

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С РАДИОХРОМНЫМИ ПЛЕНКАМИ GAFCHROMIC EBТЗ

А.С. Алексеев, А.В. Беринцев, С.Г. Новиков, В.В. Приходько
Научно-исследовательский технологический институт им. С.П.Капицы
Ульяновского государственного университета, Ульяновск

Выполнено компьютерное моделирование взаимодействия рентгеновского излучения с радио-хромными пленками Gafchromic EBТЗ. Численный расчет произведен методом Монте-Карло с использованием библиотек программного пакета Geant4. Показано, что наличие в структуре пленки защитных слоев из полиэфира снижает ее чувствительность к ионизирующему излучению приблизительно в два раза.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, Gafchromic EBТЗ, радиохромная пленка, рентгеновское излучение, дозиметрическая система

Введение

Радиохромная пленка Gafchromic EBТЗ активно применяется в лучевой терапии для решения задач радиационного контроля, в частности, как координатно-чувствительный дозиметр для контроля качества при лучевой терапии с модулированной интенсивностью (ЛТМИ, IMRT) [1, 2]. Традиционная методика применения таких дозиметров заключается в анализе растрового изображения облученных образцов пленки, полученных с помощью планшетного сканера. При этом наибольшие изменения в спектре пропускания приходятся на красный диапазон длин волн с максимумом вблизи $\lambda=636$ нм, поэтому при оценке дозы принято ориентироваться на калибровочную кривую, построенную для красного канала сканера [3].

Диапазон чувствительности пленок Gafchromic к дозе ионизирующего излучения отражен в спецификации на пленку [4], а также неоднократно исследован в литературе [5–8]. Наилучший отклик к излучению находится в диапазоне доз 0,2–10 Гр, при этом учет не толь-

ко красного канала, но и зеленого позволяет расширить диапазон до 40 Гр [3].

Удобный оптический диапазон дает возможность искать отличные от традиционной методики применения радиохромной пленки, например, в малогабаритных дозиметрических системах с использованием светодиодов и фотоприемников. Данное направление в литературе не отражено, возможно, в том числе, по причине ограниченного рабочего диапазона по дозе. В этой связи перспективной задачей является изучение методик расширения диапазона отклика пленки к ионизирующему излучению.

Структура радиохромных пленок Gafchromic в целом схожа. Пленки EBТ2 и EBТЗ имеют идентичный активный слой, однако защитные слои несколько различаются. Активный слой пленки EBТЗ заключен между двумя слоями полиэфира, причем толщина активного слоя почти в 4,5 раза меньше толщины защитного слоя, что может приводить к снижению чувствительности к ионизирующему излучению. В литературе аспекты влияния много-

слоистой структуры плёнки на ее чувствительность не изучались. Экспериментальное исследование в данном направлении затруднено в связи с тем, что при расслоении активный слой теряет свою однородность, и воспроизводимость результатов не достигается. В этой связи, в настоящей работе для оценки влияния защитного слоя на чувствительность всей пленки использовано численное моделирование взаимодействия пленок Gafchromic EBT3 с рентгеновским излучением.

Материал и методы

В настоящее время компьютерное моделирование успешно применяется для расчета параметров взаимодействия излучения с веществом и выполняет следующие функции: предоставляет технологии для изучения динамических процессов; выступает заменой эксперимента; применяется для изучения следствий моделей, гипотез; используется для поддержки эксперимента.

Известные на данный момент математические алгоритмы и численные методы позволяют рассчитать исходы упругих и неупругих столкновений с атомами проходящих через вещество отдельных частиц с высокими энергиями. Столкновения при этом могут быть как динамического, так и кинематического характера, их вероятность оценивается на основе так называемых “сечений взаимодействия” – вероятностей взаимодействия.

На основе известных величин сечений при моделировании могут быть описаны различные эффекты, в том числе: фотоэффект, рассеяние на свободных электронах (томсоновское рассеяние), рассеяние на атомах (рэлеевское рассеяние), Комpton-эффект [9].

