

УДК 539.1.06

DOI 10.18413/2075-4639-2018-50-3-323-328

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА  
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПОПЕРЕЧНОЙ ПЛОСКОСТИ НА ОСНОВЕ  
МНОГОУГЛОВОГО ПРОВОЛОЧНОГО СКАНИРОВАНИЯ**

**RECONSTRUCTION OF THE ELECTRON BEAM FLUX  
DENSITY DISTRIBUTION IN THE TRANSVERSE PLANE BASED  
ON THE MULTI-ANGLE WIRE SCANNING**

**<sup>1</sup>А.А. Красных, <sup>1,2</sup>И.А. Милойчикова, <sup>1</sup>Г.А. Науменко, <sup>1</sup>Ю.М. Черепенников,  
<sup>1</sup>С.Г. Стучебров  
А.А. Krasnykh, I.A. Miloichikova, G.A. Naumenko, Yu.M. Cherepennikov,  
S.G. Stuchebrov**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation, 634050, Tomsk,  
Lenin Avenue, 30

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт онкологии Томского национального исследовательского  
медицинского центра Российской академии наук,  
Российская Федерация, 634009, г. Томск, пер. Кооперативный, 5  
Cancer research institute of Tomsk national research medical center of the Russian academy of sciences,  
Russian Federation, 634009, Tomsk, Kooperativny Street, 5

E-mail: krasnykh@tpu.ru, miloichikova@tpu.ru, naumenko@tpu.ru, yuryche@tpu.ru, stuchebrov@tpu.ru

**Аннотация**

В работе представлены результаты измерения распределения плотности потока электронного пучка в поперечной плоскости. Набор экспериментальных данных осуществляется путем многократного сканирования в разных направлениях с заданным угловым смещением тонкой металлической пластиной в плоскости, перпендикулярной оси пучка. Интенсивность тока прошедшего пучка измерялась с помощью цилиндра Фарадея. При помощи обратного преобразования Радона экспериментальные данные, представляющие собой зависимость полного тока пучка от положения и угла ориентации пластины, пересчитывались в зависимость тока от координат в поперечном сечении пучка.

**Abstract**

The results of reconstruction of the electron beam flux density distribution in the transverse plane are presented in the paper. The reconstruction is based on the multi-angle wire scanning and the mathematical processing via the inverse Radon transformation. The data set is performed by thin metal plate multiple scanning in a plane perpendicular to the beam axis at different angles with a specified offset. The intensity of the beam current was measured by a Faraday cup during the experiment. Within framework, the dependence of the beam current from the position and orientation angle of the plate was transformed into a dependence from the vertical and horizontal coordinates in the cross section.

**Ключевые слова:** электронные пучки, диагностика пучков, плотность потока электронов.

**Keywords:** electron beam, beam diagnostics, electron flux density.

## Введение

Сегодня источники электронов нашли широкое применение в научных исследованиях, а также для решения различных прикладных задач, таких как лучевая терапия, стерилизация медицинских изделий, сварка, процессы микроструктурирования, плавление высокочистых металлов и многих других [1–7]. При работе с такими устройствами необходимо контролировать характеристики электронных пучков. Одной из наиболее важных среди них является распределение плотности потока электронов в поперечном сечении пучка. В работе [8] был предложен метод измерения данной характеристики, основанный на математической реконструкции данных, полученных путем многократного сканирования пучка тонкой пластиной под разными углами.

В данной работе представлены результаты определения распределения плотности потока электронного пучка в поперечной плоскости предложенным методом, приведено обсуждение полученных результатов и разработаны решения доработки метода для повышения его качества и точности.

## Материалы и методы

В качестве источника излучения использовался ускоритель Микротрон ТПУ с энергией электронного пучка, равной 6,1 МэВ. Размер поперечного сечения пучка на выходе составлял  $4,0 \times 2,0$  мм<sup>2</sup> [9].

В работе [8] оценивалось качество результатов реконструкции при различном количестве углов сканирования. Было определено, что их должно быть не менее 20. На основе этого было разработано сканирующее устройство, которое представляет собой прямоугольную алюминиевую раму толщиной 10 мм, с семью плоскими элементами шириной 1 мм, расположенными относительно друг друга под разными углами с шагом 9° (рис. 1а).

