

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГЛУБИННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПЛАСТИКОВЫМ БОЛЮСОМ, НАПЕЧАТАННЫМ НА 3D-ПРИНТЕРЕ

*Е. Бушмина^{а, 1}, А. Булавская^а, А. Григорьева^а,
И. Милойчикова^{а, б}, М. Татарченко^б, С. Стучебров^а*

^а Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

^б Научно-исследовательский институт онкологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр РАН, Томск, Россия

^с Томский областной онкологический диспансер, Томск, Россия

Представлено исследование, направленное на изучение эффективности использования 3D-печатных пластиковых болюсов для электронной лучевой терапии. Болюсы представляют собой индивидуально изготовленные устройства, используемые для формирования заданного глубинного распределения поглощенной дозы. Существующие на данный момент стандартные болюсы ограничены простотой форм, хрупкостью и сложностью изготовления. Предлагаемый подход позволит устранить данные недостатки.

The research aimed at studying the effectiveness of the application of 3D-printed plastic boluses for electron beam therapy is presented. Boluses are custom-made devices for the necessary depth dose distribution formation. The currently used standard boluses are limited by their form simplicity, fragility, and complexity of manufacture. The proposed approach will eliminate these disadvantages.

PACS: 87.56.ng; 41.75.Ht

ВВЕДЕНИЕ

Лучевая терапия является эффективным методом лечения злокачественных новообразований. Электронная лучевая терапия нашла свое применение при облучении неглубоко залегающих новообразований [1]. Это связано с тем, что электроны имеют ограниченный пробег в тканях, зависящий от энергии частиц.

Для создания сложного распределения поглощенной дозы электронного пучка по глубине тела при проведении лучевой терапии используются специальные устройства, называемые болюсами [2]. Эти устройства, повторяющие контуры тела пациента, располагаются на поверхности тела в зоне воздействия облучения. Применение

¹E-mail: eab60@tpu.ru

таких устройств позволяет снизить дозу облучения здоровых тканей и критических органов, расположенных вблизи очага облучения [2]. Болюсы не только формируют глубинное распределение дозы заданной конфигурации, но также предназначены для компенсации краевого эффекта, который возникает на разделе двух сред с разной плотностью — воздуха и мягких тканей [1].

В качестве стандартного подхода для создания болюсов в современной клинической практике широко используются гидрогелиевые и парафиновые материалы [1]. Однако первый материал ограничен простотой формы, так как имеет фиксированную толщину, а второй слишком ломок и непрочен, в связи с чем его применение ограничено несколькими сеансами лучевой терапии. Также болюсы из парафина не просты в изготовлении.

В данной работе для создания индивидуальных болюсов для электронной лучевой терапии предлагается использовать новый подход — изготавливать пластиковые устройства с помощью технологии послойного наплавления [3]. Основным преимуществом трехмерной печати является возможность создания с высокой точностью прочных объектов заданной формы с изменяющейся толщиной по площади изделия с учетом индивидуальных анатомических особенностей пациентов [3].

Работа направлена на исследование эффективности формирования глубинного распределения дозы напечатанным пластиковым болюсом и болюсами, изготовленными из стандартных материалов, при облучении медицинскими электронными пучками.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Тестовые объекты. В качестве объектов для экспериментальных исследований были выбраны следующие болюсы: парафиновый, гидрогелиевый [4] и напечатанный из ПЛА-пластика (полилактид) [5]. Гидрогелиевый болюс производства Action [4] и специально изготовленный парафиновый болюс были использованы в качестве опорных, применяемых в клинической практике материалов. Данные материалы имеют схожий элементный состав (С, Н, О) и одинаковую массовую плотность, равную $1,01 \text{ г/см}^3$. Точность формирования глубинного распределения доз электронов с помощью гидрогелиевых болюсов составляет 0,5 см, так как это минимально доступная толщина таких изделий. Точность изготовления изделий из парафина ограничена толщиной в 1 см из-за хрупкости материала. С помощью трехмерной печати можно изготовить болюс любой толщины с шагом до 0,3 мм.

