

РАСЧЕТЫ ВЫХОДА ФОТОНОВ ИЗ МИШЕНИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

Р. А. Збруев, А. А. Батов, Т. В. Бондаренко¹, С. М. Полозов

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

Разработка медицинского компактного линейного ускорителя для лучевой терапии в НИЯУ МИФИ находится на завершающей стадии производства. Данный ускоритель электронов будет использоваться, чтобы генерировать гамма-излучение для дистанционной лучевой терапии пациента. Тема данной статьи — расчеты процесса выхода фотонов из мишени. Представлены результаты моделирования спектра и направленности излучения методом Монте-Карло без применения сглаживающего фильтра или внешней коллимации.

The development of a compact linear accelerator for the medical radiation therapy facility has come to the final stage of production at NRNU MEPHI. The developed linac will be used to generate a photon flux for the external beam therapy for the cancer treatment. Generation of the photon flux in the linac's target is the topic of this paper. The results of the Monte Carlo simulations for the radiation spectrum and directivity without applying a flattening filter or external collimation are presented.

PACS: 29.20.Ej; 87.56.bd; 87.56.J-

ВВЕДЕНИЕ

Линейные ускорители электронов S-диапазона находят широкое применение в различных областях от промышленности до медицины. В частности, такие ускорители используются в учреждениях по лечению онкологических заболеваний. Установка для дистанционной терапии злокачественных опухолей с линейным ускорителем электронов на энергию 6,3 МэВ разрабатывается совместно НИЯУ МИФИ и АО «НИИТФА».

В качестве ускоряющей структуры решено использовать ускоряющую секцию на основе бипериодической структуры с внутренними ячейками связи и повышенным коэффициентом связи, разработанную в НИЯУ МИФИ [1–3]. Такой тип структуры хорошо зарекомендовал себя в ускорителях прикладного назначения. Конструкции ускоряющей структуры и мишени были усовершенствованы в ходе разработки с целью улучшения электродинамических характеристик. В работах [4, 5] показаны изменения, сделанные после изготовления и измерений структуры.

¹E-mail: TVBondarenko@mephi.ru

Пучок фотонов генерируется электронами, которые попадают в металлическую мишень. В данном случае выбор материала мишени является одним из ключевых аспектов разработки, поскольку он повышает эффективность генерации пучка фотонов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Для проведения расчетов разработана модель мишени и коллимационной системы (рис. 1). Эта модель была использована для оценки генерируемого фотонного излучения методом Монте-Карло. Водный фантом, представляющий собой прямоугольный параллелепипед с линейными размерами $30 \times 30 \times 40$ см, на рисунке не показан. Расстояние между мишенью и поверхностью водного фантома составляло 100 см. Для расчетов динамики электронного пучка в ускорителе применялась программа BEAMDULAC [6, 7]. Полученные спектры использовались для задания параметров моделирования первичных пучков. Были получены три спектра с разной средней энергией и полной шириной на половине высоты (FWHM): rev. 1, rev. 2 и rev. 3. Значения параметров спектров показаны на рис. 2. Важно отметить, что импортированные спектры для проведения моделирования методом Монте-Карло аппроксимированы по Гауссу.

Для первой серии моделирования с различными спектрами электронов рассматривался сплав ВМ-5-3. Спектр тормозного излучения после прохождения через стальную фольгу толщиной 0,2 мм показан на рис. 3, а, б. Фольга расположена между медным охлаждающим слоем и первичным коллиматором. Она используется для защиты меди от атмосферного воздействия.

