

УДК 621.791.722

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-72-79

## Методика автоматизированного измерения пространственных распределений плотности тока технологических электронных пучков

А.С. Кожеченко, А.В. Щербаков, Р.В. Родякина, Д.А. Гапонова

Показана актуальность задачи по созданию автоматизированной методики измерения пространственных распределений плотности тока технологических электронных пучков. Доказано, что основной интерес для построения систем мониторинга и управления в электронно-лучевых технологических установках представляют именно прямые методы, основанные на непосредственном измерении составляющих тока электронного пучка, поскольку только они могут дать достоверную информацию о пространственном распределении плотности тока. Проведены экспериментальные исследования пространственных распределений плотности тока электронных пучков мощностью до 6 кВт. Проанализированы распределения, полученные зондовым методом, выявлены их отклонения от функции нормального распределения и осевой симметрии. Определены ограничения зондового метода по плотности теплового потока и мощности пучка и предложен экспресс-метод измерения радиального распределения плотности тока по сечению электронных пучков, основанный на методе прямого края и вычислительной обработке временных зависимостей тока. Приведена схема дискретизации радиального распределения плотности тока электронного пучка. Экспериментально обоснована возможность применения методики для измерения характеристик пучков с плотностью мощности до  $1,8 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> при использовании коллектора из меди. Доказано, что данная методика необходима для математического восстановления объемного распределения плотности тока с использованием основных положений электронной оптики.

*Ключевые слова:* электронные пучки, диагностика пучков частиц, система сбора данных, электронно-лучевая технология.

*Для цитирования:* Кожеченко А.С., Щербаков А.В., Родякина Р.В., Гапонова Д.А. Методика автоматизированного измерения пространственных распределений плотности тока технологических электронных пучков // Вестник МЭИ. 2018. № 2. С. 72—79. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-72-79.

## Automated Measurement of the Spatial Current Density Distribution of Process Electron Beams

A.S. Kozhechenko, A.V. Shcherbakov, R.V. Rodyakina, D.A. Gaponova

The importance of developing an automated technique for measuring spatial current density distributions of process electron beams is shown. It has been proven that immediate methods based on directly measuring the electron beam current components are of the main interest for constructing monitoring and control systems in electron beam-based process installations, because it is only these methods that can provide reliable information about the spatial distribution of current density. Experimental investigations of spatial current density distributions for electron beams with power capacities up to 6 kW have been carried out. The distributions obtained by the probe method are analyzed, and their deviations from the normal distribution function and axial symmetry are revealed. The limitations of the probe method based on the heat flux density and beam power are determined, and an express method for measuring the current density radial distribution over the electron beam cross section is proposed, which is based on using the direct edge method and on numerically processing the time dependences of the current. A scheme for quantifying the radial distribution of the electron beam current density is given. The possibility of applying the proposed technique for measuring the characteristics of beams with a power density up to  $1.8 \cdot 10^4$  W/cm<sup>2</sup> using a copper collector has been experimentally confirmed. It is shown that the developed technique is necessary for mathematically reconstructing the current density volume distribution using the basic principles of electronic optics.

*Key words:* electron beams, particle beam diagnostics, data collection system, electron beam technology.

*For citation:* Kozhechenko A.S., Shcherbakov A.V., Rodyakina R.V., Gaponova D.A. Automated Measurement of the Spatial Current Density Distribution of Process Electron Beams. MPEI Vestnik. 2018;2:72—79. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-72-79.

### Введение

Применение электронных пучков в таких технологиях, как сварка, плавка, резка, перфорация, наплавка и аддитивное формообразование, перестало быть редкостью [1 — 3]. Это связано со снижением стоимости оборудования и совершенствованием систем управления. Основными проблемами перечисленных технологий, по-прежнему, являются обеспечение повторяемо-

сти режимов обработки и перенос технологического процесса с одной установки на другую без отбраковки изделий [4].