Проанализировав доступные пластиковые материалы, пригодные для изготовления изделий с помощью технологии послойного наплавления, мы определили, что ПЛА-пластик [5] является наиболее подходящим, так как он обладает наибольшими физической и рентгеновской плотностями [6]. Таким образом, для необходимого поглощения пучка электронов будет необходима меньшая толщина изделия в отличие от других видов пластиков.

Особенностью технологии трехмерной печати является возможность варьирования коэффициента заполнения изделия материалом, что позволяет с высокой точностью подобрать значение физической плотности готового образца.

Пластиковый болюс был изготовлен из ПЛА-пластика на 3D-принтере Flashforge Creator 3 [7] с коэффициентом заполнения, равным 84 %, таким образом, чтобы плот-

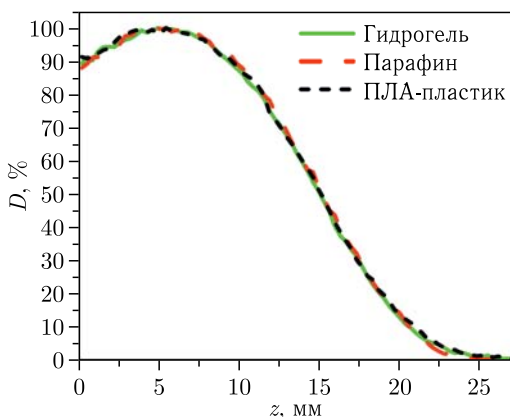
ность образца была равна $1,01 \text{ г/см}^3$. Все исследуемые образцы болюсов имели форму параллелепипеда с площадью поверхности $5 \times 5 \text{ см}$ и толщиной 1 см .

Экспериментальная установка. Для оценки возможности формирования глубинного распределения дозы электронного пучка пластиковым болюсом были проведены экспериментальные исследования на медицинском линейном ускорителе Synergy (Elekta Limited), расположенном в Томском областном онкологическом диспансере (Томск, Россия) [8]. Данный ускоритель позволяет генерировать электронные пучки в диапазоне энергий от 6 до 18 МэВ. Измерения проводились для энергий электронного пучка, равных 6, 12 и 15 МэВ. Использовался стандартный аппликатор клинического ускорителя электронов с размером поля $10 \times 10 \text{ см}$. Расстояние от источника до поверхности фантома составляло 100 см . Исследования проводились при нормальном падении пучка электронов на тестовый объект, угол гантри — 0° . Болюсы из стандартных материалов и ПЛА-пластика размещались на поверхности тканеэквивалентного фантома SP34 [9], внутри которого коллинеарно центральной оси электронного пучка располагались дозиметрические пленки Gafchromic EBT3 [10].

Обработка облученных пленочных дозиметров Gafchromic EBT3 проводилась в соответствии с международными рекомендациями [11]. Для анализа полученных данных был использован специально разработанный программный код [3]. Точность определения дозы с помощью пленочного дозиметра составляет 4% в соответствии с литературными данными [3, 10, 12].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате экспериментального исследования получены процентные глубинные распределения дозы электронного пучка в тканеэквивалентном фантоме за болюсами из стандартных материалов и пластика. Кривые определялись по центральной



оси пучка с нормировкой на максимальное значение дозы. Для примера на рисунке представлен внешний вид полученных кривых для энергии электронов 6 МэВ. Полученные распределения при всех энергиях находятся в хорошем согласии и совпадают в пределах точности дозиметра. Основными показателями глубинного распределения дозы в материалах являются положения 100 и 50% доз (таблица). Результаты показывают, что пластиковый болюс формирует глубинное распределение дозы электронного пучка так же эффективно, как и болюсы, изготовленные из стандартных материалов. Основные показатели глубинного распределения доз электронов за исследуемыми болюсами (см. таблицу) совпали в пределах 2%.