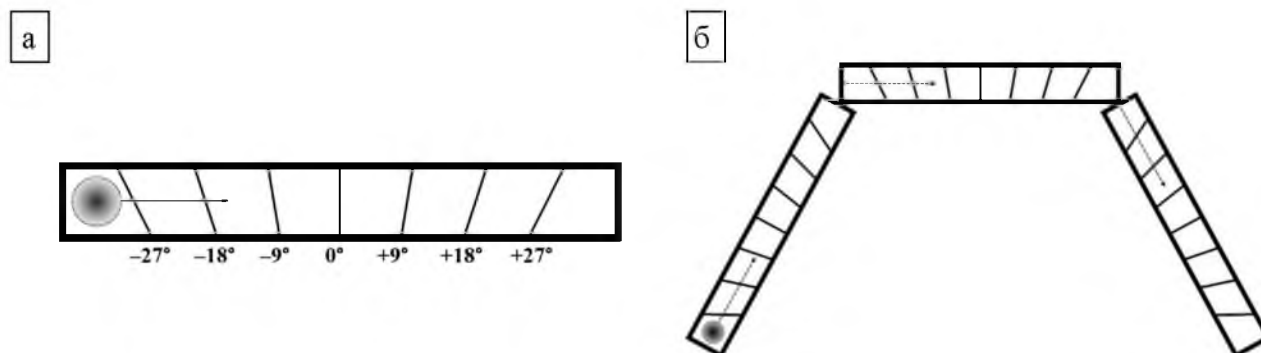


Рис. 1. Схема сканирующего устройства (а) и схема сканирования сечения пучка (б)  
Fig. 1a. Scheme of scanning device (a) and beam cross-section scanning scheme

На рис. 1а стрелкой показано условное направление движения пучка относительно сканирующего устройства. В эксперименте положение пучка не изменялось, а перемещалась металлическая рама. При движении устройства пучок последовательно пересекался пластинами, ориентированными под углами  $-27^\circ$ ,  $-18^\circ$ ,  $-9^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+9^\circ$ ,  $+18^\circ$ ,  $+27^\circ$  по отношению к вертикали. В следующих сканированиях ориентация и направление движения рамки изменялось на  $\pm 63^\circ$  (рис. 1б), что позволило получить 21 зависимость тока пучка от положения сканирующей пластины, ориентированной под углами от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$  с шагом  $9^\circ$ .

Ток пучка на расстоянии 100 см от выходного окна ускорителя измерялся с помощью цилиндра Фарадея. Кроме этого, в устройстве вывода пучка был установлен индукционный датчик. Данные, полученные с цилиндра Фарадея, нормировались на сигнал индукционного датчика, что позволяло учесть возможные изменения полного тока ускоренных частиц, обусловленные особенностями работы ускорителя. В эксперименте сканирующее

устройство располагалось между источником излучения и цилиндром Фарадея. Часть электронов поглощалась и рассеивалась на плоских элементах сканирующей рамки, таким образом, сигнал на цилиндре Фарадея менялся в зависимости от положения сканера. Экспериментальная геометрия показана на рис. 2.

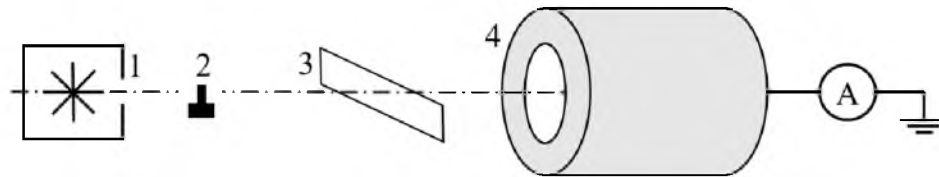


Рис. 2. Геометрия эксперимента: 1 – источник; 2 – металлическая мишень; 3 – сканирующее устройство; 4 – цилиндр Фарадея

Fig. 2. The geometry of the experiment: 1 – source of electrons; 2 – metallic barrier; 3 – scanning plane; 4 – Faraday cup

При исследовании рассматриваемого метода проводилось сканирование пучка без мишени и пучка с металлической мишенью сложной формы, которая располагалась максимально близко к выходному окну ускорителя (рис. 2).

Кроме этого для оценки эффективности метода были проведены дополнительные измерения распределения потока электронов в поперечном сечении пучка дозиметрическими пленками Gafchromic EBT2 [10], которые устанавливались на том же расстоянии, что и сканирующая рамка.