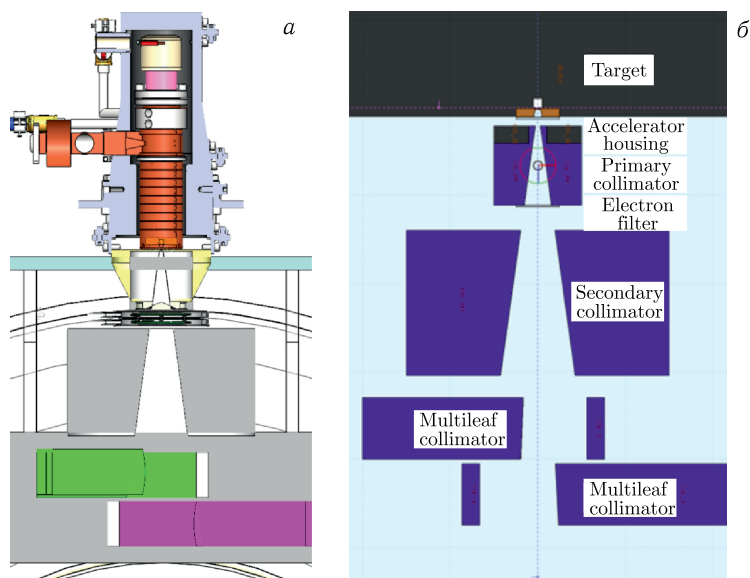


Рис. 1. Конструкция ускорителя и системы коллимации (а) и упрощенная схема системы коллимации (б)

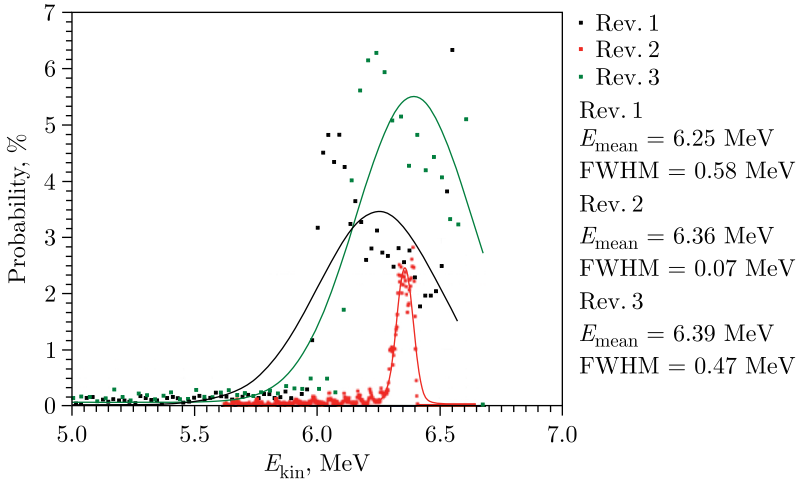


Рис. 2. Спектры электронного пучка, используемые в расчетах методом Монте-Карло

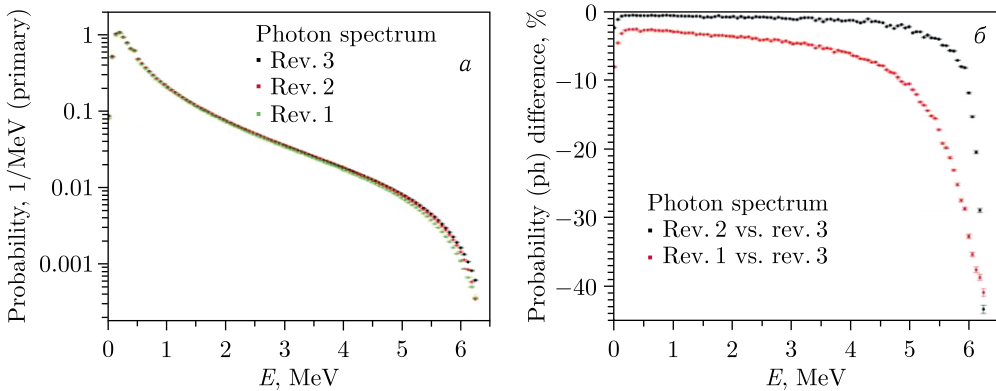


Рис. 3. Спектры фотонов на выходе мишени из ВНМ-5-3 (а) и разница между спектрами для различных первичных пучков (б)

Для спектров rev. 1 и rev. 2 наблюдается уменьшение интенсивности излучения в диапазоне максимальных энергий. Снижение интенсивности в диапазоне 1–2 МэВ равно 1 и 3% для rev. 2 и rev. 1 соответственно.

В связи с результатами, изложенными выше, спектр rev. 3 был выбран для анализа $TPR_{20,10}$ и $PDD_{20,10}$. Параметр $PDD_{20,10}$ оценивался по дозе, поглощенной водным фантомом. Уравнение из [8] было применено для расчета $TPR_{20,10}$ по $PDD_{20,10}$.

Модель для оценки $TPR_{20,10}$ (с другими положениями водного фантома относительно мишени) также была получена с применением FLUKA. Результаты для $TPR_{20,10}$, рассчитанные по уравнению и оцененные в FLUKA, сходятся в пределах погрешности.

