однородности облучения. Использован метод Монте-Карло, который применяется для решения широкого спектра задач в области физики

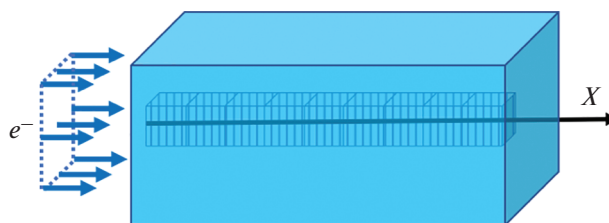


Рис. 1. Схема моделирования облучения объекта из воды в форме параллелепипеда пучком ускоренных электронов.

высоких энергий, ядерной и ускорительной физики [14–17]. Для реализации метода Монте-Карло использовался программный код GEANT 4, который представляет собой разработанный в CERN пакет программного обеспечения, позволяющий моделировать прохождение излучения через вещество.

Моделирование выполнялось для типичных условий обработки объектов на промышленных ускорителях электронов, которые генерируют пучки электронов с энергией от 4 до 10 МэВ, например, такая установка функционирует в центре разработки и внедрения технологий обработки ускоренными электронами “Теклеор” [9]. При моделировании сканирующий пучок ускорителя был заменен квадратным, так как данный ускоритель имеет низкую неоднородность распределения пучка по плоскости. Количество частиц в пучке составляло 10⁹.

Так как большинство продуктов питания имеют в своем составе большое процентное содержание воды, то в качестве объектов облучения использовались 14 водных однородных параллелепипедов, плотность которых варьировалась от 0.3 до 1.6 г/см³ с шагом 0.1 г/см³. Размер параллелепипедов составлял 40 × 40 × 80 см³, что соответствует облучению объектов в стандартной таре.

Для каждого из 14 параллелепипедов моделировалось облучение моноэнергетичными пучками электронов с энергией от 4 до 10 МэВ с шагом 0.5 МэВ. Пучок ускоренных электронов падает перпендикулярно поверхности параллелепипеда, схема облучения представлена на рис. 1. Для расчетов распределений поглощенной дозы по глубине вдоль оси X параллелепипед разбивался на ячейки с размерами 10 × 10 × 0.5 мм³, в которых фиксировалась поглощенная энергия.

Дозовые распределения пучков электронов удобно характеризовать следующими параметрами (рис. 2):

$$K = \frac{D_{input}}{D_{max}}$$
 — отношение значения дозы D_{input} на поверхности параллелепипеда (при моделирова-

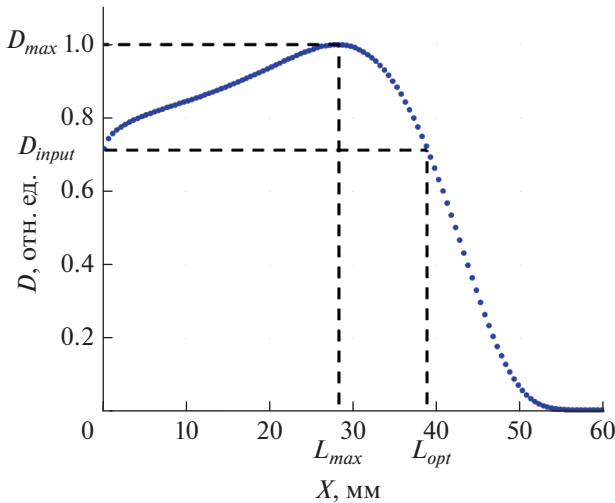


Рис. 2. Зависимость поглощенной дозы D от глубины X при обработке электронами с энергией 10 МэВ объекта из воды в форме параллелепипеда.

нии значение дозы в объеме первой ячейки сетки по оси X к максимальному значению поглощенной дозы в объеме параллелепипеда;

L_{max} — расстояние от поверхности параллелепипеда до координаты ячейки по оси X , в которой значение поглощенной дозы максимально;

L_{opt} — оптимальная толщина облучаемого объекта, равная расстоянию вдоль оси X между координатой первой ячейки и координатой ячейки, значение поглощенной дозы в которой совпадает с соответствующим значением дозы в первой ячейке.

