

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МИКРОТРОНА С ПОМОЩЬЮ ВЫРАВНИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

И. А. Милойчикова¹, С. Г. Стучебров, И. Б. Данилова, Г. А. Науменко

Томский политехнический университет, Томск, Россия

Разработка новых современных методов формирования профиля электронного пучка становится актуальной задачей с расширением спектра применения электронов как в промышленности, так и в медицине. В данной работе представлены результаты численного моделирования профиля электронного пучка, сформированного выравнивающими фильтрами из различных материалов — алюминия и АБС-пластика. На основе экспериментальной оценки формы и профиля выведенного электронного пучка микротрона была разработана модель, соответствующая реальному пучку. Затем была рассчитана геометрия выравнивающих фильтров из алюминия и АБС-пластика и проведен теоретический анализ профиля электронного пучка.

The development of the new modern methods of the electron profile beam formation becomes an actual task with extending the use of electrons both in industry and in medicine. This paper presents the results of the numerical simulation of the electron beam profile formed by the different flattening filters: aluminum and ABS-plastic. The model of the accelerator beam was developed on the basis of the experimental evaluation of the microtron extracted electron beam profile and shape. On the next step the flattening filters geometry was calculated and the theoretical analysis of the TPU microtron extracted electron beam was carried out.

PACS: 02.60.Cb; 29.27.-a; 87.56.jk

ВВЕДЕНИЕ

Широкий спектр задач, решаемых сегодня с помощью электронных пучков, обуславливает наличие множества различных требований к форме их профиля [1–5]. Это приводит к необходимости создания и развития способов его модуляции. Одним из таких способов является применение новых материалов для изготовления выравнивающих фильтров. Значительная часть исследований в этой области направлена на увеличение точности и экспрессности изготовления фильтров, снижение их стоимости. Наиболее распространенным материалом для изготовления выравнивающих фильтров является алюминий, однако возможной альтернативой ему может быть пластик, применение которого может существенно удешевить и повысить экспрессность методов изготовления фильтров.

На сегодняшний день технологии трехмерной печати благодаря своей доступности находят широкое применение в самых различных отраслях [6, 7]. АБС-пластик в силу

¹E-mail: miloichikova@gmail.com

своей относительно низкой стоимости, доступности и высокой прочности широко применяется в технологиях 3D-печати [8].

В рамках данного исследования была проведена экспериментальная оценка формы и профиля выведенного электронного пучка микротрона Томского политехнического университета (ТПУ). По полученным данным была разработана модель выведенного электронного пучка микротрона ТПУ с энергией 6,1 МэВ, соответствующая реальному пучку. Была рассчитана геометрия выравнивающих фильтров из алюминия и АБС-пластика, проведен теоретический анализ профиля электронного пучка. Заключительным этапом было изготовление выравнивающих фильтров из алюминия и АБС-пластика.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1.1. Источник излучения. В данной работе в качестве источника излучения был выбран микротрон ТПУ. При разработке модели выведенного электронного пучка были использованы следующие характеристики: расходимость пучка — 0,1 рад; размер пучка на выходе $\approx 2,0 \text{ мм}^2$; энергия электронов — 6,1 МэВ [9].

1.2. Программа для моделирования. Разработка модели выведенного электронного пучка микротрона ТПУ проводилась в программе «Компьютерная лаборатория (PCLab)» версии 9.6. Программный пакет позволяет рассчитывать процессы распространения фотонов, электронов, позитронов и протонов в веществе посредством применения метода Монте-Карло [10].

1.3. Геометрия эксперимента. Для разработки модели выведенного электронного пучка микротрона ТПУ на первом этапе исследования была проведена экспериментальная оценка формы и профиля пучка.

В эксперименте вертикальные и горизонтальные профили выведенного электронного пучка микротрона ТПУ измерялись с помощью сканирующей рамки (шаг сканирования 2 мм) и цилиндра Фарадея. Первое измерение проводилось на расстоянии 10 см от выходного окна ускорителя, затем была получена серия профилей с шагом 5 см. Цилиндр Фарадея был расположен на расстоянии 60 см от выходного окна микротрона.

При разработке модели использовался нормальный плоский дисковый (диаметр 2,0 мм) моноэнергетический источник электронов с энергией 6,1 МэВ, соответствующий реальному пучку микротрона ТПУ. Источник располагался перед выходным окном из бериллия толщиной 50 мкм и диаметром 40,0 мм.

