

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Влияние алюминиевых пластин–модификаторов пучка на однородность распределения поглощенной дозы по глубине объекта при обработке ускоренными электронамиФ. Р. Студеникин,^{1,2, a} У. А. Близнюк,^{1,2} А. П. Черняев,^{1,2} В. В. Ханкин,² Г. А. Крусанов³¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики ускорителей и радиационной медицины*² *Научно–исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*³ *ФГБУ ГНЦ ФМБЦ имени А.И. Бурназяна ФМБА. Россия, 123098, Москва, ул. Живописная, д. 46*

Поступила в редакцию 03.08.2021, после доработки 08.10.2021, принята к публикации 04.11.2021.

В данной работе представлены результаты исследования влияния алюминиевых пластин–модификаторов пучка на однородность распределения поглощенной дозы по глубине объектов, полученные в результате компьютерного моделирования обработки объектов моноэнергетическими ускоренными электронами с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ. Установлено, что предложенный метод модификации пучка электронов при применении пластин–модификаторов позволяет увеличить однородность распределения дозы по объему обрабатываемого объекта на 15–20 %.

Ключевые слова: ускоренные электроны, радиационная обработка, равномерность распределения поглощенной дозы.

УДК: 539.1.06. PACS: 29.27.-Eg.

ВВЕДЕНИЕ

На начальном этапе развития ускорительной техники установки создавались преимущественно для проведения фундаментальных исследований в области атомной и ядерной физики. Несмотря на то, что ускорители — это сложный высокотехнологичный продукт деятельности человека, созданный в первую очередь для научных исследований, они стали неотъемлемой частью технологических процессов, превратились в необходимый инструмент во многих отраслях промышленного и сельскохозяйственного производства, в ядерной медицине, лучевой терапии и диагностике. Уже к началу 1960 гг. доля ускорителей, применяемых в медицине, промышленности и сельском хозяйстве, составляла более 60 %, а в начале 2000-х гг. этот показатель достиг 95 % [1].

Радиационную обработку начали применять в середине 1940 гг. После вспышек сальмонеллеза в армии США в 1942 г. начали использовать радиационную обработку пищевых пайков, отправляемых в район боевых действий в Тихом океане, а также активно применяли радиационную стерилизацию медицинских изделий [2]. В 1958 г. впервые в мире Минздрав СССР разрешил облучение сельскохозяйственной продукции [3]. В США, СССР, Великобритании и ряде европейских стран были разработаны специальные национальные программы по развитию методов радиационной обработки биообъектов [3–5]. За последние 80 лет ускорители электронов нашли широкое применение в радиационной обработке объектов для модификации свойств различных материалов, подавления патогенных микроорганизмов, стерилизации медицинских изделий,

увеличения сроков хранения пищевой продукции и др. [3–6]. Более чем в 40 странах мира специализированные центры проводят обработку объектов ионизирующим излучением [1, 5].

Для радиационной обработки медицинских изделий и продуктов питания в соответствии с международными стандартами ISO [7, 8] 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 [9]. В последнее время в большинстве современных центров промышленной обработки сформировалась тенденция применения ускорителей электронов с энергией до 10 МэВ, что во многом связано с более высокой мощностью дозы, получаемой объектом, по сравнению с разрешенными радиоактивными источниками, и, как следствие, более высокой скоростью обработки объектов [10].

При радиационной обработке объектов для достижения различных целей требуются различные технологические диапазоны доз. Особенно остро проблема обеспечения однородности облучения стоит для радиационной обработки продуктов питания, для которых определены достаточно узкие диапазоны доз [11–14], при этом выход за верхний предел дозового диапазона приводит к изменению физико-химических и, как следствие, органолептических свойств обрабатываемой продукции, а облучение в дозах, меньших нижней границы диапазона, не оказывает необходимого микробиологического эффекта [15–19]. Так, например, для продукции мясного и рыбного происхождения важно обеспечить равномерность поглощенной дозы не менее 80 % [20, 21].

^a E-mail: f.studenikin@gmail.ru

Поэтому важной физической задачей является достижение высокой однородности распределения поглощенной дозы по глубине облучаемого объекта. Для повышения равномерности распределения дозы по объему обрабатываемых объектов применяется варьирование энергии ускоренных электронов [22]. При облучении объекта возможно выставить режим обработки, соответствующий только одному энергетическому спектру пучка электронов, таким образом для повышения однородности радиационной обработки необходимо применять повторное облучение при различных режимах работы ускорителя электронов. При размещении в центре двух ускорителей электронов возможно проводить одновременное облучение объекта с двух сторон, причем с каждой стороны можно выбрать разные энергии облучения, что сокращает количество необходимых повторных облучений. Такой способ обработки применяется в промышленных центрах, работающих на базе ускорителей УЭЛР 10-15-С [23].