### Результаты и их обсуждение

В ходе эксперимента были получены зависимости тока электронного пучка, детектируемого цилиндром Фарадея от позиции сканирующего устройства. На рис. 3 представлен внешний вид полученных данных, нормированных на единицу.

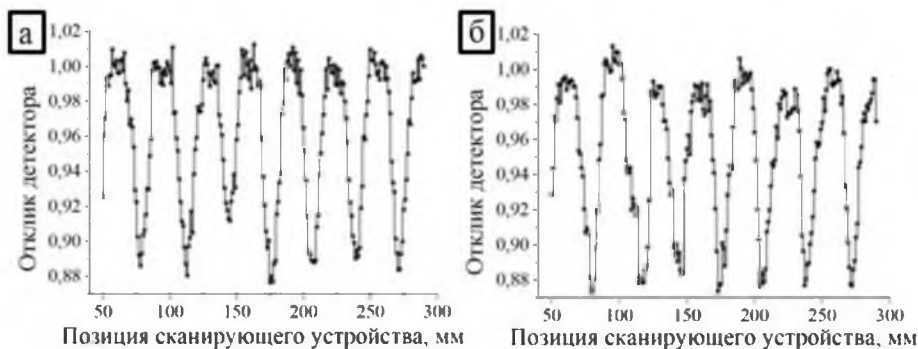


Рис.3. Экспериментальные данные: а – без мишени; б – с мишенью

Fig. 3. The data obtained by experimental set up: a – without barrier; b – with barrier

На следующем этапе экспериментальные данные (рис. 3) были разделены на отдельные пики. Для каждого пика был определен центр с учетом его положения и относительного смещения плоскостей сканирования устройства. Полученные результаты представляли собой 21 группу из 31 параметра отклика детектора со значением от 0 до 1. Для подготовки синоптамы, являющейся графическим представлением результатов сканирования, принятым в томографических исследованиях, значения от 0 до 1 были переведены в градации серого, после чего каждая из 21 групп данных была преобразована в графическое изображение размером  $1 \times 31$  пиксель (строчку длиной 31 пиксель).

Ширина шага в каждом пике пересчитывалась, так как смещение пластины относительно центра пучка меняется при разных углах. Для этого ширина строчек изменялась с 31 на большее значение и умножалась на синус угла наклона пластины. Полученные строчки,

имеющие разную ширину, центрировались и складывались в соответствующем порядке в двухмерные изображения. Неровные края синограмм обрезались для получения прямоугольного изображения. На рис. 4 представлены полученные синограммы для пучка без мишени и с мишенью.

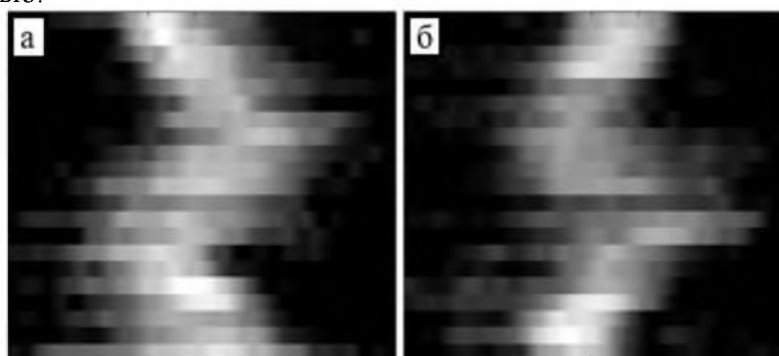


Рис. 4. Результаты сканирования, представленные в виде синограмм:  
а – без мишени; б – с мишенью

Fig. 4. Scanning results in terms of sinograms: a – without barrier; b – with barrier

После этого при помощи методов томографической реконструкции из синограмм восстанавливались поперечные профили пучков [11].

На рис. 5 и 6 представлены поперечные профили пучков, полученные дозиметрическими пленками (а) и сканирующим устройством после реконструкции (б) без мишени и с мишенью соответственно.