При обработке типовых изделий отклонения характеристик технологического процесса (глубины или ширины области проплавления, размеров зоны термического влияния) от требуемых, а также появление дефектов в виде пор, несплавлений или горячих трещин часто обусловлены действием неконтролируемых фак-

торов на электронный пучок. К ним относятся изменение температуры или эмиссионных свойств катода, разрушение катода из-за испарения и ионной бомбардировки, линейное или угловое смещение электродов пушки друг относительно друга. Их контроль невозможен из-за большого числа и обоюдного влияния на характеристики пучка. Поэтому, наиболее эффективным методом обеспечения воспроизводимости результатов процесса является контроль характеристик самого пучка. Если требуемый режим обработки не может быть достигнут с помощью средств управления, то мониторинг распределения плотности тока пучка позволит сделать вывод о необходимости замены катода или юстировке электронной пушки. Если допустить отсутствие возмущающих факторов, то задача точной фокусировки пучка в заданной плоскости, обычно решаемая методом проб и ошибок, была и остается крайне важной. Таким образом, все перечисленные обстоятельства указывают на актуальность задачи по созданию автоматизированной методики измерения пространственных распределений плотности тока технологических электронных пучков.

### Экспериментальное оборудование и методика исследований

Ключевым элементом разработанной методики является экспериментальный стенд на базе электронно-лучевой технологической установки ЭЛА-15И. Установка оснащена электронной пушкой с ускоряющим напряжением 60 кВ, формирующей пучки мощностью до 15 кВт. Конструкции коллекторов электронов и схемы измерения представлены на рис. 1.

На сегодняшний день большое число публикаций посвящено диагностике пучков заряженных частиц [4 — 12], однако они применимы для диагностики либо пучков малой мощности (не более 1...2 кВт [4, 7 — 10]), либо интенсивных пучков сверхмалой длительности с плотностями частиц, на несколько порядков превышающими используемые в технологии значения [5, 6]. Значительная часть существующих методов [11, 12] полагается на косвенную информацию, т. е. распределения интенсивностей электромагнитных излучений и потоков различных заряженных частиц, поэтому связь регистрируемых сигналов с плотностями токов пучков оказывается нелинейной, а сами регистрируемые характеристики носят интегральный характер.

Следовательно, основной интерес для построения систем мониторинга и управления в электронно-лучевых технологических установках представляют именно прямые методы, основанные на непосредственном измерении составляющих тока электронного пучка, поскольку только они могут дать достоверную информацию о пространственном распределении плотности тока. Отсюда возникает противоречивая задача создания методики прямого измерения распределения плотности токов мощных (более 2 кВт) пучков элек-

тронов. Известно, что ни один из существующих проводящих материалов не обладает достаточной термической стойкостью, и не может без разрушения (оплавления) воспринимать воздействие сфокусированного электронного пучка с плотностью мощности более  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> при указанных мощностях [7]. Единственными возможными вариантами решения поставленной задачи являются получение экспериментальных данных о распределениях плотности тока пучка в его расфокусированной части (над изделием) и математическое восстановление пространственного распределения плотности тока по результатам нескольких измерений, проведенных на различном расстоянии  $Z$  от плоскости наилучшей фокусировки (см. рис. 1).