Некоторые другие параметры были рассчитаны для других материалов мишени: чистого вольфрама, сплавов ВР-20 и ВНМ-5-3. Выход фотонов показан на рис. 4, а, б.

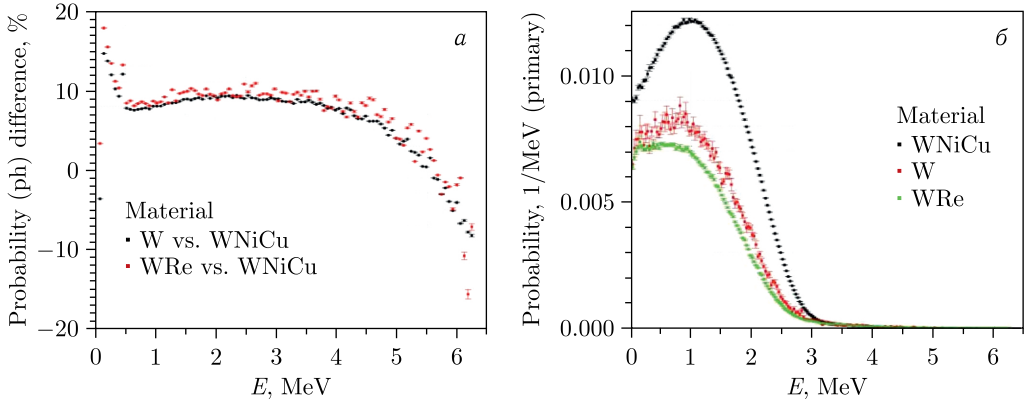


Рис. 4. Разница между спектрами для разных материалов мишени (а) и спектры электронов для различных материалов мишени (б)

Выход фотонов для мишени из чистого материала и мишеней ВР-20 выше, чем для ВНМ-5-3 (из-за более высокого среднего атомного номера Z этих материалов). Число электронов, проходящих через мишень, относительно общего числа фотонов для вольфрама, сплавов ВНМ-5-3 и ВР-20 равно 2,1, 3,3 и 1,8% соответственно. Эти значения объясняются различной плотностью материалов.

Результаты для $TPR_{20,10}$, $PDD_{20,10}$ и зависимости дозы от глубины распределения приведены на рис. 5 и в таблице. Распределение электронов и фотонов после

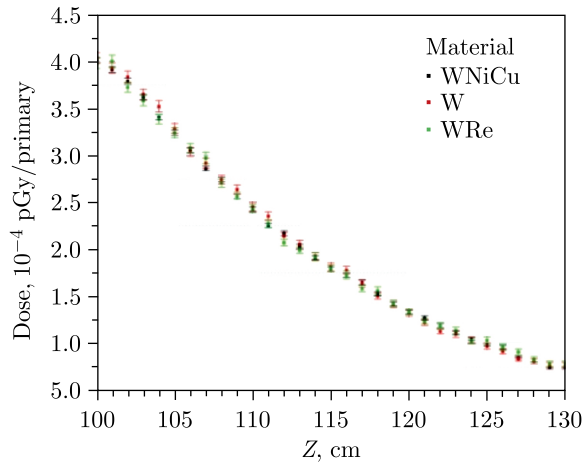


Рис. 5. Зависимость поглощенной дозы от распределения по глубине вдоль оси водного фантома

Значения параметров излучения для различных материалов мишени

Параметр	W	ВНМ-5-3	ВР-20
$PDD_{20,10}$	$0,539 \pm 0,024$	$0,552 \pm 0,017$	$0,554 \pm 0,023$
$TPR_{20,10}$	$0,624 \pm 0,028$	$0,639 \pm 0,020$	$0,642 \pm 0,026$