Одним из способов повышения однородности радиационной обработки объектов при проведении одного облучения пучком ускоренных электронов может быть предлагаемый нами метод, который заключается в размещении алюминиевых пластин-модификаторов между выходным окном ускорителя электронов и облучаемым объектом. Это позволит модифицировать пучок электронов, тем самым изменяя дозовое распределение по объему обрабатываемого объекта, что при определенных условиях может повысить степень однородности распределения дозы по объему обрабатываемого объекта.

Целью данной работы является исследование влияния алюминиевых пластин-модификаторов на степень однородности распределения поглощенной дозы по глубине объектов при обработке пучками ускоренных электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В промышленных условиях обработка ускоренными электронами производится в коробках или контейнерах, наиболее распространенные размеры которых меняются в пределах от 10 см×20 см×30 см до 40 см×40 см×80 см, при этом плотность облучаемых объектов варьируется в диапазоне от 0.3 г/см³ до 1.6 г/см³.

Для оценки влияния алюминиевых пластин-модификаторов на степень однородности распределения поглощенной дозы по глубине объектов рассчитывались глубинные распределения поглощенной дозы в объектах в форме параллелепипеда различной плотности при использовании алюминиевых пластин-модификаторов и без них.

Расчеты выполнены методом Монте-Карло, для реализации которого использовался программный код GEANT4 [24], позволяющий моделировать прохождение излучения через вещество любой геометрии и химического состава [25].

Геометрия облучения представлена на рис. 1. Моделировалось одностороннее облучение куба из воды с ребром 30 см, плотность которого варьировалась в диапазоне от 0.3 г/см³ до 1.6 г/см³ с шагом

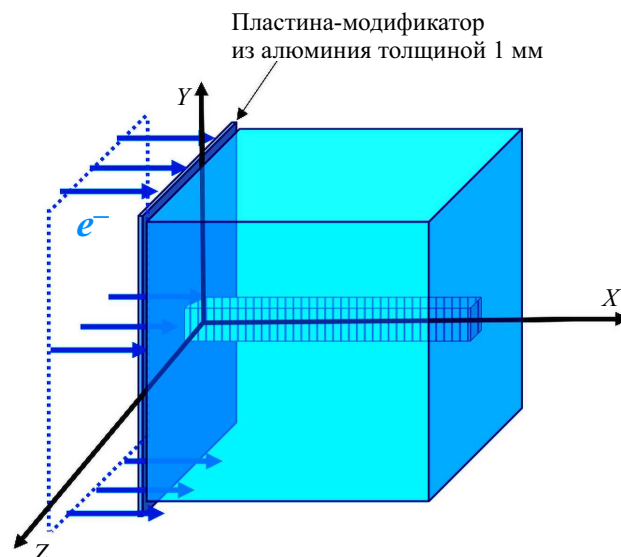


Рис. 1. Схема моделирования облучения объекта из воды в форме куба пучком ускоренных электронов с добавлением алюминиевой пластины

0.1 г/см³. Распределения поглощенной дозы по глубине зависят от плотности объекта и соотношения массового числа A к зарядовому числу Z . В облучаемых объектах, для которых актуален метод повышения однородности, таких как продукты питания, плазма крови (органика) или медицинские изделия из пластика, преимущественно содержатся легкие элементы с соотношением массового числа A к зарядовому числу Z , примерно равному 2. Поэтому в данном моделировании учитывалось влияние плотности на пробег электронов в веществе, без учета влияния соотношения массового числа A к зарядовому числу Z . Далее для расчета распределений поглощенной дозы по глубине куба вдоль оси X , параллельной первоначальному движению электронов в пучке, в нем выделялся объем в форме параллелепипеда, который разбивался на ячейки с размерами 40 мм×40 мм×0.5 мм для фиксации в них поглощенной энергии.

