

## КОМБИНАЦИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ПЛАСТИН РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ОДНОРОДНОСТИ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

*С. А. Золотов<sup>а, 1</sup>, У. А. Близнюк<sup>а, б</sup>, Ф. Р. Студеникин<sup>а, б</sup>,  
П. Ю. Борщegovская<sup>а, б</sup>, Г. А. Крусанов<sup>б</sup>*

<sup>а</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

<sup>б</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

Предложен метод модификации распределений поглощенной дозы по объему объектов, основанный на попеременном размещении алюминиевых поглотителей различной толщины между выходным окном ускорителя электронов и облучаемым объектом. Показано, что использование ограниченного набора пластин (9 шт.) с толщинами 0,5–9,5 мм позволяет повысить однородность радиационной обработки до 98% для моноэнергетических пучков электронов с энергией 5–10 МэВ без потери максимальной толщины облучаемых объектов. Также показаны аналогичные результаты для радиационной обработки электронами с энергетическим спектром действующего промышленного ускорителя.

A method of modifying the absorbed dose distributions over the volume of objects has been proposed, based on the alternating placement of aluminum absorbers of different thickness between the exit window of the electron accelerator and the irradiated object. It was demonstrated that the use of a limited set of plates (9 different ones) with thicknesses of 0.5–9.5 mm allows one to increase the radiation treatment uniformity up to 98% for monoenergetic electron beams with energies of 5–10 MeV without loss of maximum thickness of irradiated objects. Similar results were also shown for electron radiation treatment with the energy spectrum of an operating industrial accelerator.

PACS: 29.27.–Eg

### ВВЕДЕНИЕ

Сферы использования радиационной обработки постоянно расширяются, что позволяет применять их для модификации свойств различных материалов, стерилизации медицинских изделий и объектов трансплантологии, для подавления патогенных микроорганизмов, населяющих пищевую продукцию, и увеличения сроков ее хранения, стимуляции роста сельскохозяйственных культур и многого другого [1–4].

---

<sup>1</sup>E-mail: zolotov.sa15@physics.msu.ru

Для радиационной обработки медицинских изделий и продуктов питания в соответствии с международными стандартами ISO [6] разрешено применять следующие виды ионизирующего излучения:  $\gamma$ -излучение радиоактивных источников  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , тормозное излучение с энергией не более 5 МэВ, получаемое на ускорителях электронов, и пучки ускоренных электронов с энергией не более 10 МэВ [7]. На сегодня в большинстве современных центров промышленной обработки преимущественно используются ускорители электронов с энергией от 5 до 10 МэВ, что во многом связано с более высокой по сравнению с имеющимися источниками гамма-излучения мощностью дозы и, как следствие, более высокой скоростью обработки объектов [8].

При планировании обработки ускоренными электронами необходимо учитывать равномерность распределения поглощенной дозы по объему объекта, принимая во внимание нелинейный характер распределения поглощенной дозы по глубине. Показателем равномерности облучения принято считать отношение минимального значения поглощенной дозы  $D_{\min}$  к максимальному значению  $D_{\max}$  в объеме объекта [9]. Для большинства медицинских изделий однородность облучения может составлять порядка 50 %, однако для пищевой продукции, фармацевтических препаратов, объектов трансплантологии данный показатель должен составлять не менее 85 % [10–13].

Для достижения высокой однородности объект подвергают обработке электронами различных энергий за несколько сеансов облучения, что повышает время обработки и неприемлемо для объектов, для которых время нахождения вне холодильных камер строго ограничено [14].

В работах [15, 16] для повышения однородности радиационной обработки ускоренными электронами с энергией 10 МэВ объектов с массовой толщиной до  $2 \text{ г/см}^2$  предлагается использовать алюминиевые пластины, модифицирующие спектр пучка электронов и позволяющие увеличить равномерность распределения дозы до 85 % по сравнению с 71 % без использования пластин. Этот метод позволяет повысить однородность распределения поглощенной дозы за один сеанс облучения, а также легко встраивается в существующие технологические процессы в промышленных центрах радиационной обработки. Однако при размещении алюминиевых пластин энергетический спектр пучка сдвигается в сторону меньших энергий, что приводит к снижению максимальной толщины обрабатываемого объекта, для которого может быть достигнута высокая однородность обработки.