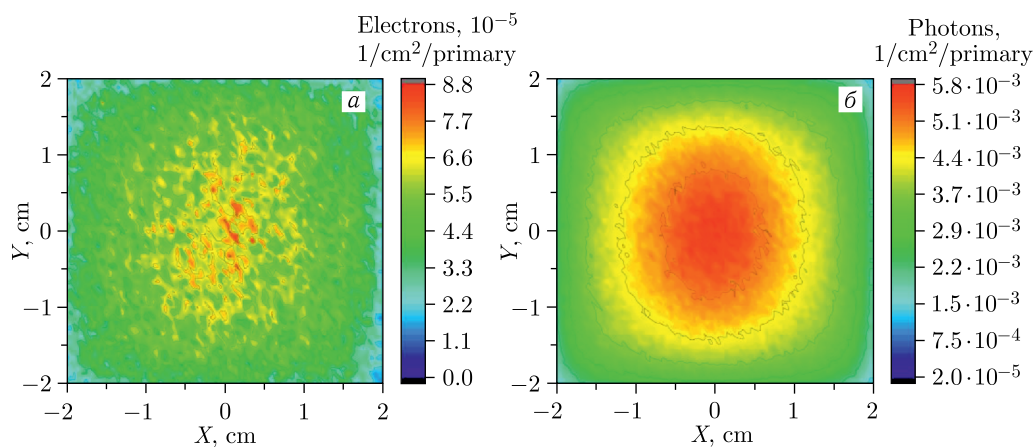


Рис. 6. Распределение электронов (а) и распределение фотонов после прохождения алюминиевого фильтра (б)

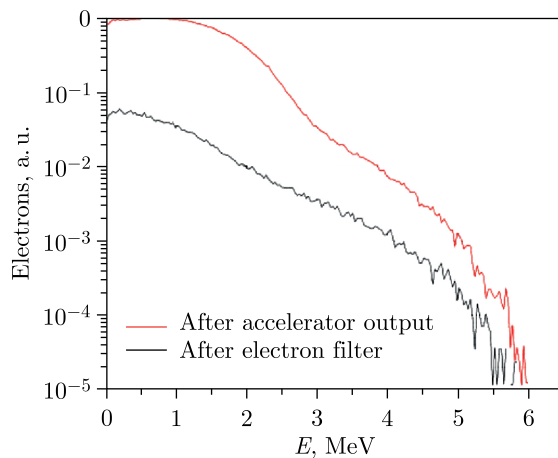


Рис. 7. Электронные спектры на выходе ускорителя и после прохождения алюминиевого электронного фильтра

прохождения алюминиевого электронного фильтра показано на рис. 6, а, б. На рис. 7 изображены спектры электронов на выходе ускорителя и после прохождения алюминиевого электронного фильтра в относительных единицах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты демонстрируют преимущества ВМ-5-3 как оптимального выбора при разработке мишени линейного ускорителя электронов для дистанционной лучевой терапии с точки зрения выхода излучения и долговечности. Этот сплав не теряет преимуществ чистого вольфрама (с точки зрения тепловой на-

грузки), но также не подвержен эффекту радиационного охрупчивания. Стоит отметить, что оптимизация конструкции коллимационной системы имеет важное значение при использовании материала ВМ-5-3 из-за более высокого выхода электронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Polozov S. M., Rashchikov V. I., Demsky M. I.* Beam Dynamics in New 10 MeV High-Power Electron Linac for Industrial Application // Proc. of the 25th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC 2016), Saint Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. V. 63, No. 1999. P. 493–495.
2. *Basyk D. S. et al.* New 10 MeV High-Power Electron Linac for Industrial Application // Proc. of the 7th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC 2016), Busan, Korea, May 8–13, 2016. V. 1796. P. 1794–1796.
3. *Basyk D. S. et al.* Commissioning and First Tests of the New Standing Wave 10 MeV Electron Accelerator // Proc. of the 25th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC 2016), Saint Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 173–175.
4. *Batov A. A. et al.* Developing and Optimizing the S-Band Accelerating Structure and Coupling Device for the Radiation Therapy Facility // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20, No. 4. P. 699–703.
5. *Artamonov K. G. et al.* Target Material Selection for New O-Ring Gantry Linac // AIP Conf. Proc. 2023. V. 2726, No. 1.
6. *Bondarenko T. V., Masunov E. S., Polozov S. M.* BEAM-DULAC-BL Code for 3D Simulation of Electron Beam Dynamics Taking into Account Beam Loading and Coulomb Field // Prob. Atom. Sci. Technol. 2013. V. 6. P. 114–118.
7. *Masunov E. S., Polozov S. M.* BEAMDULAC Code for Numerical Simulation of 3D Beam Dynamics in a High-Intensity Undulator Linac // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 558, No. 1. P. 184–187.
8. *Followill D. S. et al.* An Empirical Relationship for Determining Photon Beam Quality in TG-21 from a Ratio of Percent Depth Doses // Med. Phys. 1998. V. 25, No. 7. P. 1202–1205.

Получено 15 сентября 2023 г.