Перечисленные эффекты в различной степени имеют место при облучении образцов радиоцветных пленок Gafchromic EBT3. Из доступных математических алгоритмов для проведения расчетов был выбран численный метод Монте-Карло, реализованный в программном пакете моделирования взаимодействия ионизирующих излучений с веществом Geant4 [10]. В сравнении с альтернативными алгоритмами данный метод, несмотря на высокие требования к вычислительной мощности, способен обеспечить необходимую точность расчетов.

Исследуемые материалы представляют собой фрагменты радиоцветной пленки с

размерами 25×12 мм. На рис. 1 представлены объемная модель образца на базе радиоцветной пленки Gafchromic EBT3 и его фотографическое изображение.

Исследуемая радиоцветная пленка Gafchromic EBT3 имеет многослойную структуру: радиоцветный гель на базе компонента LiPCDA толщиной 0,028 мм находится между двумя слоями из полиэфира толщиной 0,125 мм [4]. Таким образом, задача моделирования состоит в том, чтобы, используя численные методы, исследовать процессы взаимодействия ионизирующего излучения с образцами при последовательном прохождении фотонами слоев пленки.

Для моделирования взаимодействия излучения с радиоцветной пленкой было разработано приложение на основе использования библиотеки Geant4 для расчета относительного значения дозы, полученной слоями пленки, и равномерности облучения поверхностей образцов рентгеновским излучением. С использованием специального класса Geant4 была разработана трехмерная модель образца сенсор-

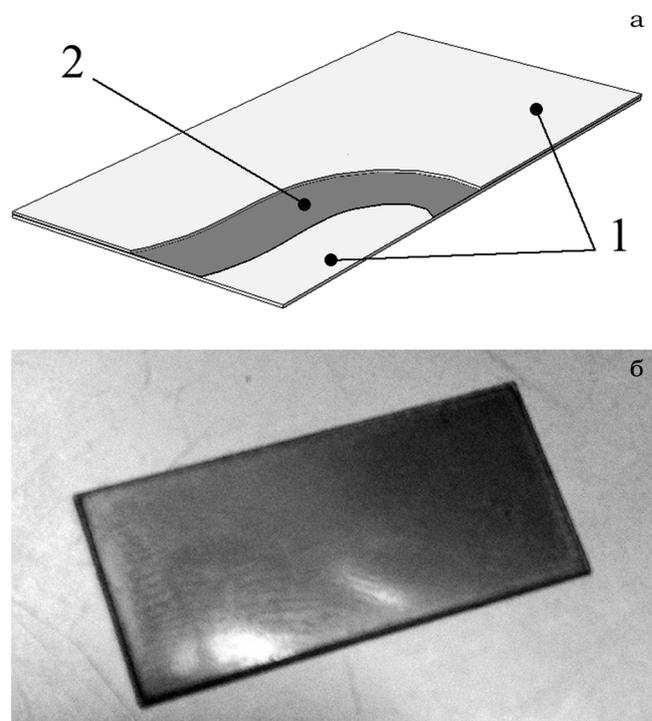


Рис. 1. а – модель исследуемого образца радиоцветной пленки: 1 – слой полиэфира, 2 – активный слой; б – изображение реального экспериментального образца

ного элемента на базе пленки Gafchromic EBT3, учитывающая многослойную структуру материала, были заданы свойства соответствующих материалов.

Для источника рентгеновского излучения разработана модель рентгентерапевтической установки Xstrahl 150 (Gulmay Medical Inc.) со следующими параметрами: диапазон анодного напряжения – 10–150 кВ, ток рентгеновской трубки – до 30 мА, максимальная мощность генератора – 3 кВт, толщина слоя половинного ослабления: минимум – 0,2 мм Al и максимум – 1,0 мм Cu (эквивалентно 13 мм Al), размер фокусного пятна – 7,5 мм, материал анода – вольфрам.