Моделирование выполнялось для возможных условий обработки объектов на промышленных ускорителях электронов, которые генерируют пучки электронов с энергией от 4 МэВ до 10 МэВ [23]. Поперечный размер пучка составлял 30.1 см×30.1 см, энергия частиц варьировалась в диапазоне от 4 МэВ до 10 МэВ с шагом 0.5 МэВ, количество электронов в пучке составляло 10⁷. Погрешность заложенных в программном коде GEANT4 физических моделей, сечений и т.д. составляет не более 2% [26, 27]. Алюминиевая пластина-модификатор размещалась непосредственно перед кубом, как показано на рис. 1, расстояние между пластиной и выходом пучка составляло 4 см и было заполнено воздухом. Размер алюминиевой пластины составлял 30 см×30 см, толщина варьировалась в диапазоне от 0.5 мм до 5.5 мм с шагом 0.5 мм.

Для оценки степени влияния пластин на распределения поглощенной дозы по глубине объекта введем следующие характеристики:

$K = D_{\min}/D_{\max}$ — коэффициент однородности облучения, равный отношению минимального значения

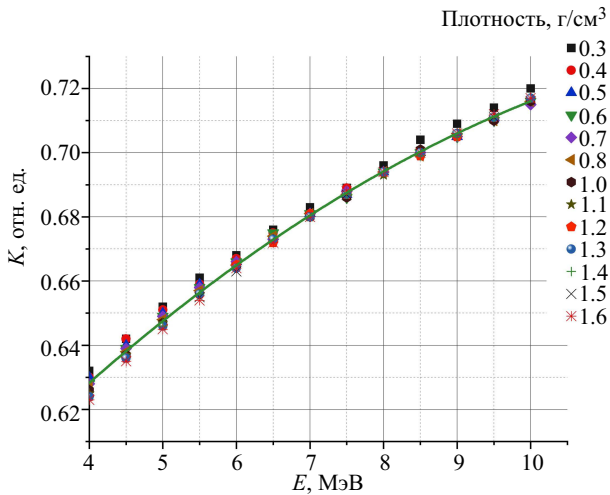


Рис. 2. Зависимость значений коэффициента K от энергии ускоренных электронов E при облучении объекта из воды в форме параллелепипеда с различной плотностью

поглощенной дозы D_{\min} в i -й ячейке параллелепипеда вдоль направления оси X к максимальному значению поглощенной дозы D_{\max} ;

K_d — коэффициент однородности облучения при облучении параллелепипеда с использованием алюминиевой пластины-модификатора толщиной d ;

L'_{opt} — оптимальная толщина облучаемого объекта, равная расстоянию вдоль оси X между центром первой ячейки и центром ячейки, значение поглощенной дозы в которой совпадает с соответствующим значением дозы в первой ячейке для данной энергии электронов.

Если толщина объекта обработки меньше либо равна L'_{opt} , то коэффициент K будет определяться как отношение поверхностной поглощенной дозы $D_{\text{input}} = D_{\min}$ к максимальному значению поглощенной дозы D_{\max} вдоль оси X . В данной работе все расчеты проводились для толщины объекта, равной L'_{opt} при данных условиях облучения.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Так как обработке подвергаются объекты различной плотности, то для оценки влияния плотности объекта на однородность облучения была построена зависимость значения коэффициента K от энергии электронов для объектов из воды, толщины которых соответствуют значениям L'_{opt} для начальных энергий пучков ускоренных электронов с плотностями, лежащими в диапазоне от 0.3 г/см^3 до 1.6 г/см^3 (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что однородность облучения параллелепипеда в диапазоне энергий от 4 МэВ до 10 МэВ возрастает с увеличением энергии электронов и практически не зависит от плотности облучаемого объекта в вышеуказанном диапазоне. Зависимость коэффициента K от энергии E можно интерполировать (с максимальной погрешностью не более 4%) функцией вида (1)

$$K = a + bE - cE^2, \quad (1)$$

где $a = 0.5333 \pm 0.0033$, $b = 0.0271 \pm 0.0007 \text{ МэВ}^{-1}$, $c = 0.0011 \pm 0.0001 \text{ МэВ}^{-2}$.