Целью данной работы является нахождение комбинации алюминиевых пластин различной толщины для повышения однородности обработки  $K = D_{\min}/D_{\max}$  ускоренными электронами с энергией от 5 до 10 МэВ объектов в форме параллелепипеда с массовой толщиной в диапазоне от 1 до  $4 \text{ г/см}^2$ .

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Решение поставленной задачи сводится к подбору комбинации толщин пластин, обеспечивающей максимально возможную однородность обработки  $K$  для объектов с заданной массовой толщиной  $L_{\text{opt}}$  [9], соответствующей глубине объекта, на которой значение поглощенной дозы  $D_{\min}$  равно максимальному значению  $D_{\max}$ , что

эквивалентно подбору весовых коэффициентов  $\omega_i$ , путем минимизации функционала:

$$\sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^M \omega_i D_{ij} - \text{const} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $\sum_{j=1}^M D_{ij}$  — поглощенная доза, создаваемая пучком электронов в точке  $r_j$  объекта заданной массовой толщины при прохождении алюминиевой пластины толщиной  $d_i$ . Суммирование ведется по  $i$  от 1 до  $N$ , где  $N$  — число различных толщин алюминиевых пластин и по  $j$  от 1 до  $M$ , где  $M$  — число точек в объекте, в которых определяется поглощенная доза. Минимизация функционала (1) осуществлялась методом неотрицательных наименьших квадратов [17], реализованным в пакете python3 `scipy.optimize` [18, 19].

Значения  $D_{ij}$  рассчитывались методом компьютерного моделирования с использованием инструментария Geant4 [20], в основе которого лежит метод Монте-Карло. Моделировалось облучение кубического водного фантома в форме параллелепипеда  $200 \times 200 \times 200$  мм моноэнергетическими пучками электронов с энергией от 5 до 10 МэВ с шагом 0,5 МэВ с размещением между пучком и кубом алюминиевых пластин толщиной от 0,5 до 9,5 мм с шагом 0,5 мм, а также без пластин (рис. 1).

Поперечный размер пучка составлял  $200 \times 200$  мм, количество электронов в пучке  $10^7$ . Алюминиевые пластины располагались на расстоянии 0,05 мм от одной из граней куба, расстояние между пластиной и выходом пучка электронов составляло 0,05 мм и было заполнено воздухом. Распределение поглощенной дозы по глубине фантома фиксировалось с помощью виртуальной кубической сетки размером  $1 \times 1 \times 200$  ячеек, разбивающей фантом на 200 слоев толщиной 1 мм по глубине. В объеме каждой ячейки фиксировались сумма поглощенной в ячейке энергии  $\sum E_i$ , сумма квадратов энергий, поглощенных в ходе отдельных взаимодействий  $\sum E_i^2$ , а также число произошедших в ячейке взаимодействий  $N_i$ , где  $i$  — номер ячейки. Среднее значение величины поглощенной дозы  $D_i$  (2) и ее среднеквадратичное отклонение  $S_i$  (3) в  $i$ -й

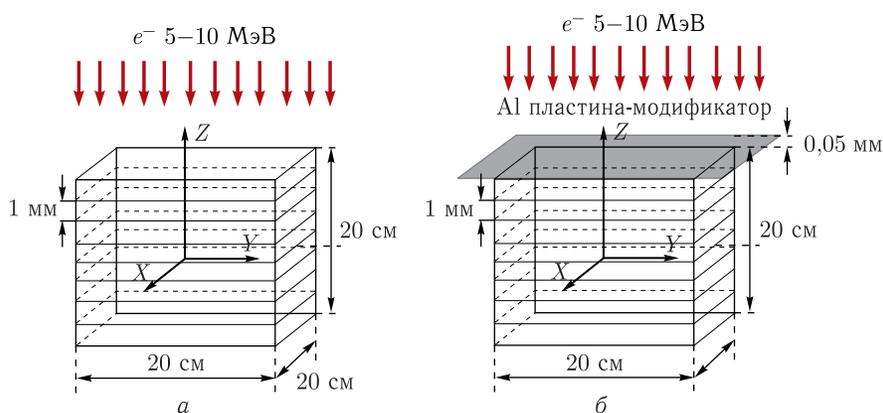


Рис. 1. Схема облучения водного фантома без пластины (а) и при дополнительном размещении пластин (б)

ячейке рассчитывались по формулам

$$D_i = \frac{1}{N_i} \frac{\sum_{j=1}^{N_i} E_{ij}}{m_i}, \quad (2)$$

$$S_i = \sqrt{\left( \frac{1}{N_i - 1} \frac{1}{m_i^2} \sum_{j=1}^{N_i} E_{ij}^2 - \left( \frac{1}{N_i - 1} \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{N_i} E_{ij} \right)^2 \right)}, \quad (3)$$

где  $m_i$  — масса  $i$ -й ячейки.