На следующем этапе исследования был проведен расчет геометрии выравнивающих фильтров. При моделировании выравнивающий фильтр был расположен на расстоянии 5 см от выходного окна, анализ профиля электронного пучка проводился на расстоянии 15 см от выходного окна. Анализ формы и профиля пучка проводился в воздушной среде.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Горизонтальные и вертикальные профили выведенного электронного пучка микротрона ТПУ были измерены на заданных расстояниях от выходного окна ускорителя. Полученные данные были проанализированы, и проведена оценка значения внутренней

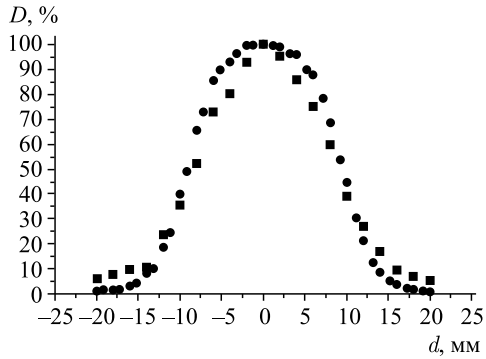


Рис. 1. Профиль выведенного электронного пучка на расстоянии от выходного окна, равном 20 см: ■ — экспериментальные результаты; ● — результаты моделирования

расходимости электронного пучка. На основе экспериментальных данных была разработана теоретическая модель, затем проведено сравнение профилей электронного пучка, полученных экспериментально и с помощью моделирования. В качестве примера на рис. 1 представлены результаты сравнения профилей электронного пучка для данных, полученных экспериментально и с помощью моделирования. Расстояние между сканирующей рамкой и выходным окном составляло 20 см.

Из рис. 1 видно, что результаты моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментом. Незначительное расхождение в области высоких доз между полученными профилями электронного пучка в эксперименте и при моделировании может быть объяснено следующим: влиянием материала сканирующей рамки на поглощение пучка, неидеальными экспериментальными условиями.

На рис. 2 приведены расчетные данные моделирования формы выведенного электронного пучка микротрона ТПУ без выравнивающего фильтра (рис. 2, а), с выравнивающим фильтром из алюминия (рис. 2, б), с выравнивающим фильтром из АБС-пластика (рис. 2, в) на расстоянии 15 см от выходного окна ускорителя. Полученные данные нормализованы на максимальное значение в слое.

На рис. 3 приведены расчетные данные моделирования профиля выведенного электронного пучка микротрона ТПУ без выравнивающего фильтра (рис. 3, а), с выравнивающим фильтром из алюминия (рис. 3, б), с выравнивающим фильтром из АБС-пластика (рис. 3, в) на расстоянии 15 см от выходного окна. Полученные данные нормализованы на максимальное значение в слое.

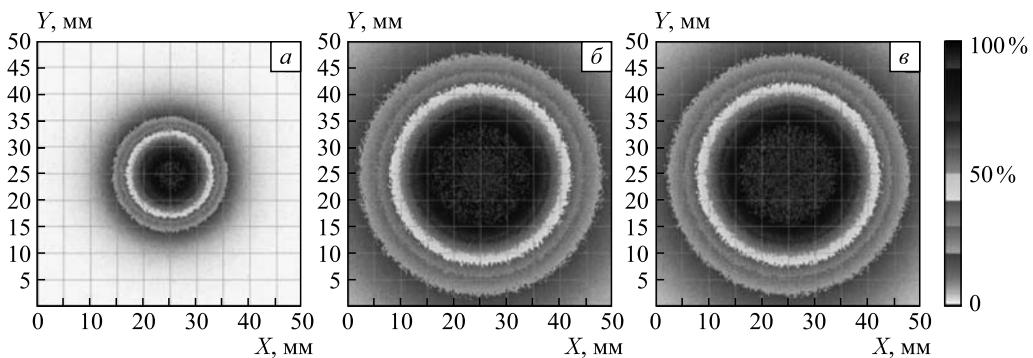


Рис. 2. Форма выведенного электронного пучка микротрона ТПУ на расстоянии от выходного окна, равном 15 см: а) без выравнивающего фильтра; б) с выравнивающим фильтром из алюминия; в) с выравнивающим фильтром из АБС-пластика