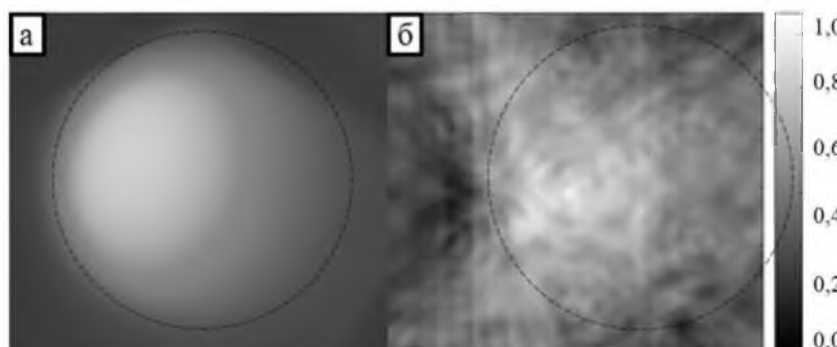


Рис. 5. Результаты измерения профиля пучка без мишени с помощью:  
а – дозиметрических пленок; б – предлагаемого метода

Fig. 5. The data comparison of beam profile measurement without barrier obtained by:  
a – dosimetric film; b – the offered method

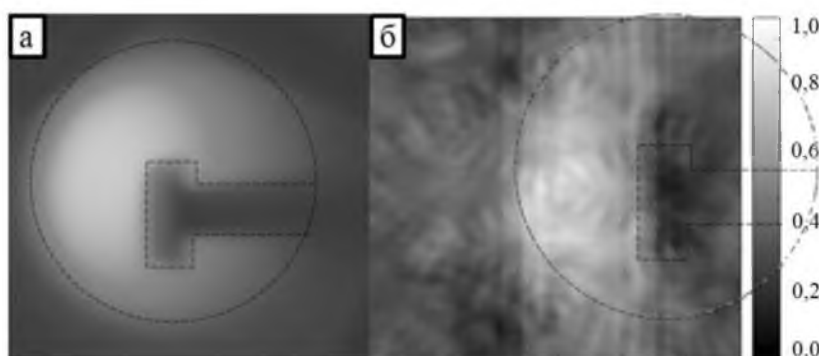


Рис. 6. Результаты измерения профиля пучка с мишенью с помощью:  
а – дозиметрических пленок; б – предлагаемого метода

Fig. 6. The data comparison of beam profile measurement with barrier obtained by:  
a – dosimetric film; b – the offered method

На рис. 5б и 6б видно горячее пятно, также зафиксированное при помощи пленочного дозиметра (рис. 5а, 6а). На рис. 6б просматривается характерный контур мишени. Видно, что результаты реконструкции позволяют оценить форму пучка, однако качество полученных реконструкций недостаточно высокое. На это влияет нестабильность тока измеряемого пучка и большое количество электромагнитных наводок на измерительное оборудование, что обуславливает наличие артефактов в результатах реконструкции.

Использование цилиндра Фарадея приводит к полной потере пучка, что не всегда применимо. Поэтому возникла идея измерять уровень тока электронов, поглощенных не в детекторе, а в сканирующей рамке. Сигналы с цилиндра и рамки должны иметь обратную корреляцию. На рис. 7 представлены данные, полученные одновременно с помощью цилиндра Фарадея и непосредственно со сканирующего устройства.



Рис. 7. Сравнение экспериментальных данных, полученных: —◆— с помощью цилиндра Фарадея, —●— непосредственно со сканирующего устройства

Fig. 7. Experimental data comparison obtained by: —◆— Faraday cup; —●— the scanning device

Полное отсутствие корреляции данных демонстрирует то, что сигнал, полученный непосредственно со сканирующего устройства, обусловлен, в первую очередь, высокочастотными электромагнитными наводками от магнетрона системы питания и других узлов установки.

Одним из путей решения проблем с наводками может быть использование в качестве сканирующего элемента оптоволоконный фибер. Возможности такого подхода описаны в работах [12–15]. Подход основан на генерации излучения Вавилова-Черенкова электронами в оптоволоконных фиберах и его дальнейшей регистрации фотоэлектронным умножителем. В этом случае анализ интенсивности излучения Вавилова-Черенкова, генерируемого в фибере при различных его положениях, может быть использован в качестве альтернативы анализу тока пучка электронов, зарегистрированного цилиндром Фарадея, или тока электронов, поглощенных в сканирующей рамке.