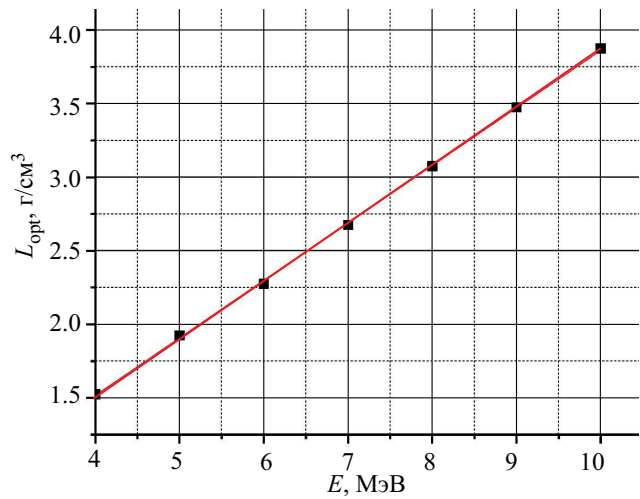


Рис. 3. Зависимость значений оптимальной толщины облучаемого объекта L_{opt} от энергии ускоренных электронов E для объектов в форме параллелепипеда с плотностью от 0.3 г/см^3 до 1.6 г/см^3 .

Для облучаемых объектов в форме параллелепипедов с плотностью от 0.3 г/см^3 до 1.6 г/см^3 зависимости оптимальной толщины от энергии ускоренных электронов можно описать одной зависимостью, если ввести величину (2):

$$L_{\text{opt}} \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^2} \right] = L'_{\text{opt}} [\text{см}] \times \rho \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right], \quad (2)$$

где ρ — плотность облучаемого объекта. На рис. 3 представлена зависимость параметра L_{opt} от энергии ускоренных электронов E . Как видно из рис. 3, параметр L_{opt} линейно возрастает с увеличением энергии электронов, при этом зависимость величины $L_{\text{opt}} \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^2} \right]$ от энергии E [МэВ] можно интерполировать (с максимальной погрешностью не более 1%) функцией вида (3)

$$L_{\text{opt}} = a + bE, \quad (3)$$

где $a = -0.05 \pm 0.02 \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^2} \right]$, $b = 0.391 \pm 0.003 \left[\frac{\text{г}}{\text{МэВ} \cdot \text{см}^2} \right]$.

Таким образом, с одной стороны при больших энергиях можно обеспечить однородность облучения для обрабатываемого объекта большей толщины при условии, что его толщина равна L'_{opt} , с другой стороны, при фиксированной толщине объекта, равной L'_{opt} , можно повысить однородность его облучения электронами, увеличив энергию частиц.

Для оценки влияния пластин-модификаторов на однородность распределения дозы в облучаемых объектах были построены зависимости величины поглощенной дозы D в относительных единицах (для каждой энергии поглощенная доза D_x в каждой точке по оси X нормировалась на поглощенную дозу на поверхности куба D_{input} при облучении без пластины) от глубины проникновения электронов с энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ и 10 МэВ в объекте без размещения пластин-модификаторов и с добавлением пластин-модификаторов из алюминия толщиной от 0.5 мм до 5.5 мм с шагом 0.5 мм. Из рис. 4 видно, что добавление пластин-модификаторов из алюминия изменяет дозовое распределение по глубине облучаемого объекта — повышается значение дозы в поверхностных