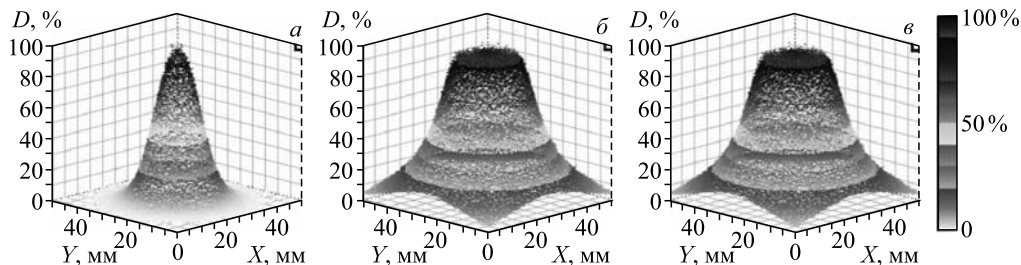
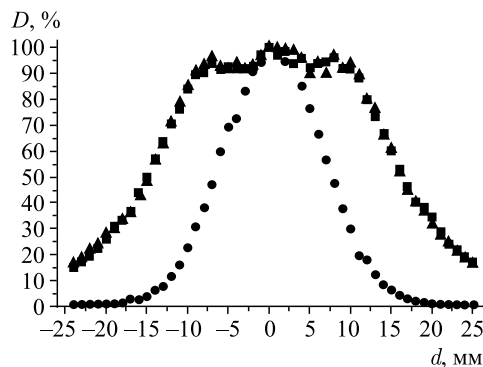


Рис. 3. Профиль выведенного электронного пучка микротрона ТПУ на расстоянии от выходного окна, равном 15 см: а) без выравнивающего фильтра; б) с выравнивающим фильтром из алюминия; в) с выравнивающим фильтром из АБС-пластика

Рис. 4. Нормированный расчетный профиль выведенного электронного пучка микротрона на расстоянии 15 см от выходного окна ускорителя: ● — без выравнивающего фильтра; ▲ — с выравнивающим фильтром из алюминия; ■ — с выравнивающим фильтром из АБС-пластика



Из рис. 2, 3 видно, что применение выравнивающих фильтров позволяет добиться уширения 80% изодозы в три раза.

Из полученных данных следует, что применение выравнивающих фильтров из алюминия и АБС-пластика позволяет получить профиль электронного пучка с заданными параметрами.

На рис. 4 приведены расчетные данные для горизонтального профиля электронного пучка. Данные нормированы на максимальную величину для данного профиля. Расстояние от выходного окна составляло 15 см.

Рис. 4 показывает, что расчетные профили электронного пучка, сформированные с использованием выравнивающих фильтров из алюминия и АБС-пластика, имеют очень схожую форму.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе показана пригодность программы Computerlaboratory (PCLab) для анализа реальных пучков электронов, для расчета геометрии выравнивающих фильтров и теоретической оценки модуляции профилей электронных пучков. Разработанная модель позволяет проводить оценку дозного распределения и размера электронного пучка на любых расстояниях от выходного окна ускорителя. Достоинством моделирования является возможность определения данных характеристик пучка быстрее и проще, чем в эксперименте.

Из расчетных данных видно, что применение выравнивающих фильтров из АБС-пластика позволяет формировать профиль электронного пучка с заданными параметрами столь же эффективно, как и в случае применения фильтров из стандартного материала — алюминия.

В рамках работы механически был изготовлен алюминиевый выравнивающий фильтр, также с применением технологий 3D-печати был изготовлен фильтр из АБС-пластика. Следующим этапом исследования является экспериментальная апробация полученных расчетных данных.

Работа частично выполнена за счет средств субсидии в рамках реализации Программы повышения конкурентоспособности ТПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hamm R. W.* Review of Industrial Accelerators and Their Applications. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1433_CD/datasets/papers/ap_ia-12.pdf.
2. *Bunatian G. G.* Study of the Neutron Flux Generated at e-Linac-Driven Neutron Sources // Part. Nucl. 2012. V. 43, No. 6. P. 1659–1685.
3. *Медовник А. В. и др.* Электронно-лучевая обработка керамики // Физика и химия обработки материалов. 2010. Т. 3. С. 39–44.
4. *Hogstrom K. R., Almond P. R.* Review of Electron Beam Therapy Physics // Phys. Med. Biol. 2006. V. 51. P. R455–R489.
5. *Довбня А. Н., Никифоров В. И., Уваров В. Л.* Концепция мультиизотопного производства на базе ускорителя электронов // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 4–5(174–175). С. 706–711.
6. *Christ S. et al.* Fiber Reinforcement during 3D Printing // Mat. Lett. 2015. V. 139. P. 165–168.
7. Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses. <http://www.ptcommunity.com/system/files/pdf/ptj3910704.pdf>.
8. *Fischer F.* Thermoplastics. <http://www.appliancedesign.com/ext/resources/AM/Home/Files/PDFs/themoplastics.pdf>.
9. *Науменко Г. А. и др.* Обнаружение дифракционного излучения в диэлектрической мишени в условиях генерации излучения Вавилова–Черенкова // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 94, вып. 4. С. 280–283.
10. *Беспалов В. И.* Компьютерная лаборатория (версия 9.6). Томск: Изд-во ТПУ, 2015. 115 с.