Распределения поглощенной дозы для водного фантома заданной толщины  $L_{\text{opt}}$ , меньшей 200 мм, получались отбрасыванием ячеек, глубина залегания которых больше  $L_{\text{opt}}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлено распределение поглощенной дозы по глубине водного фантома толщиной 70 мм при одностороннем облучении электронами с энергией 10 МэВ без пластин и с размещением комбинации пластин толщиной от 0,1 и 9,5 мм.

Из рис. 2 видно, что при облучении без пластин на глубине фантома  $L_{\text{opt}} = 3,8$  г/см<sup>2</sup> однородность обработки  $K$  составляет 0,71, при этом при размещении комбинации пластин однородность повышается до 0,98 на глубине фантома  $L_{\text{opt}} = 3$  г/см<sup>2</sup>.

На рис. 3 приведены распределения поглощенной дозы по глубине водного фантома при облучении электронами с энергией от 5 до 10 МэВ с использованием комбинаций пластин, рассчитанных для каждой энергии электронов по формуле (1). Из рис. 3

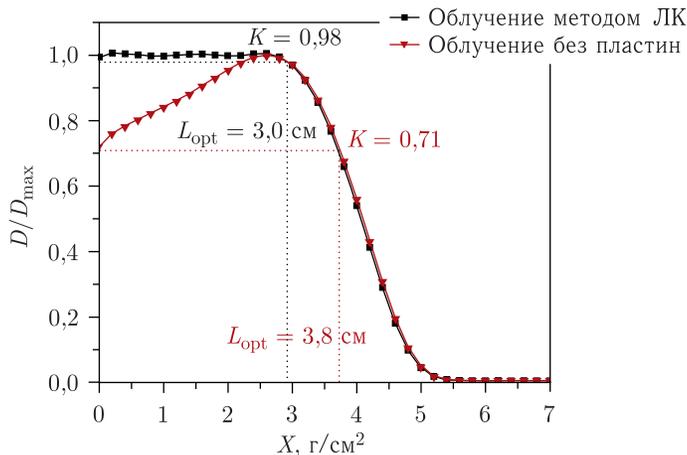


Рис. 2. Распределения поглощенной дозы по глубине водного фантома толщиной 70 мм при одностороннем облучении пучком ускоренных электронов с энергией 10 МэВ с размещением комбинации пластин и без пластин



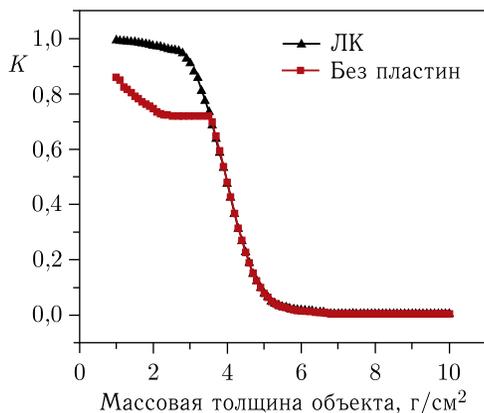


Рис. 4. Зависимость однородности обработки  $K$  от толщины водного фантома с применением комбинации пластин и без них

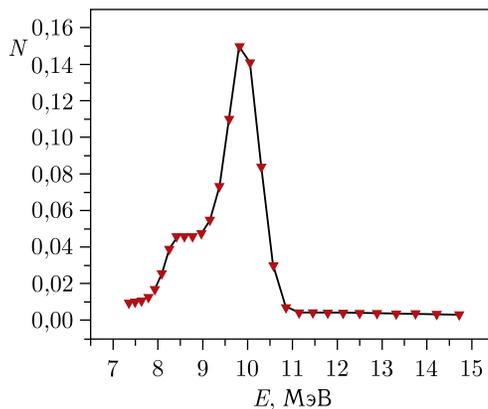


Рис. 5. Экспериментально измеренный энергетический спектр пучка промышленного ускорителя при работе в режиме 10 МэВ [21]

Стоит отметить, что предложенный алгоритм позволяет рассчитать комбинацию пластин для достижения максимальной однородности радиационной обработки при облучении электронами с любым начальным энергетическим спектром. На рис. 4 представлены значения коэффициента  $K$  для фантомов с массовой толщиной от 1 до 10 г/см<sup>2</sup> при обработке без размещения пластин и в комбинации с электронами с начальным энергетическим спектром [21], представленным на рис. 5.