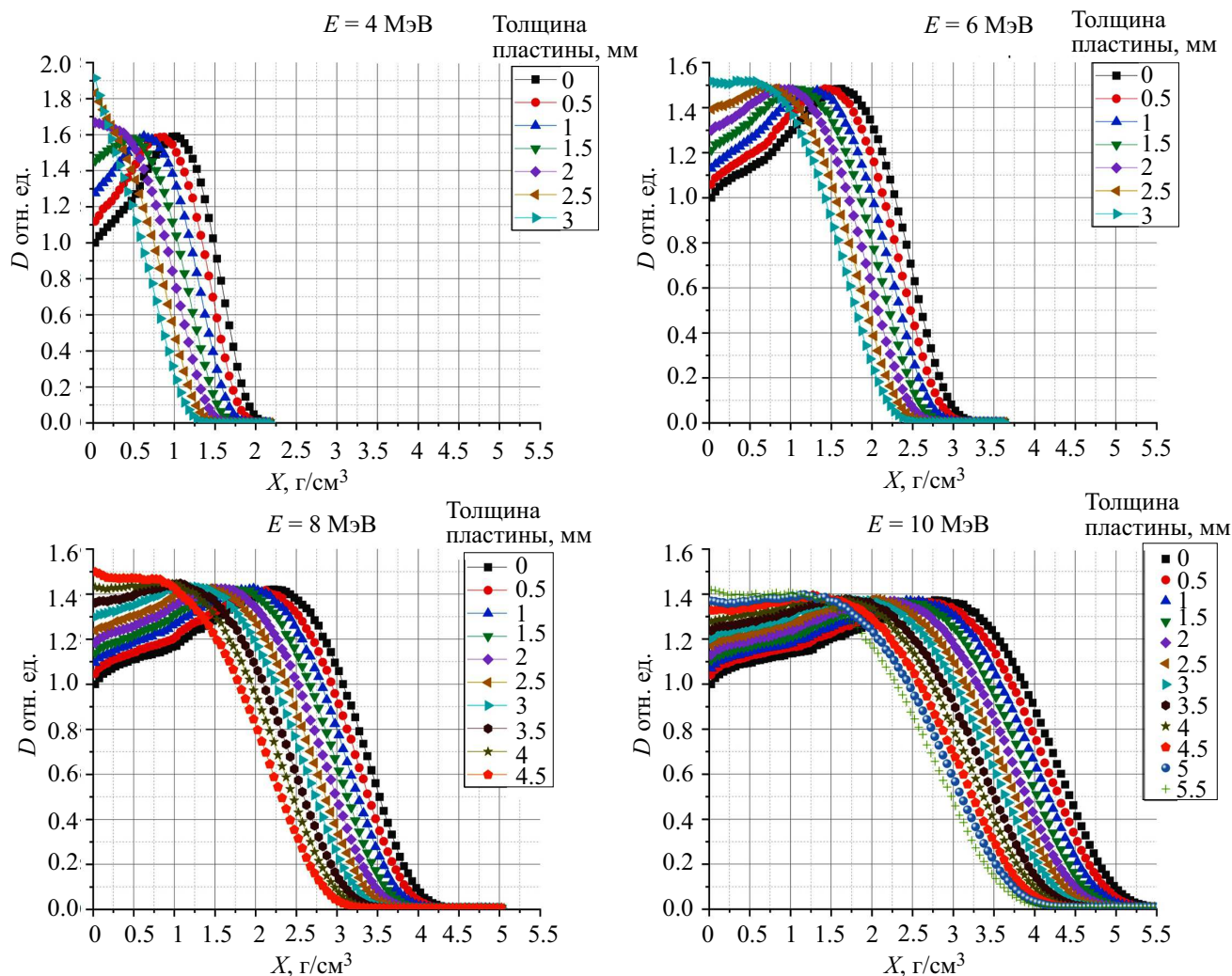


Рис. 4. Зависимость значений поглощенной дозы D в слоях объекта от глубины X при обработке моноэнергетичными пучками электронов с энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ с добавлением пластин-модификаторов из алюминия толщиной от 0 до 5.5 мм

слоях (от 0 до 1.5 г/см^2), при этом уменьшается максимальный пробег электронов по оси X .

Для оценки влияния пластин-модификаторов из алюминия на однородность распределения дозы вдоль оси X были построены зависимости значения коэффициента K от толщины алюминиевой пластины для начальных энергий пучков электронов 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что с увеличением толщины алюминиевой пластины-модификатора d (мм) значение коэффициента K увеличивается линейно. Зависимости можно интерполировать (с максимальной погрешностью не более 2%) функцией вида (4):

$$K = a + bd, \quad (4)$$

где для 4 МэВ:

$$a = 0.619 \pm 0.009, \quad b = 0.192 \pm 0.008 \text{ мм}^{-1},$$

для 6 МэВ:

$$a = 0.662 \pm 0.006, \quad b = 0.109 \pm 0.003 \text{ мм}^{-1},$$

для 8 МэВ:

$$a = 0.701 \pm 0.004, \quad b = 0.068 \pm 0.001 \text{ мм}^{-1},$$

для 10 МэВ:

$$a = 0.730 \pm 0.002, \quad b = 0.049 \pm 0.001 \text{ мм}^{-1}.$$

Для начальной энергии электронов в диапазоне от 4 МэВ до 10 МэВ можно подобрать толщины