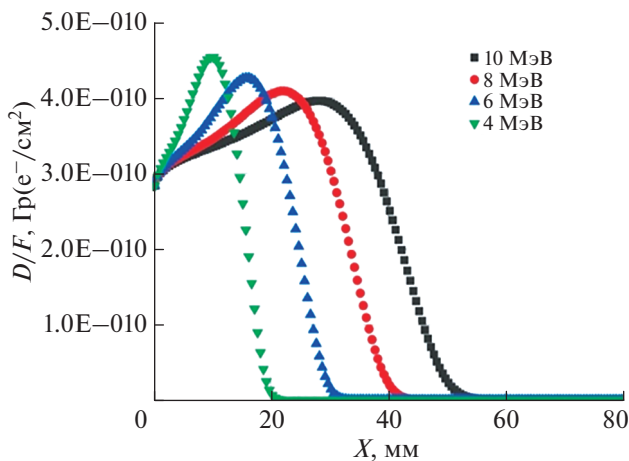


Рис. 3. Зависимость значений D/F в слоях объекта из воды плотностью 1 г/см^3 в форме параллелепипеда размером $40 \times 40 \times 80 \text{ мм}^3$ от глубины X при обработке электронами с энергией 4, 6, 8 и 10 МэВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлена зависимость отношения поглощенной дозы D к потоку падающих на поверхность параллелепипеда электронов F от глубины водного параллелепипеда, облучаемого с одной стороны пучками электронов с энергией 4, 6, 8 и 10 МэВ.

При увеличении энергии электронов от 4 до 10 МэВ значения L_{max} возрастают от 10.25 до 27.5 мм, а значения L_{opt} увеличиваются с 15 до 38.75 мм. Таким образом, для объекта заданной плотности, варьируя энергию пучка, можно изменять значение коэффициента K .

На рис. 4 представлена зависимость значения коэффициента K от энергии пучка ускоренных электронов для параллелепипедов с плотностью от 0.3 до 1.6 г/см^3 . Поверхностная доза слабо зависит от энергии электронов в диапазоне от 4 до 10 МэВ, в то время как максимум дозового распределения смещается вглубь с ростом энергии электронов, одновременно уменьшаясь по величине, что приводит к увеличению коэффициента K . Из рис. 4 видно, что значение коэффициента K в диапазоне энергий от 4 до 10 МэВ варьируется от 0.62 до 0.72 и практически не зависит от плотности облучаемого объекта для параллелепипедов с плотностью от 0.3 до 1.6 г/см^3 . Зависимости можно интерполировать функцией вида $K = a + b \times E$ с максимальной погрешностью интерполяции не более 1%. Однако, для меньших плотностей характер зависимости может сильно отличаться от линейной.

На рис. 5а и 5б представлена зависимость значений параметров L_{max} и L_{opt} от энергии пучка ускоренных электронов для параллелепипедов с плотностями 0.3, 0.6, 1.0 и 1.6 г/см^3 . Видно, что

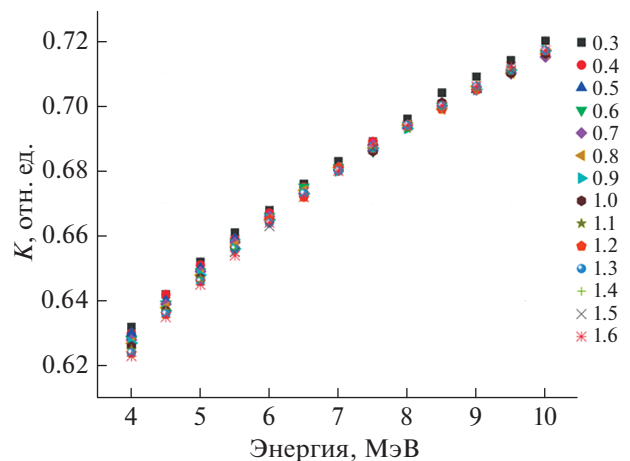


Рис. 4. Зависимость значений коэффициента K от энергии ускоренных электронов для объектов различной плотности.