### Заключение

В работе был апробирован метод измерения распределения плотности потока электронного пучка в поперечной плоскости с помощью сканирующего устройства на основе результатов многоуглового проволочного сканирования. Реконструированы профили пучка электронов с мишенью и без.

Не смотря на наличие существенного количества шумов в исходном сигнале, обуславливающих множество артефактов в реконструкции, полученные данные позволяют оценить поперечные профили электронных пучков. Для уменьшения количества шумов, обусловленных электромагнитными наводками, и увеличения эффективности исследуе-



мого метода было предложено заменить металлические пластины на оптоволоконные фиберы, изготавливаемые из диэлектрических материалов. В таких фиберах под воздействием высокоэнергетических электронов возникает излучение Вавилова-Черенкова, анализ интенсивности которого при многоугловом сканировании также позволяет восстановить распределение плотности потока электронного пучка в поперечной плоскости.

*Работа выполнена в рамках программы развития конкурентоспособности Томского политехнического университета.*

#### Список литературы References

1. Chu W.T. Accelerators and medicine // Journal of the Korean Physical Society. 2007. V. 50, № 5. P. 1385–1389.
2. Алимов А.С. 2011. Практическое применение электронных ускорителей. Препринт НИИЯФ МГУ № 2011. Т. 13, № 877. Москва.  
Alimov A.S 2011. Practical applications of electron accelerators. Preprint MSU SINP N 2011 – 13/877. Vol. 13, № 877 [in Russian].
3. Biamino S. et al. 2011. Electron beam melting of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation. Intermetallics, 19, № 6: 776–781.
4. Бакланов Д.А. и др. 2010. Оценка характеристик кристаллов большой толщины с помощью излучения в них быстрых электронов. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика, 21, №. 23 (94).  
Baklanov D.A. et al. 2010. Characteristics Estimate of the Large Thickness Crystals by Means of Fast Electrons Irradiation. Scientific Bulletins of Belgorod State University. Series: Mathematics. Physics, 21, № 23 (94) [in Russian].
5. Дружинина А.А. 2015. Анализ точности позиционирования по стыку соединения при электронно-лучевой сварке в условиях компенсации магнитных полей // Современные проблемы науки и образования, №. 1-1:177.  
Druzhinina A.A. 2015. Analysis of the positioning accuracy along the joint connection in electron beam welding in the conditions of compensation of magnetic fields. Modern problems of science and education, №. 1-1: 177 [in Russian].
6. Vieu C. et al. 2000. Electron beam lithography: resolution limits and applications // Applied surface science, 164, №. 1-4: 111-117.
7. Sing S.L. et al. 2016. Laser and electron- beam powder- bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. Journal of Orthopaedic Research, Т. 34, № 3: 369-385.
8. Stuchebrov S.G. et al. 2016. Development of the method for the electron beam spatial distribution determination in the transverse plane. AIP Conference Proceedings, 1772. Article number 060016. P. 1–7.
9. Aleinik A.N., Aryshev A.S., Kalinin B.N. et al. 2002. Coherent Diffraction Radiation of a 6-MeV Microtron Electron Beam. JETP Letters, 76, no. 6: 337–340.
10. GAFCHROMIC EBT2 self-developing film for radiotherapy dosimetry. [дата обращения: 29.08.2017] Режим доступа: [http://www.veritastk.co.jp/attached/2062/GAFCHROMICEBT2\\_Technical-Brief-Rev1.pdf](http://www.veritastk.co.jp/attached/2062/GAFCHROMICEBT2_Technical-Brief-Rev1.pdf).
11. Control and reconstruction programs [дата обращения: 29.08.2017] Режим доступа: <http://bruker-microct.com/products/downloads.htm>.
12. Wu S. et al. 2013. Transverse beam profile diagnostic using fiber optic array. Proceedings of PAC. 2013: 1205-1207.
13. Vukolov A.V. et al. 2016. Electron beam diagnostics tool based on Cherenkov radiation in optical fibers. Journal of Physics: Conference Series, 732, №. 1: 012011.
14. Seibel E. J. 2005. Medical imaging, diagnosis, and therapy using a scanning single optical fiber system : patent 6975898 USA.
15. Goettmann W., Körfer M., Wulf F. 2007. Beam profile measurement with optical fiber sensors at FLASH. Proc. of DIPAC. – TUPB, 25: 123–125.