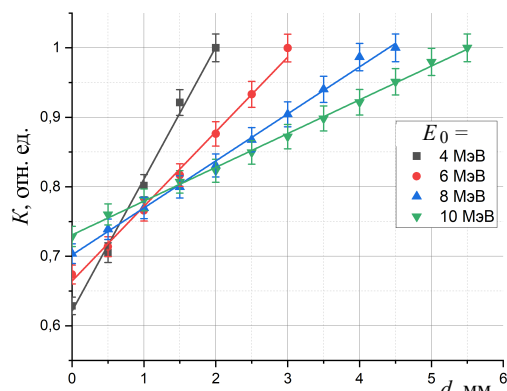


Рис. 5. Зависимость значений коэффициента K от толщины алюминиевой пластины-модификатора d при облучении объекта из воды в форме параллелепипеда моноэнергетичными пучками электронов с энергией 4 МэВ, 6 МэВ, 8 МэВ, 10 МэВ

алюминиевых пластин-модификаторов, при которых коэффициент K становится больше 0.9, при этом

Таблица. Значения характеристик дозовых распределений и пучков электронов при облучении объектов в форме параллелепипеда с размещением пластин-модификаторов из алюминия толщиной от 1 мм до 5 мм

E_0 , МэВ	d , мм	L_d , г/см ²	K_L , отн. ед.	K_d , отн. ед.	Средняя энергия пучка электронов, МэВ	Доля электронов с энергией в диапазоне от 0 МэВ до 1 МэВ, %	Доля электронов с энергией в диапазоне от 0 МэВ до 2 МэВ, %	Доля электронов с энергией в диапазоне от 0 МэВ до 3 МэВ, %
4	0.0	1.475±0.025	0.63±0.01	-	3.76±0.08	1.76±0.04	1.99±0.04	2.50±0.05
	1.0	1.025±0.025	0.63±0.01	0.80±0.02	3.21±0.06	4.23±0.08	6.20±0.12	12.98±0.26
	1.5	0.725±0.025	0.68±0.01	0.92±0.02	2.94±0.06	5.05±0.10	8.53±0.17	27.32±0.55
	2.0	0.025±0.025	1.00±0.02	1.00±0.02	2.66±0.05	6.01±0.12	12.07±0.24	60.99±1.22
6	0.0	2.275±0.025	0.67±0.01	-	5.71±0.11	1.66±0.03	1.80±0.04	1.92±0.04
	1.5	1.675±0.025	0.67±0.01	0.81±0.02	4.84±0.10	4.12±0.08	5.51±0.11	6.97±0.14
	2.0	1.425±0.025	0.68±0.01	0.88±0.02	4.57±0.09	4.48±0.09	6.27±0.13	8.41±0.17
	2.5	1.125±0.025	0.74±0.01	0.93±0.02	4.30±0.09	4.85±0.10	7.11±0.14	10.19±0.20
8	0.0	3.075±0.025	0.70±0.01	-	7.67±0.15	1.62±0.03	1.73±0.03	1.81±0.04
	2.0	2.275±0.025	0.70±0.01	0.83±0.02	6.43±0.13	4.12±0.08	5.43±0.11	6.49±0.13
	3.0	1.775±0.025	0.74±0.01	0.90±0.02	5.90±0.12	4.54±0.09	6.29±0.13	7.96±0.16
	4.0	1.125±0.025	0.83±0.02	0.98±0.02	5.36±0.11	5.01±0.10	7.30±0.15	9.79±0.20
10	0.0	3.875±0.025	0.73±0.01	-	9.62±0.19	1.61±0.03	1.71±0.03	1.78±0.04
	2.0	3.125±0.025	0.73±0.01	0.81±0.02	8.28±0.17	3.96±0.08	5.13±0.10	5.94±0.12
	4.0	2.225±0.025	0.76±0.02	0.91±0.02	7.18±0.14	4.58±0.09	6.35±0.13	7.87±0.16
	5.0	1.575±0.025	0.82±0.02	0.97±0.02	6.65±0.13	4.86±0.10	6.96±0.14	8.93±0.18

оптимальная толщина объекта не равна нулю. Чем больше начальная энергия ускоренных электронов, тем большая толщина пластины необходима для достижения максимальной однородности распределения дозы. Увеличение толщины пластины приводит к уменьшению параметра L_{opt} , что связано с уменьшением энергии электронов после прохождения пластины, и, как следствие, с уменьшением глубины их проникновения в вещество. При этом чем выше начальная энергия электронов в пучке, тем меньше коэффициент b в интерполирующих зависимостях и тем меньше скорость увеличения коэффициента K и уменьшения значения L_{opt} с ростом толщины алюминиевой пластины.