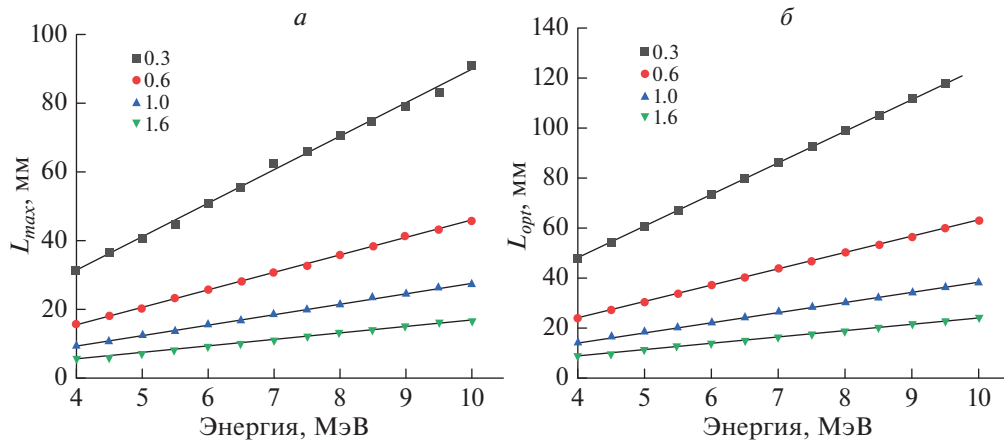


Рис. 5. Зависимость значений L_{max} от энергии ускоренных электронов для облучаемых объектов различной плотности (а). Зависимость значений L_{opt} от энергии ускоренных электронов для облучаемых объектов различной плотности (б).

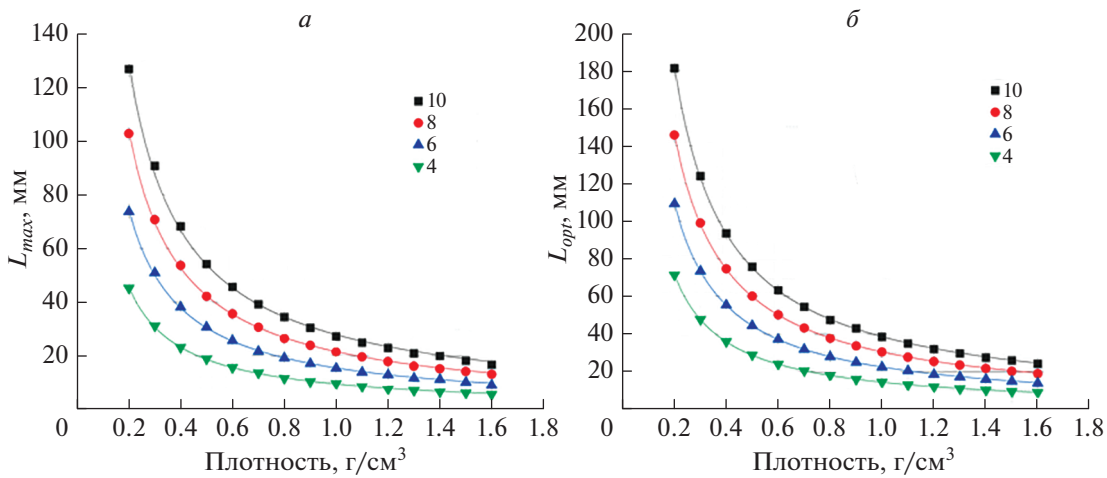


Рис. 6. Зависимость значений L_{max} от плотности при облучении параллелепипеда ускоренными электронами с энергией 4, 6, 8 и 10 МэВ (а). Зависимость значений L_{opt} от плотности при облучении параллелепипеда ускоренными электронами с энергией 4, 6, 8 и 10 МэВ (б).

чем выше энергия ускоренных электронов, тем больше значения L_{max} и L_{opt} , т.е. при больших энергиях можно обеспечить однородность облучения для обрабатываемого объекта большей толщины. При этом, чем ниже плотность облучаемого объекта, тем больше скорость роста величин L_{max} и L_{opt} . Зависимости L_{max} и L_{opt} также можно интерполировать линейной функцией с максимальной погрешностью интерполяции не более 1%.

На рис. 6а и 6б представлена зависимость значений параметров L_{max} и L_{opt} от плотности параллелепипеда для энергий электронов 4, 6, 8 и 10 МэВ. Видно, что при увеличении плотности параллелепипеда снижаются значения L_{max} и L_{opt} , что объясняется уменьшением пробега электронов в па-

раллелепипеде. Зависимости можно интерполировать функцией вида $L = c \times \rho^x$ с максимальной погрешностью интерполяции не более 2%.

При облучении объектов с плотностью в диапазоне от 0.3 до 0.6 г/см³ пучками ускоренных электронов с энергией от 4 до 10 МэВ для численных оценок параметров K , L_{max} и L_{opt} можно использовать следующие выражения с максимальной погрешностью интерполяции не более 2%:

$$L_{max} [\text{см}] = 3.04 \left[\frac{\text{МэВ} \cdot \text{см}^4}{\text{г}} \right] \times \rho^{-0.97} \left[\frac{\text{г}^3}{\text{см}} \right] \times E [\text{МэВ}] - 2.89 \left[\frac{\text{см}^4}{\text{г}} \right] \times \rho^{-0.81} \left[\frac{\text{г}^3}{\text{см}} \right], \quad (1)$$

