

**МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ  
В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ПУЧКА НА ОСНОВЕ  
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ**

И.А. Милойчикова, И.Б. Данилова, С.Г. Стучебров

Научный руководитель: младший научный сотрудник, А.В. Батранин  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: miloichikova@gmail.com

**MEASUREMENT METHOD OF FLUX DISTRIBUTION IN THE ELECTRON BEAM  
CROSS-SECTION BASED ON MATHEMATICAL RECONSTRUCTION**

I.A. Miloichikova, I.B. Danilova, S.G. Stuchebrov

Scientific Supervisor: junior researcher, A.V. Batranin  
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050  
E-mail: miloichikova@gmail.com

***Abstract.** In the article the possibility of the device creation for the electron flux density distribution measurement in the beam cross section based on mathematical reconstruction are shown. The results of the determination of the minimum projections number for the reliable reconstruction of such objects are illustrated.*

**Введение.** Электронные пучки широко применяется в медицине и других прикладных науках. С каждым днем появляется все больше приборов, основанных на использовании электронных пучков [1-2]. Одним из основных свойств пучков является распределение плотности потока электронов в поперечном сечении. Современные методы для измерения этого параметра обладают рядом недостатков: основанные на использовании пространственнораспределенных ионизационных камер, имеют низкое разрешение [3]; на пленках и люминесцентнции – ограничены по максимальной дозе [4, 5]; на использовании одноразовых элементов, изменяющих свои характеристики при облучении – неудобны из-за необходимости контроля характеристик материалов разных партий изготовления [6]. Таким образом, существует необходимость развивать имеющиеся и разрабатывать новые методы измерения распределения плотности потока электронных пучков в поперечном сечении.

В данной работе описываются исследования, направленные на создание такой системы. Суть метода основывается на поперечном сканировании пучка тонкой полоской под разными углами. Сечение распределения плотности потока электронов восстанавливается обратным преобразованием Радона из зависимости тока прошедшего пучка от положения сканирующего элемента.

**Методика определения поперечного распределения пучка путем сканирования.**

*Принцип действия.* Предлагаемый метод измерения распределения плотности потока электронов в поперечном сечении заключается в сканировании пучка тонкой полоской в заданной плоскости, частично перекрывающей поток электронов, ток которого измеряется цилиндром Фарадея.

Сканирование повторяется многократно под разными углами. Схема эксперимента представлена на рисунке 1. Схема сканирования в плоскости сечения пучка представлена на рисунке 2.

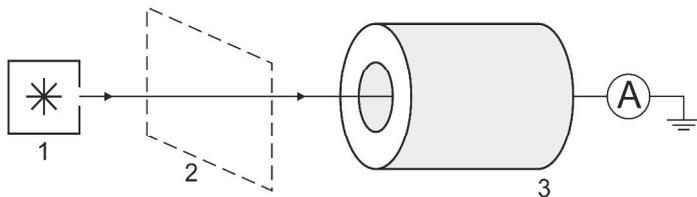


Рис. 1. Геометрия эксперимента: 1 – источник электронов; 2 – плоскость сканирования; 3 – цилиндр Фарадея

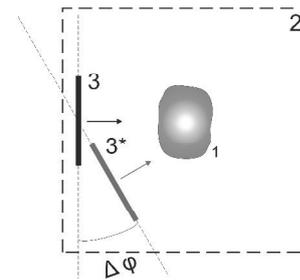


Рис. 2. Схема сканирования: 1 – поперечное сечение пучка; 2 – плоскость сканирования; 3 – сканирующая полоса; 3\* – смещенная сканирующая полоса на угол  $\Delta\varphi$

При прохождении сканирующей полосы через пучок в ней поглощается часть электронов. Из зависимости значения тока пучка, измеренного цилиндром Фарадея, от угла сканирования пластиной и ее положения можно получить зависимость распределения плотности тока электронов в плоскости сканирования при помощи обратного преобразования Радона.

*Оптимальные параметры.* Качество реконструкции, осуществляемой обратным преобразованием Радона, зависит от количества исходных данных. В нашем случае количество направлений сканирования определяет точность измерения плотности потока электронов. Однако при увеличении количества направлений сканирования увеличивается не только время набора и сложность обработки данных, но и сложность устройства сканирования. Таким образом, необходимо определить минимальное количество сканирований пучка, достаточное для качественной реконструкции. Для решения этой задачи в качестве тестовых данных было взято следующее распределение:

$$f(x,y) = 3(1-x)^2 e^{-x^2-(y+1)^2} - 10\left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5\right) e^{-x^2-y^2} - \frac{1}{3} e^{-(x+1)^2-y^2}.$$

График функции двух переменных в трехмерном и преобразованном для дальнейшей работы двумерном виде представлен на рисунке 3.