В таблице представлены значения толщин d алюминиевых пластин-модификаторов и соответствующие им значения оптимальной толщины L_d облучаемого объекта, коэффициента K_d при облучении объекта с добавлением алюминиевой пластины толщиной d , коэффициента K_L при облучении объекта толщиной L_d без добавления алюминиевой пластины, значений средних энергий пучка электронов после прохождения пластины, а также доли электронов от общего количества электронов в пучке, обладающих энергиями, лежащими в интервале от 0 до 1 МэВ, от 0 до 2 МэВ, и от 0 до 3 МэВ, полученные в результате моделирования облучения объектов пучками электронов с начальными энергиями E_0 от 4 МэВ до 10 МэВ.

Из таблицы видно, что добавление пластин-модификаторов из алюминия приводит к увеличению значения коэффициента однородности облучения. Так, например, для параллелепипеда толщиной $L_d = 2.225$ г/см² при радиационной обработке пучком электронов с начальной энергией 10 МэВ

добавление пластины-модификатора из алюминия толщиной 4 мм приводит к увеличению значения коэффициента однородности облучения K с 76% до 91%. При этом чем выше начальная энергия ускоренных электронов, тем для больших толщин объектов можно обеспечить однородность облучения от 0.8 и выше. При облучении пучком электронов с начальной энергией 4 МэВ добавление пластины-модификатора из алюминия толщиной 1 мм позволяет достичь однородности облучения 0.8 для объекта толщиной $L_d = 1.025$ г/см², в то время как при энергии электронов 10 МэВ добавление пластины-модификатора из алюминия толщиной 2 мм позволяет достичь однородности облучения $K = 0.81$ для объекта большей толщины $L_d = 3.125$ г/см².

Также из таблицы видно, что добавление пластин-модификаторов из алюминия приводит к уменьшению максимальной энергии электронов в пучке и к увеличению доли электронов в пучке с энергией от 0 до 3 МэВ. С увеличением толщины пластины-модификатора уменьшается значение средней энергии пучка примерно на 15–30%, при этом доли электронов, энергии которых находятся в интервале от 0 до 1 МэВ, от 0 до 2 МэВ и от 0 до 3 МэВ увеличиваются. Так, для начальной энергии пучка 4 МэВ добавление пластины-модификатора из алюминия толщиной 2 мм приводит к увеличению доли электронов с энергией от 0 до 1 МэВ в 3.4 раза, от 0 до 2 МэВ в 6 раз, от 0 до 3 МэВ в 24.4 раза по сравнению с долей электронов для указанных диапазонов при облучении без пластин-модификаторов. Для начальной энергии 10 МэВ добавление пластины-модификатора из алюминия толщиной 5 мм приводит к увеличению доли электронов с энергией

от 0 до 1 МэВ в 3 раза, от 0 до 2 МэВ — в 4.1 раз, от 0 до 3 МэВ — в 5 раз.

Электроны с энергиями, лежащими в диапазоне от 0 до 3 МэВ, вносят вклад в дозу, поглощенную в поверхностных слоях объекта, расположенных на глубине от 0 до 1.5 г/см². Как видно из рис. 4, именно в поверхностных слоях при добавлении пластин значение поглощенной дозы увеличивается и заметно отличается от облучения без пластин. Таким образом, увеличение в пучке доли электронов с энергиями до 3 МэВ приводит к увеличению однородности распределения поглощенной дозы по глубине облучаемого объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод применения пластин-модификаторов из алюминия позволяет увеличить однородность радиационной обработки облучаемых объектов в форме параллелепипеда до 80% и выше при применении алюминиевых пластин-модификаторов с толщиной в диапазоне от 0.5 мм до 5.5 мм и начальной энергии пучка электронов в диапазоне от 4 МэВ до 10 МэВ. При этом оптимальные толщины облучаемых объектов для данных условий обработки меняются в диапазоне от 1.025 г/см² до 3.125 г/см².

Расчеты показали, что увеличение однородности облучения объясняется увеличением в пучке доли электронов с энергиями до 3 МэВ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ №20-32-90237 «Аспиранты» в рамках междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черняев А.П. и др. // Ядерная физика. 2019. **82**, № 5. P. 425.
2. Raica N., Howie D.L. Review of the United States Army Wholesomeness of irradiated Food Program. / Food Irradiation. Vienna, 1966. P. 119.
3. Козьмин Г.В., Санжарова Н.И. и др. // Достижения науки и техники АПК. № 5. С. 87. 2015.
4. Hickman J.R. // Food Irradiation. Vienna, 1966. P. 101.
5. Мейсель М.Н., Черняев Н.Д. // Вестник АН СССР. 1956. № 11. P. 38.
6. Чепель Л.В. Применение ускорителей электронов в радиационной химии. М.: Атомиздат, 1975.