На первом этапе измерения проводились по схеме, представленной на рис. 1, а. Для этого над коллектором 1 устанавливалась заземленная медная пластина (экран) толщиной 6 мм с отверстием 11 диаметром 1 мм, а вся система с помощью электропривода координатного стола перемещалась по траектории — меандру. Максимальная амплитуда перемещения составляла 20 мм, а период меандра — 2 мм (шаг между «строками» сканирования — 1 мм). Часть электронов пучка, проходящая через отверстие 11, попадала на коллектор и при прохождении тока создавала на измерительном резисторе 5 разность потенциалов, регистрируемую с помощью измерительного преобразователя L-Card E14-140-M [13] с 14-разрядным аналогово-цифровым преобразователем LTC1416 (потенциал коллектора при этом отрицателен по отношению к потенциалу корпуса установки). Перед началом перемещения пучок в сфокусированном режиме при малом токе (около 2...3 мА) совмещался с отверстием в экране. Для точного совмещения было необходимо добиться максимальной (отрицательной) величины напряжения на резисторе. После этого запускалась программа перемещения координатного стола и записывался регистрируемый сигнал с частотой выборок 40 кГц. Линейная скорость перемещения координатного стола составляла 25 мм/с, общее количество «строк» сканирования — 20. Время сканирования с учетом времени перемещения от начальной точки к первой строке меандра — 18 с. На рис. 2 приведены полученные с использованием схемы рис. 1, а, линейные распределения плотности тока электронного пучка при токе 35 мА и ускоряющем напряжении 60 кВ (мощность 2,1 кВт).

Серии экспериментов проводились для токов луча от 20 до 100 мА (мощность 1,2...6 кВт). Было установлено критическое значение плотности теплового потока ( $1 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>), при превышении которого в течение цикла начиналось плавление поверхностного слоя медного экрана во всем указанном диапазоне токов. При достижении указанной плотности потока и токах более 50 мА отверстие в экране оплавлялось.

Полученные результаты показывают ограничения метода измерения распределения плотности тока по