В ходе моделирования использовали расчетный спектр рентгеновского излучения, представленный на рис. 2. Спектр получен с помощью онлайн-алгоритма [11] на основе следующих входных данных: напряжение – 140 кВ, ток – 12 мА, рентгеновский фильтр – медь, материал анода – вольфрам.

С учетом рентгеновского излучения физическая модель для расчета электромагнитных взаимодействий была задана с применением класса G4VUserPhysicsList. Среди доступных в Geant4 физических моделей, описывающих электромагнитные взаимодействия частиц, была выбрана модель "Livermore", позволяющая наиболее точно проводить моделирование в области сравнительно низких энергий. Тип испускаемых частиц, форма и положение источников, угловое распределение частиц по направлениям задавались посредством текстовых команд, предоставляемых соответствующим классом Geant4. Вывод результатов моделирования организован в текстовом виде, также доступна визуализация расчетных траекторий испускаемых гамма-фотонов.

На рис. 3а показана рентгентерапевтическая установка во время проведения эксперимента по облучению образцов пленок: диаметр коллиматора 3 мм, образец пленки располагался на поверхности плоскопараллельной ионизационной камеры TW23342, закрепленной в пластине-адаптере. На рис. 3б представлены результаты численного моделирования с визуализацией траекторий фотонов для случая облучения образца радиохромной пленки рентгеновским излучением в соответствии с вышеописанным экспериментом.

Результаты и обсуждение

На рис. 4 представлены результаты расчета равномерности облучения поверхности образца пленки для активного слоя и внешних слоев из полиэфира. При заданных параметрах облучения образцов показано, что поверхности образцов сенсорных элементов засвечиваются достаточно равномерно.

Результаты расчета доз, поглощенных в каждом из слоев радиохромной пленки: верхнем защитном, активном, нижнем защитном, представлены на рис. 5. Количество фотонов,

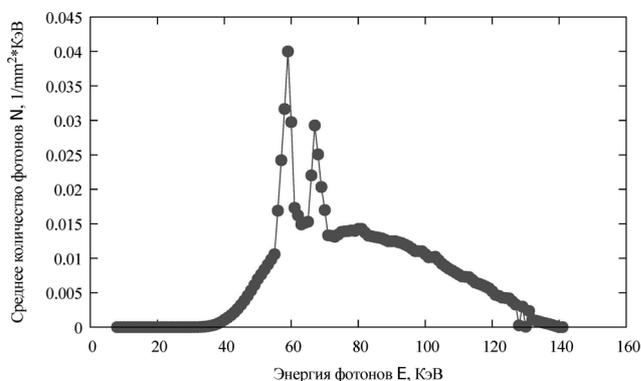


Рис. 2. Расчетный спектр рентгеновского излучения



Рис. 3. а – постановка эксперимента по облучению радиохромных пленок с помощью рентгентерапевтической установки; б – визуализация расчетных траекторий фотонов, полученных в результате моделирования облучения радиохромной пленки рентгеновским излучением