7. 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.
8. 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.
9. CAC, 2003. CODEX STAN 106-1983, Rev.1-2003. Codex Alimentarius Commission. General Standard for Irradiated Foods. Codex Alimentarius, FAO/WHO, Rome.
10. Алимов А.С. Практическое применение электронных ускорителей / Препринт НИИЯФ МГУ № 13/877. 2011.
11. 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 Journal. 2011. **9**, N 4. P. 2107.
12. Исамов Н.Н. и др. // Все о мясе. 2017. № 1. P. 11.
13. Павлов А.Н., Санжарова Н.И., Черняев А.П. и др. // Радиационная гигиена. 2020. **13**, № 4. P. 40.
14. Bliznyuk U.A., Borshchegovskaya P.Y., Chernyaev A.P. et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. **365**. 012002.
15. Li C. et al. // J. Meat Science. 2017. **128**. P. 68.
16. Bhoir S.A., Jhaveri M., Chawla S.P. // J. Food Process Engineering. 2019. **42**, N 6. P. e13254.
17. Barroso A.G., Mastro N.L. // J. Radiation Physics and Chemistry. 2019. **158**, P. 194.
18. Chernyaev A.P., Bliznyuk U.A., Borshchegovskaya P.Yu., Ipatova V.S. // J. Physics of Particles and Nuclei Letters. 2020. **17**, N 2. P. 260.
19. Chernyaev A.P. et al. // J. Physics of Atomic Nuclei. 2018. **81**, N 11. P. 1656.
20. Черняев А.П., Авдюхина В.М., Близняк У.А. и др. // Изв. РАН, сер. физ. 2020. **84**, № 4. С. 501.
21. Близняк У.А., Борщеговская П.Ю., Студеникин Ф.Р. и др. // Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. 2018. № 4. 1840204.
22. Miller R.B. Electronic Irradiation of Foods: An Introduction to the Technology // Springer - Food engineering series. January 2005. DOI:10.1007/0-387-28386-2.
23. Shvedunov V.I., Alimov A.S., Ermakov A.N. et al. // Radiation Physics and Chemistry. 2019. **159**. P. 95.
24. <https://geant4.web.cern.ch>
25. Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2016. **835**, P. 186.
26. Assalmi M., Diaf El Y., Mansour N. // Reports of Practical Oncology & Radiotherapy. 2020. **25**, N 6. P. 1001.
27. Renner F., Wulff J., Kapsch R.-P., Zink K. // Phys. Med. Biol. 2015. **60**. P. 7637.

Impact of Aluminum Plates on Uniformity of Depth Dose Distribution in Object During Electron Processing

F.R. Studenikin^{1,2,a}, U.A. Bliznyuk^{1,2}, A.P. Chernyaev^{1,2}, V.V. Khankin², G.A. Krusanov³

¹Physics Department, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Nuclear Physics Research Institute. Moscow 119991, Russia

³Federal Medical and Biophysical Center named after A. I. Burnazyan of the FMBA of Russia Moscow, 123098 Russia

E-mail: f.studenikin@gmail.ru

The impact of aluminum beam modifier plates on the uniformity of the absorbed dose distribution over the depth of objects is studied using computer simulation of the treatment of objects by monoenergetic accelerated

electrons with energies from 4 to 10 MeV. It has been found that the method for modifying the electron beam using modifier plates makes it possible to increase the uniformity of the dose distribution over the volume of the treated object by 15–20 %.

Keywords: accelerated electrons, radiation treatment, uniformity of absorbed dose distribution.

PACS: 29.27.-Eg.

Received 03 August 2021.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2021. **76**, Suppl. 1. pp. S1–S7.

Сведения об авторах

1. Студеникин Феликс Рикардович — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: f.studenikin@gmail.com.
2. Близнюк Ульяна Александровна — канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: uabliznyuk@gmail.com.
3. Черняев Александр Петрович — доктор физ.-мат. наук, зав. кафедрой, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: a.p.chernyaev@yandex.ru.
4. Ханкин Вадим Валерьевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-50-95, e-mail: v-k32@yandex.ru.
5. Крусанов Григорий Андреевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: krusanov@physics.msu.ru.