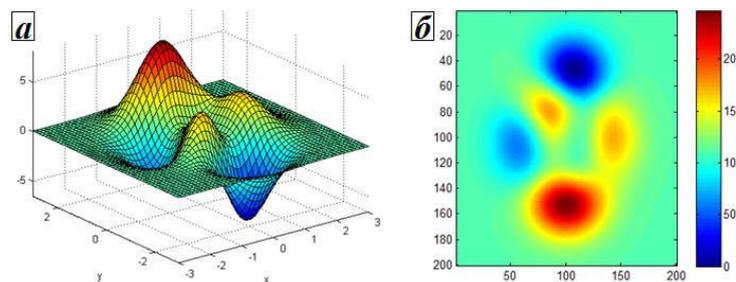


Рис. 3. Тестовые данные на матрице  $200 \times 200$ : а) – трехмерное построение; б) – двумерное построение, преобразованное для дальнейшей обработки

Дальнейшая обработка данных проводилась посредством встроенных функций программного пакета MATLAB. Из исходных данных (рисунок 3б) генерировались двумерные проекции данных в представленной плоскости. Угол смещения направлений проецирования определялся выбранным количеством проекций и с учетом того, что полный угол смещения должен быть не менее  $180^\circ$ . Далее из полученных проекций при помощи обратного преобразования Радона осуществлялась реконструкция.

На рисунке 4а показана реконструкция из 4 проекций с угловым смещением  $90^\circ$ ; на рисунке 4б реконструкция из 10 проекций с угловым смещением  $18^\circ$ ; на рисунке 4в реконструкция из 12 проекций с угловым смещением  $16^\circ$ ; на рисунке 4г реконструкция из 23 проекций с угловым смещением  $8^\circ$ ; на рисунке 4д реконструкция из 46 проекций с угловым смещением  $4^\circ$ ; на рисунке 4е реконструкция из 180 проекций с угловым смещением  $1^\circ$ .

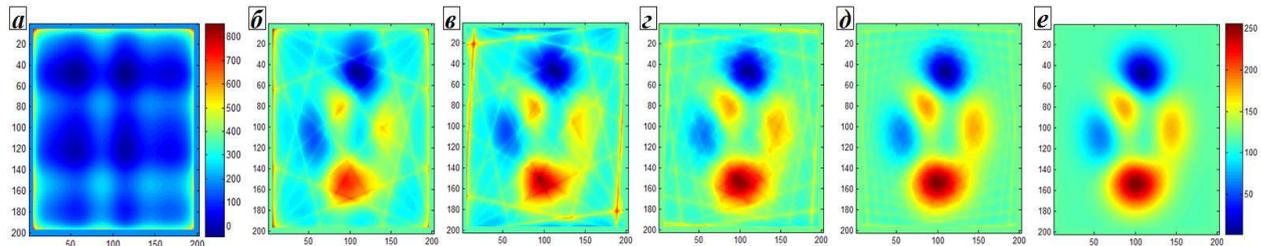


Рис. 4. Результат реконструкции: а) – 4 проекции, шаг  $90^\circ$ ; б) – 10 проекций, шаг  $18^\circ$ ; в) – 12 проекций, шаг  $16^\circ$ ; г) – 23 проекций, шаг  $8^\circ$ ; д) – 46 проекций, шаг  $4^\circ$ ; е) – 180 проекций, шаг  $1^\circ$

Видно, что при уменьшении количества проекций сильно проявляются артефакты, связанные с осцилляциями по краям. Из описанных выше результатов было принято решение разрабатывать устройство сканирования, позволяющее получать данные в 21 направлении с шагом смещения  $9^\circ$  и полным углом смещения  $180^\circ$ . Для оптимизации процедуры набора данных было предложено за раз осуществлять сканирование сразу несколькими полосками, расположенными под разными углами относительно друг друга. Для сопоставления значений смещения полосок относительно оси пучка шаг перемещения всего устройства необходимо умножить на синус угла их наклона.

Полученные результаты показывают возможность создания устройства, позволяющего измерять распределение плотности потока электронов в поперечном сечении пучка без расходных материалов, имеющего разрешение не более 1 мм, слабо зависящего от энергии электронов. Дальнейшая работа направлена на экспериментальную апробацию предложенного устройства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Electron beam applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fep.fraunhofer.de/en/Geschaeftsfelder/Elektronenstrahl-Anwendungen.html>
2. Агафонов А.В. Ускорители в медицине [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://web.ihep.su/library/pubs/aconf96/ps/c96-198.pdf>
3. StarTrack Detector with OmniPro Advance Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.meditron.ch/radiation-therapy/index.php/hikashop-menu-for-categories-listing/product/84-startrack-detector-with-omnipro-advance-software>
4. Технология пленочной дозиметрии GAFCHROMIC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gafchromic.ru/?yclid=1135545137855466433>
5. Пат. 2393505 РФ. МПК51 G01T 1/29. Способ определения распределения плотности потока электронов по его сечению/ Э.З. Курмаев. Заявлено 05.05.2009; Опубл. 27.06.2010, Бюл. № 18. – 20 с.
6. Пат. 1292469 РФ. МПК51 G01T 1/29. Способ определения распределения плотности потока заряженных частиц в поперечном сечении пучка / А.Д. Ониско. Заявлено 15.04.1985; Опубл. 15.12.1992, Бюл. № 46. – 11 с.