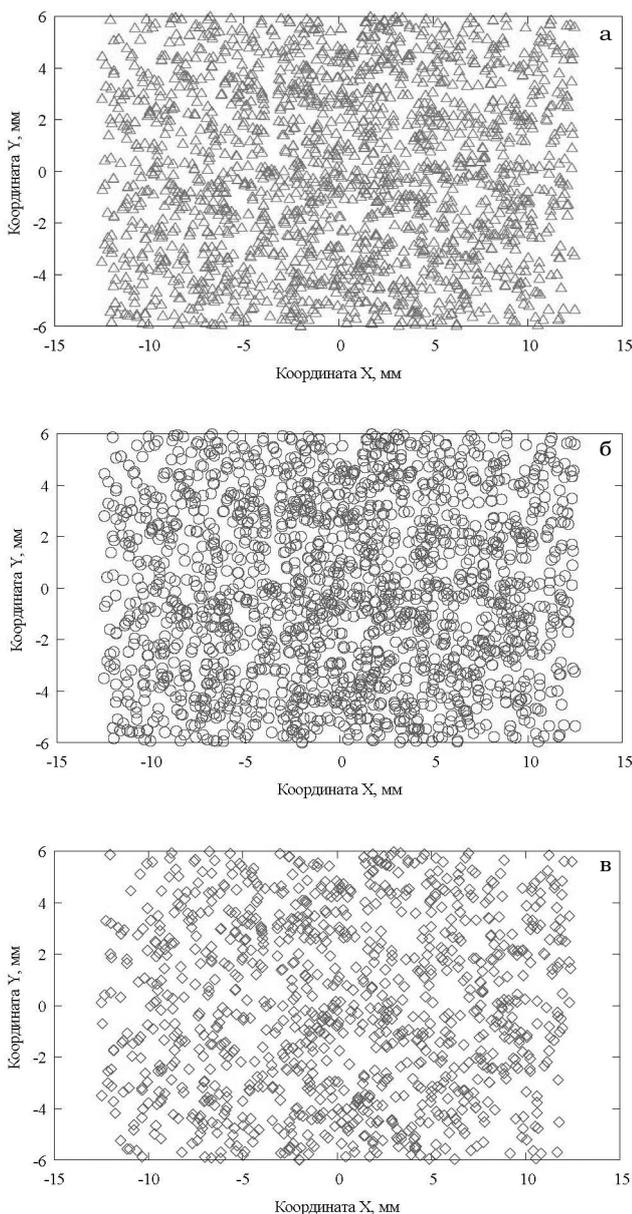


Рис. 4. Послойный расчет равномерности облучения образца радиохромной пленки в условиях эксперимента: а) верхний слой из полиэтилена, б) активный слой, в) нижний слой из полиэтилена

генерируемых при расчете, изменялось в диапазоне нескольких порядков величины. На рисунке показан участок доз, характерный для применения пленки Gafchromic EBТ3. Для каждого слоя наблюдается линейная зависимость поглощенной дозы от количества проходящих через слой фотонов. Отклонения от прямой яв-

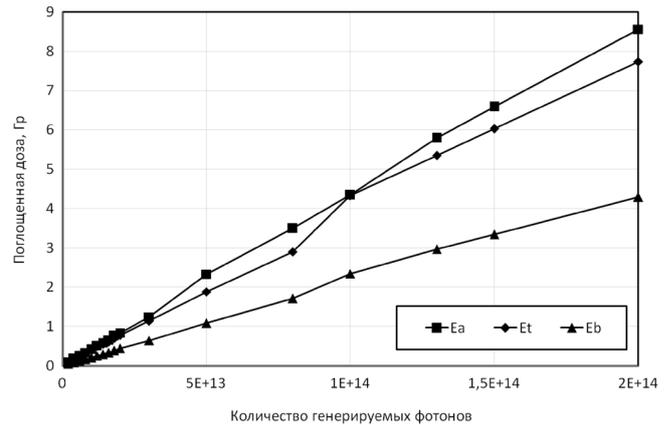


Рис. 5. Расчетные значения поглощенных доз в активном и защитных слоях образцов радиохромной пленки в зависимости от количества генерируемых фотонов: E_a – активный слой, E_t – верхний слой из полиэтилена, E_b – нижний слой из полиэтилена

ляются следствием случайной природы моделирования методом Монте-Карло.

Из рисунка видно, что, несмотря на то, что наибольшее количество фотонов поглощается в активном слое, доза, поглощенная верхним защитным слоем, оказывается сравнимой с ней по величине (отличие составляет приблизительно 8 %). Таким образом, наличие защитного слоя приводит к снижению чувствительности пленки почти в два раза.