Из рис. 4 видно, что размещение комбинации пластин повышает однородность обработки на 20–30% по сравнению с облучением без пластин для объектов, массовая толщина которых не более  $L_{opt} = 4$  г/см<sup>2</sup>.

Таким образом, включение в схему облучения комбинации алюминиевых пластин различной толщины с рассчитанными весами (которые могут быть интерпретированы как время обработки с использованием пластины определенной толщины) позволяет проводить радиационную обработку объектов, сохраняя высокий показатель равномерности распределения поглощенной дозы и не уменьшая предельный размер объекта, для которого может быть достигнута высокая однородность обработки. При этом максимально возможная однородность 98% достигается при обработке электронами с энергией 10 МэВ для объектов с массовой толщиной до 3,0 г/см<sup>2</sup>.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-63-00075.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козьмин Г. В., Санжарова Н. И. и др. // Достижения науки и техники АПК. 2015. № 5. С. 87–92.
2. Nickman J. R. Food Irradiation. Vienna, 1966. P. 101–117.
3. Мейсель М. Н., Черняев Н. Д. // Вестн. АН СССР. 1956. № 11. С. 38–45.
4. Чепель Л. В. Применение ускорителей электронов в радиационной химии. М.: Атомиздат, 1975. С. 3–6.

5. Черняев А. П. и др. // ЯФ. 2019. Т. 82, № 5. С. 425–439.
6. ISO 11137-2006. Sterilization of Health Care Products. Radiation. Part 1. Requirements for Development, Validation and Routine Control of a Sterilization Process for Medical Devices; 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.
7. CAC, 2003. CODEX STAN 106-1983. Rev. 1-2003. Codex Alimentarius Commission. General Standard for Irradiated Foods. Codex Alimentarius, FAO/WHO, Rome.
8. Алимов А. С. Практическое применение электронных ускорителей. Препринт НИИЯФ МГУ № 13/877. М., 2011.
9. Bliznyuk U. A., Studenikin F. R., Borshchegovskaya P. Y. et al. Characteristics of Dose Distributions of Electron Beams Used in the Radiation Processing of Food Products // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2021. V. 85, No. 10. P. 1097–1101.
10. Statement Summarizing the Conclusions and Recommendations from the Opinions on the Safety of Irradiation of Food Adopted by the BIOHAZ and CEF Panels. European Food Safety Authority // EFSA J. 2011. V. 9, No. 4. P. 2107.
11. Исамов Н. Н. и др. // Все о мясе. 2017. № 1. С. 11–15.
12. Павлов А. Н., Санжарова Н. И., Черняев А. П. и др. // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. С. 40–50; <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-4-40-50>.
13. Bliznyuk U. A., Borshchegovskaya P. Y., Chernyaev A. P. et al. // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 365. P. 012002.
14. Cleland M. R. Industrial Applications of Electron Accelerators // Small Accelerators: CERN Accel. School. 2006. P. 383–416; doi: 10.5170/CERN-2006-012.383.
15. Студеникин Ф. Р., Близнюк У. А., Черняев А. П. и др. Влияние алюминиевых пластин-модификаторов пучка на однородность распределения поглощенной дозы по глубине объекта при обработке ускоренными электронами // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3: Физика, астрономия. 2022. Т. 1. С. 3–9.
16. Студеникин Ф. Р. Модификация пучка ускоренных электронов для повышения равномерности радиационной обработки облучаемых объектов. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. 01.04.20. М., 2022. 142 с.
17. Lawson C., Hanson R. J. Solving Least Squares Problems. SIAMS. 1987.
18. Python Software Foundation. Python Language Reference. Version 3.8. Available at <http://www.python.org>.
19. SciPy — an Open-Source Software for Mathematics, Science, and Engineering. Available at <https://docs.scipy.org/doc/scipy/tutorial/optimize.html>.
20. Introduction to Geant4. Available online at <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/IntroductionToGeant4/html/index.html>.
21. Ханкин В. В. Экспериментальное исследование динамики пучков в импульсном линейном ускорителе и разрезном микротроне. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. 01.04.20. М., 2020. 123 с.

Получено 18 ноября 2022 г.