

УДК 519.24

**ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕДИЦИНСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО
ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ ПЛАСТИКОВОГО КОМПЕНСАТОРА**

Григорьева А.А. (Национальный исследовательский Томский политехнический университет), **Булавская А.А.** (Национальный исследовательский Томский политехнический университет), **Бушмина Е.А.** (Национальный исследовательский Томский политехнический университет), **Милойчикова И.А.** (Научно-исследовательский институт онкологии Томского национального исследовательского медицинского центра Российской академии наук, Национальный исследовательский Томский политехнический университет)
Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Стучебров С.Г.
(Национальный исследовательский Томский политехнический университет)

Аннотация. В работе рассмотрена возможность формирования клинического электронного пучка с помощью изделий, изготовленных из полимерных материалов методами трехмерной печати. Исследования проводились путем численного моделирования процесса взаимодействия ускоренных электронов с пластиковыми тестовыми изделиями методом Монте-Карло и экспериментально на медицинском ускорителе.

Введение. Применение электронной лучевой терапии позволяет достичь хороших терапевтических результатов при лечении опухолей, расположенных на поверхности кожи или вблизи нее. Для успешного решения клинических задач необходимо выполнять требования по обеспечению конкретной формы поля и профиля пучка электронов. Отсюда актуальным становится развитие способов модуляции клинических пучков электронов, то есть изменению таких характеристик, как поперечный профиль и расходимость пучка, глубинное распределение энергетических потерь.

На сегодняшний день для изменения распределения дозы в объеме используют специальные устройства, которые размещаются на пути следования пучка, – клиновидные фильтры, компенсаторы, болусы и другие. Подобные устройства могут изготавливаться из различных материалов, в том числе и тканезквивалентных, но в большинстве случаев предпочтение отдается металлу. Однако в клинической практике распространению данного подхода мешает то, что применение оборудования, предназначенного для выплавки или резки металлических изделий ограничено высокими требованиями к рабочему помещению и условиям работы и квалификации персонала. Решением данной проблемы может стать использование возможностей трехмерной печати. На сегодняшний день уровень развития технологий трехмерной печати позволяет изготавливать изделия, отвечающие высоким требованиям к точности и качеству. Технологии трехмерной печати благодаря своей доступности находят все большее применение в медицине. В рамках данной работы предлагается провести численное моделирование методом Монте-Карло для оценки эффективности формирования медицинских высокоэнергетических электронов изделиями, изготовленными с использованием технологий трехмерной печати.

Основная часть. Данная работа направлена на разработку численной модели выведенного медицинского электронного пучка и формирующего элемента. Численное моделирование проводилось в среде моделирования Geant4. В рамках данной работы был выбран пакет физических процессов, который позволяет моделировать электромагнитные взаимодействия частиц (γ , e^{\pm} , адроны, ионы) в интервале энергий от 1 кэВ – 100 ТэВ.

Геометрия моделирования соответствовала типичной схеме системы формирования клинического электронного пучка. Двухмерное распределение дозы в поперечном сечении пучка анализировалось в водном фантоме на глубине дозного максимума, который составил 1,3 см для номинальной энергии электронов 6 МэВ и 2,7 см для 12 МэВ. Размер вокселя,

определяющего пространственную детализацию моделирования, составил около $0,5 \times 0,5 \times 0,05$ см³, общая толщина детектирующего слоя мишени 2 мм.

Параметры моделирования материалов тестовых объектов были определены на основе экспериментальных испытаний изготовленных тестовых образцов. Тестовые объекты имеют три характерные области: область коллиматора, область клина и область поглотителя с радиальной кривизной поверхности. Максимальная толщина тестового объекта составляет 5 см. Количество отслеживаемых первичных электронов во всех расчетах составило 10^{15} . Статистическая погрешность всех расчетных результатов составила не более 2%.

Для подтверждения результатов моделирования были проведены экспериментальные исследования. Были изготовлены образцы из полимерных материалов (АБС- и ХИПС-пластик) методом послойного наплавления. Эксперименты проводились при расположении тестового объекта в аппликаторе. Геометрия соответствовала геометрии моделирования. Экспериментальные исследования проводились при стандартных параметрах облучения: расстояние от источника до поверхности фантома – 100 см; размер поля – 10×10 см²; нормальное падение пучка электронов на фантом; номинальная энергия пучка электронов – 6 и 12 МэВ.

Были получены расчетные и экспериментальные дозные распределения электронов, сформированные с помощью пластиковых изделий. Для оценки результатов были получены профили распределений по центральной линии каждой характерной области тестового объекта: коллиматор, клин, поглотитель с радиальной кривизной поверхности. Сравнение профилей показало сходимость экспериментальных и расчетных результатов в пределах погрешностей. Таким образом, разработанная модель пригодна для расчета дозного поля электронов, сформированного с помощью полимерных изделий, изготовленных методами трехмерной печати.

Выводы. В результате работы было определено, что пластиковые образцы, изготовленные методом послойного наплавления, поглощают электроны с энергией 6-12 МэВ с достаточной эффективностью и могут быть использованы в качестве компенсаторов для формирования клинического электронного пучка. Разработанные модели пригодны для расчета сформированного дозного поля электронов и позволят проводить подбор геометрических параметров пластиковых формирующих изделий в соответствии с решаемой задачей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 19-79-10014.

Григорьева А.А. (автор)

Подпись

Стучебров С.Г. (научный руководитель)

Подпись