Выводы

Численное моделирование радиохромной пленки Gafchromic EBТ3, проведенное с использованием программного пакета Geant4, показало, что величина поглощенной дозы, приходящейся на верхний защитный слой пленки, сравнима по порядку величины с величиной дозы, накопленной в активном слое. Оболочечный слой заметно снижает эффективность детектирования рентгеновского излучения, что особенно актуально при измерениях вблизи нижней границы чувствительности пленки ($\sim 0,1$ Гр). Для целей применения в малогабаритных дозиметрических системах перспективным представляется изучение возможности создания сенсорных элементов на основе радиохромной пленки Gafchromic EBТ3 без внешнего защитного покрытия.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ – Правительство Ульяновской области, проект № 16-48-732146\16.

Список литературы

1. Massillon-JL G., Chiu-Tsao S.-T., Domingo-Munoz I., Chan M. F. Energy dependence of the new Gafchromic EBT3 film: Dose response curves for 50 kV, 6 and 15 mV x-ray beams // *Int. J. Med. Physics, Clin. Eng. and Radiat. Oncol.* 2012. Vol. 1. № 2. P. 60–65.
2. Borca V.C., Pasquino M., Russo G. et al. Dosimetric characterization and use of Gafchromic EBT3 film for IMRT dose verification // *J. Appl. Clin. Med. Phys.* 2013. Vol. 14. № 2.
3. Lewis D., Micke A., Yu X., Chan M.F. Efficient protocol for radiochromic film dosimetry // *Med. Phys.* 2012. Vol. 39. № 10. P. 6339–6350.
4. EBT3 Specification and User Guide (<http://www.gafchromic.com/gafchromic-film/radiotherapy-films/EBT/index.asp>).
5. Reinhardt S., Hillbrand M., Wilkens J.J., Assmann W. Comparison of Gafchromic EBT2 and EBT3 films for clinical photon and proton beams // *Med. Phys.* 2012. Vol. 39. № 8. P. 5257–5262.
6. Zeidan O.A, Stephenson S.A.L., Meeks S.L. et al. Characterization and use of EBT radiochromic film for IMRT dose verification // *Med. Phys.* 2006. Vol. 33. № 11. P. 4064–4072.
7. Brown T.A.D., Hogstrom K.R., Alvarez D. et al. Dose-response curve of EBT, EBT2, and EBT3 radiochromic films to synchrotron-produced monochromatic X-ray beams // *Med. Phys.* 2012. Vol. 39. № 12. P. 7412–7417.
8. Butson M.J., Cheung T., Yu P.K.N., Alnawaf H. Dose and absorption spectra response of EBT2 Gafchromic film to high energy x-rays // *Austral. Phys. & Eng. Sci. Med.* 2009. Vol. 32. № 4. P. 196–202.
9. Беспалов В.И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом. Учебное пособие. – Изд-во Томского политехнического ун-та, 2008. 368 с.
10. Morales M., da Costa Guimaraes C., Okuno E. Monte Carlo simulations of X-ray generation and detection // *INAC 2002: International Nuclear Atlantic Conference*. Vol. 33.
11. Simulation of X-ray Spectra. Online tool for the simulation of X-ray Spectra (<https://www.oem-xray-components.siemens.com/x-ray-spectra-simulation>).

COMPUTER SIMULATION OF GAFCHROMIC EBT3 FILM INTERACTION WITH X-RAY RADIATION

A.S. Alekseyev, A.V. Berintsev, S.G. Novikov, V.V. Prikhodko

S.P. Kapitsa Technological Research Institute of Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia

A computer simulation of the interaction of Gafchromic EBT3 films with X-ray radiation has been done. The computation was based on the Monte Carlo technique using the libraries of the Geant4 software package. It has been shown that the outer polyester layers of the film decrease its sensitivity to ionizing radiation approximately twice.

Key words: *computer simulation, Gafchromic EBT3, Radiochromic Film, X-Ray Radiation, dosimetry system*

E-mail: v_prihodko@mail.ru