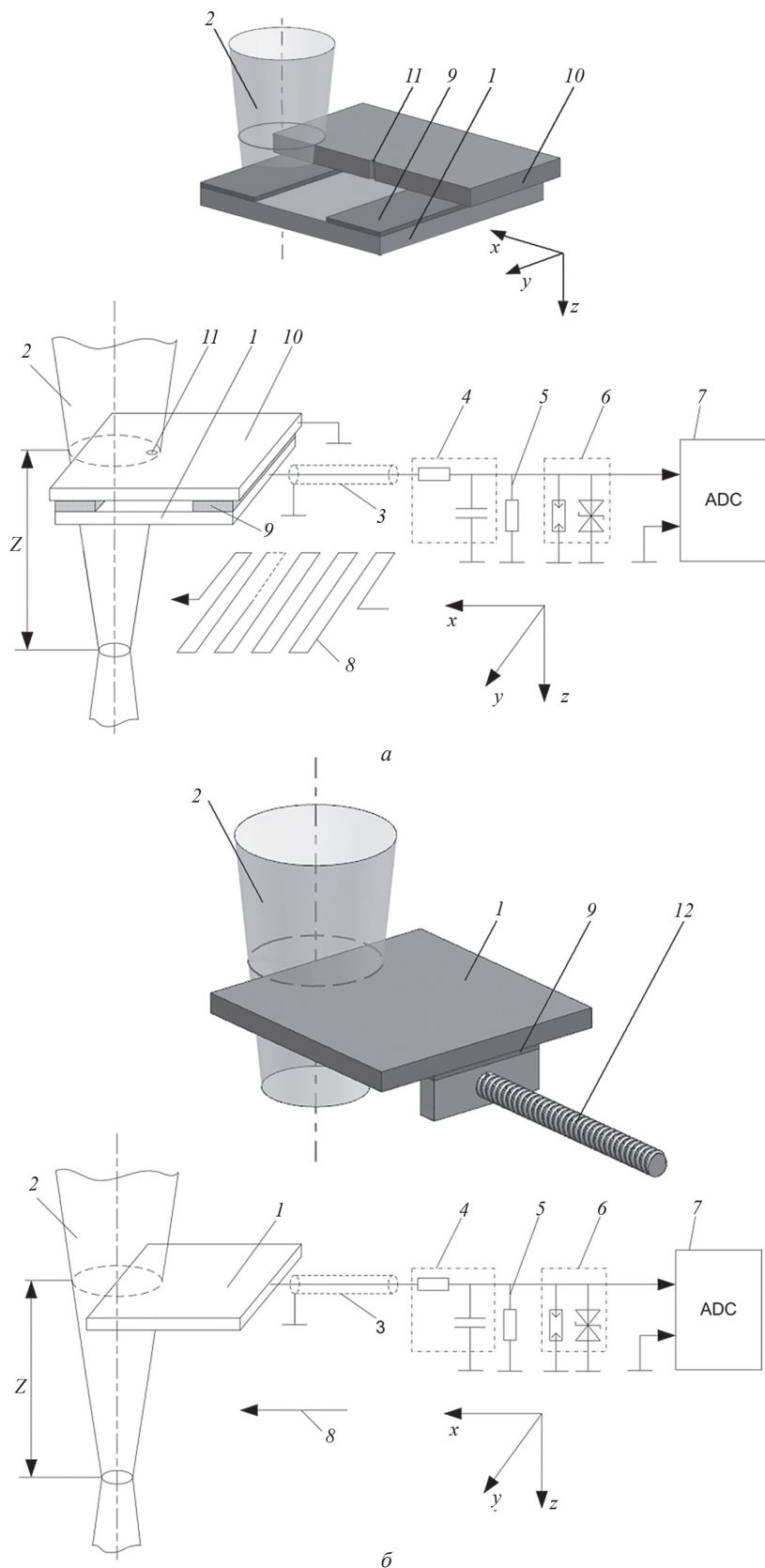


Рис. 1. Коллекторы для измерения распределения плотности тока электронного пучка и схемы измерения по зондовому методу (а) и экспресс-методики, основанной на методе прямого края (б):

1 — коллектор (медная пластина); 2 — электронный пучок; 3 — экранированный кабель; 4 — фильтр; 5 — измерительный резистор; 6 — схема защиты от перенапряжений; 7 — измерительный преобразователь; 8 — траектория перемещения коллектора; 9 — изолятор (стекло); 10 — экран (медная пластина); 11 — калиброванное отверстие (1 мм); 12 — элемент системы перемещения датчика

схеме, приведенной на рис. 1, *a*, являющейся по сути разновидностью классического зондового метода [5, 7]. Данные ограничения связаны с расплавлением экрана и обусловлены достаточно продолжительным временем сканирования. Экспериментально полученные распределения плотности тока, показанные на рис. 2, существенно отличаются от функции нормального распределения и имеют отклонения от осевой симметрии, которые обусловлены аберрациями электронно-опти-

ческой системы электронной пушки, а именно несоосностью электродов и, возможно, наличием кратера на поверхности катода из-за ионной бомбардировки. Эти отклонения негативно влияют на качество процесса обработки, так как при движении по взаимно перпендикулярным направлениям вызывают изменение формы и размеров жидкой ванны. Они не могут быть устранены с помощью систем фокусировки, поскольку для их компенсации требуется механическая или маг-