оси пучка с нормировкой на максимальное значение дозы. Для примера на рисунке представлен внешний вид полученных кривых для энергии электронов 6 МэВ. Полученные распределения при всех энергиях находятся в хорошем согласии и совпадают в пределах точности дозиметра. Основными показателями глубинного распределения дозы в материалах являются положения 100 и 50% доз (таблица). Результаты показывают, что пластиковый болюс формирует глубинное распределение дозы электронного пучка так же эффективно, как и болюсы, изготовленные из стандартных материалов. Основные показатели глубинного распределения доз электронов за исследуемыми болюсами (см. таблицу) совпали в пределах 2%.

Положения 100 и 50 % доз для глубинных распределений доз электронов за разными болюсами

Болюс	Энергия, МэВ					
	6		12		15	
	Z_{100} , мм	Z_{50} , мм	Z_{100} , мм	Z_{50} , мм	Z_{100} , мм	Z_{50} , мм
Гидрогель	5,7	15,0	11,1	37,4	14,1	50,2
Парафин	5,8	15,4	11,3	37,8	14,3	50,0
ПЛА-пластик	5,6	15,2	11,3	38,1	14,4	51,1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование возможности формирования глубинного распределения дозы электронного пучка пластиковым болюсом, напечатанным на 3D-принтере. Показано, что напечатанный из ПЛА-пластика болюс позволяет сформировать глубинное распределение дозы электронов, соответствующее применению стандартных гидрогелиевых и парафиновых болюсов. Полученные экспериментальные данные показали эффективность применения метода послойного наплавления для создания индивидуальных болюсов для электронной лучевой терапии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10014-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vyas V. et al.* On Bolus for Megavoltage Photon and Electron Radiation Therapy // *Med. Dosimetry*. 2013. V. 38, No. 3. P. 268–273.
2. *Endarko E. et al.* Evaluation of Dosimetric Properties of Handmade Bolus for Megavoltage Electron and Photon Radiation Therapy // *J. Biomed. Phys. Engin.* 2021. V. 11, No. 6. P. 735.
3. *Grigorieva A. A. et al.* Applicability of 3D-Printed Polymer Compensators for Modulated Electron Radiotherapy (MERT) // *Biomed. Engin.* 2021. V. 54, Iss. 5. P. 337–341.
4. *Moyer R. F. et al.* A Surface Bolus Material for High-Energy Photon and Electron Therapy // *Radiology*. 1983. V. 146, No. 2. P. 531–532.
5. Белый PLA-пластик Bestfilament для 3D-принтеров 1 кг (1,75 мм). <https://bestfilament.ru/pla-1-1.75-white>.
6. *Bushmina E. A. et al.* The Influence of the Fill and Extrusion Factors in 3D Printing on the Electron and X-Ray Densities of Plastic Products // *Biomed. Engin.* 2022. V. 56, Iss. 4. P. 278–281.
7. 3D-принтер Creator 3 — FlashForge. <https://www.flashforge.com/product-detail/1> (11.11.2022).
8. Линейный медицинский ускоритель Elekta Synergy. <https://www.elekta.com/products/radiation-therapy/synergy> (11.11.2022).
9. IBA Dosimetry Phantom SP34. https://www.iba-dosimetry.com/fileadmin/user_upload/rt-br-e-phantoms-for-ad_rev2_0813.pdf (11.11.2022).
10. Gafchromic EBT3 Specification and User Guide. http://www.gafchromic.com/documents/EBT3_Specifications.pdf (11.11.2022).
11. *Lewis D. et al.* An Efficient Protocol for Radiochromic Film Dosimetry Combining Calibration and Measurement in a Single Scan // *Med. Phys.* 2012. V. 39, No. 10. P. 6339–6350.
12. *Sipilä P. et al.* Gafchromic EBT3 Film Dosimetry in Electron Beams Energy Dependence and Improved Film Read-Out // *J. Appl. Clinical Med. Phys.* 2016. V. 17, No. 1. P. 360–373.

Получено 14 ноября 2022 г.