$$L_{opt} [\text{см}] = 4 \left[\frac{\text{МэВ} \cdot \text{см}^4}{\rho} \right] \times \rho^{-0.96} \left[\frac{\text{г}^3}{\text{см}} \right] \times$$

$$\times E [\text{МэВ}] - 1.59 \left[\frac{\text{см}^4}{\rho} \right] \times \rho^{-0.46} \left[\frac{\text{г}^3}{\text{см}} \right], \quad (2)$$

$$K = 0.01 [\text{МэВ}^{-1}] \times E [\text{МэВ}] + 0.57, \quad (3)$$

где ρ – плотность облучаемого объекта, E – энергия ускоренных электронов в пучке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено компьютерное моделирование прохождения электронов с энергиями от 4 до 10 МэВ через объекты различной плотности (от 0.3 до 1.6 г/см³). Предложены простые аналитические выражения (1)–(3), которые позволяют провести быстрые предварительные оценки целесообразности облучения продукции данного типа на данной радиационно-технической установке.

Для проведения более точных расчетов необходимы дополнительные входные данные, такие как спектр пучка, точная геометрия облучения и размеры облучаемого объекта. В этом случае для проведения расчетов также может быть использован метод моделирования Монте-Карло, что позволит сократить количество пробных облучений пищевой продукции, экономить время и ресурсы при планировании радиационной обработки.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 20-32-90237, конкурс “Аспиранты”) и междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета “Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Санжарова Н.И., Козьмин Г.В., Павлов А.Н. и др. // Сб. докл. междунар. научн.-практ. конф. (Обнинск, 2018). С. 32.

2. Черняев А.П., Варзарь С.М., Белоусов А.В. и др. // ЯФ. 2019. Т. 82. № 5. С. 425.
3. Козьмин Г.В., Санжарова Н.И., Кибина И.И. и др. // Дост. науки и техн. АПК. 2015. № 5. С. 87.
4. Алимов А.С. // Препринт НИИЯФ МГУ № 13/877, 2011.
5. САС 2003. CODEX STAN 106-1983. Rev.1-2003. Codex Alimentarius Commission. General Standard for Irradiated Foods. Codex Alimentarius. Rome: FAO/WHO, 2003.
6. Wholesomeness of irradiated food. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. World Health Organization Technical Report Series 659. Geneva: World Health Organization, 1981.
7. High-dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO study group. WHO Technical Report Series 890. Geneva: World Health Organization, 1999.
8. Feliciano C.P., De Guzman Z.M., Tolentino L.M.M. et al. // Food Chem. 2014. V. 163. P. 142.
9. Shvedunov V.I., Alimov A.S., Ermakov A.N. et al. // Rad. Phys. Chem. 2019. V. 159. P. 95.
10. Черняев А.П., Авдюхина В.М., Близнюк У.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 4. С. 501; Chernyaev A.P., Avdyukhina V.M., Bliznyuk U.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. 2020. V. 84. No. 4. P. 385.
11. Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Студеникин Ф.П. и др. // Учен. зап. физ. фак-та МГУ. 2018. № 4. С. 1.
12. Черняев А.П., Авдюхина В.М., Близнюк У.А. и др. // Научном. технол. 2020. Т. 21. № 1. С. 40.
13. Авдюхина В.М., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю. и др. // Учен. зап. физ. фак-та МГУ. 2016. № 3. С. 163701.
14. Peivaste I., Alahyarizadeh Gh. // MAPAN-J. Metrol. Soc. I. 2019. V. 34. P. 19.
15. Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2016. V. 835. P. 186.
16. Bliznyuk U.A., Borshchegovskaya P.Y., Chernyaev A.P. et al. // IOP Conf. Ser. Earth Env. Sci. 2019. V. 365. Art. No. 012002.
17. Jongsoo K., Moreira G.R., Castell-Perez E.M. // J. Food Eng. 2015. V. 149. P. 137.

Characteristics of dose distributions of electron beams used in radiation processing of food products

U. A. Bliznyuk^{a,*}, P. Yu. Borshchegovskaya^{a,b}, F. R. Studenikin^{a,b}, G. A. Krusanov^c,
V. S. Ipatova^{a,b}, A. P. Chernyaev^{a,b}

^aMoscow State University, Department of Physics, Moscow, 119234 Russia

^bMoscow State University, Skobeltsyn Nuclear Physics Research Institute, Moscow, 119234 Russia

^cRussian State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, 123098 Russia

*e-mail: f.studenikin@gmail.com

We present the results of the research to determine the dependences of the characteristics of dose distributions in biological objects on their thickness, density, and energy of electron beams used in the radiation processing of food products.