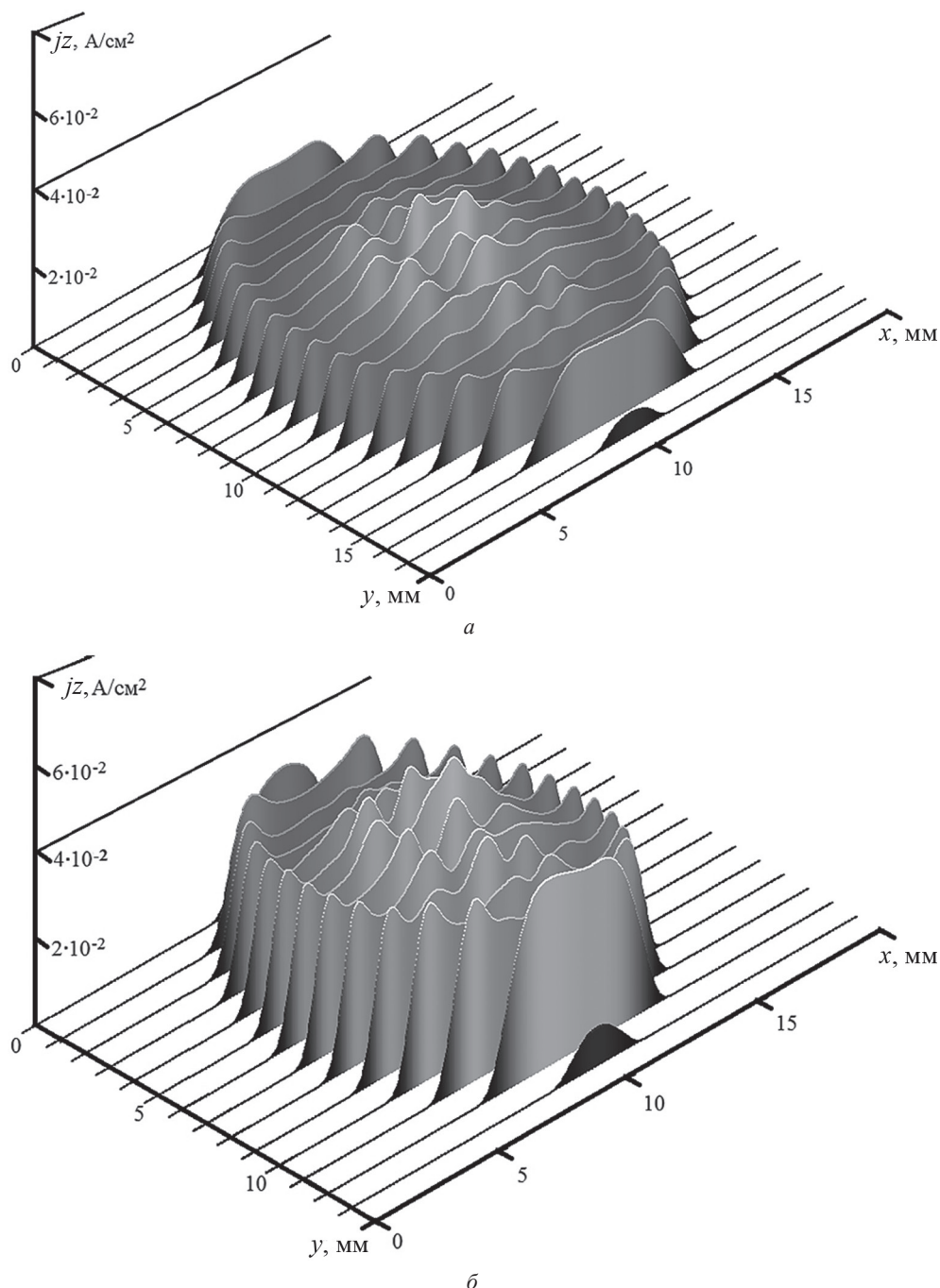


Рис. 2. Пространственные распределения плотности тока электронного пучка при токе 35 мА, полученные при строчном сканировании по схеме, представленной на рис. 1, *a*:

*a* — в сечении на расстоянии 125 мм выше плоскости наилучшей фокусировки; *b* — на 20 мм ниже сечения, в котором измерялось распределение *a*



нитная юстировка пушки. При решении данной задачи на этапе настройки оборудования для контроля пространственных распределений плотности тока пучка в его расфокусированной части наилучшим образом все-таки подходит схема измерения рис. 1, а.

После настройки для получения информации о форме электронного пучка более высокой мощности, обеспечения точной фокусировки и управления его характеристиками целесообразно использовать экспресс-методику, основанную на предположении об аксиальной симметрии распределений плотности тока, которая также была испытана на стенде.

### Экспресс-методика измерения и алгоритм восстановления радиального распределения

Схема экспресс-методики измерения, основанная на методе прямого края [14], показана на рис. 1, б. Медная пластина-коллектор  $l$  движется перпендикулярно пучку с постоянной скоростью, постепенно перекрывая его. Скорость перемещения при использовании составляет 25 мм/с, общее время измерения — 1,6 с. Установлено, что благодаря сокращению времени одного измерения критическая плотность мощности, соответствующая началу плавления датчика, при однократном измерении равна  $1,8 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>. Измерительный резистор для схемы, изображенной

на рис. 1, б, имеет меньший номинал сопротивления (в случае, показанном на рис. 1, а, использовался резистор 5 кОм, в случае из рис. 1, б — 100 Ом), так как коллектор воспринимает весь ток электронного пучка. Для восстановления радиальных распределений плотности тока электронного пучка по измеренным зондовым характеристикам (кривым набегания [14]) целесообразно использовать апробированные методы, например, обратного преобразования Абеля [15]. В двумерной постановке связь искомой функции  $J(r)$  с измеряемой величиной — функцией приращения тока коллектора  $dI(x)/dx$  при его перемещении на некоторое расстояние вдоль оси  $x$  описывается выражением

$$\frac{dI(x)}{dx} = 2 \int_x^{\infty} \frac{J(r)r}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr.$$

Функция  $dI(x)/dx$  является первой производной от функции кривой набегания. Известны выражения для осуществления обратного преобразования Абеля, позволяющие восстановить исходную функцию  $J(r)$ , если она удовлетворяет некоторым условиям. В случае регистрации кривой набегания в виде табличной функции удобнее использовать численный метод восстановления распределения плотности тока.

На рис. 3 представлена схема дискретизации распределения  $J(r)$ , используемая в предлагаемой экс-

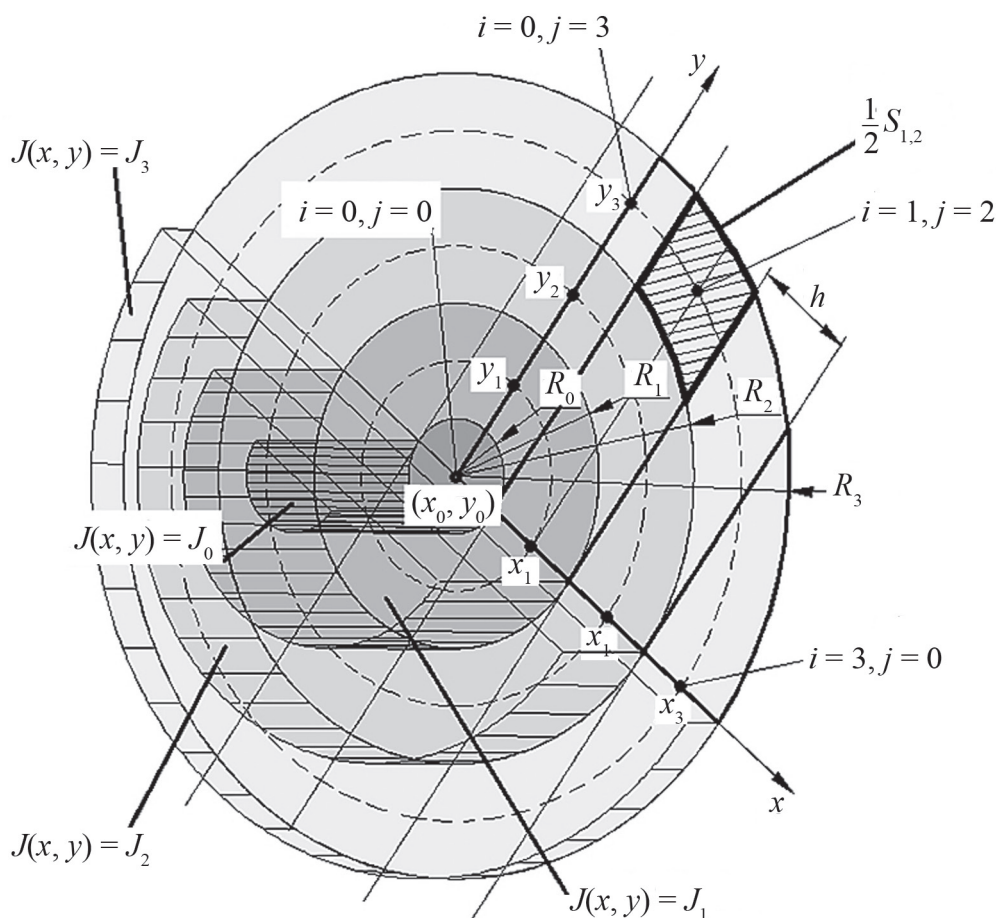


Рис. 3. Схема дискретизации радиального распределения плотности тока электронного пучка

пресс-методике. Если представить электронный пучок в его поперечном сечении, состоящем из конечного числа колец шириной  $h$  с индексом  $0, 1, 2, \dots, N$ , в каждом из которых плотность тока постоянна, то исходное распределение плотности тока может быть определено путем вычислительной обработки кривой  $I(x)$ . В случае, показанном на рис. 3,  $N = 3$ , а соответствующие каждому из колец плотности тока равны соответственно  $J_0, J_1, J_2$  и  $J_3$ . Поскольку движение коллектора осуществляется вдоль декартовой оси, то целесообразно представить искомое распределение плотности тока  $J(r)$  в виде двумерной табличной функции  $J(x, y)$ . В этом случае для расчета значений плотностей токов используется система уравнений

$$\left. \begin{aligned} h \frac{dI(x)}{dx} \Big|_{x=x_0} &= j_0 S_{0,0} + j_1 S_{0,1} + \dots + \\ &+ j_{N-1} S_{0,N-1} + j_N S_{0,N}; \\ h \frac{dI(x)}{dx} \Big|_{x=x_1} &= 0 + j_1 S_{1,0} + j_2 S_{1,1} + \dots + \\ &+ j_{N-1} S_{1,N-2} + j_N S_{1,N-1}; \\ &\dots \\ h \frac{dI(x)}{dx} \Big|_{x=x_i} &= 0 + 0 + \dots + 0 + j_{i+1} S_{i,0} + \\ &+ j_{i+1} S_{i,1} + \dots + j_{i+j} S_{i,j} + \dots + j_{N-1} S_{i,N-i-1} + j_N S_{i,N-i}; \\ &\dots \\ h \frac{dI(x)}{dx} \Big|_{x=x_{N-1}} &= 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + \dots + \\ &+ 0 + j_{N-1} S_{N-1,0} + j_N S_{N-1,1}; \\ h \frac{dI(x)}{dx} \Big|_{x=x_N} &= 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + \dots + 0 + j_N S_{N,0}, \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $i, j$  — индексы расчетной ячейки в декартовой системе координат;  $S_{i,j}$  — площадь ячейки. Например, если  $i > 0, j > 0$ , то  $S_{i,j}$  вычисляется как площадь фигуры, ограниченной двумя хордами и двумя дугами окружностей

$$\begin{aligned} S_{i,j} &= R_{i+j}^2 \left( \arctg \left( \frac{\sqrt{R_{i+j}^2 - R_{i-1}^2}}{R_{i-1}} \right) - \arctg \left( \frac{\sqrt{R_{i+j}^2 - R_i^2}}{R_i} \right) \right) - \\ &- R_{i+j-1}^2 \left( \arctg \left( \frac{\sqrt{R_{i+j-1}^2 - R_{i-1}^2}}{R_{i-1}} \right) + \arctg \left( \frac{\sqrt{R_{i+j-1}^2 - R_i^2}}{R_i} \right) \right) + \\ &+ R_i \left( \sqrt{R_{i+j}^2 - R_i^2} + \sqrt{R_{i+j-1}^2 - R_i^2} \right) - \\ &- R_{i-1} \left( \sqrt{R_{i+j}^2 - R_{i-1}^2} - \sqrt{R_{i+j-1}^2 - R_{i-1}^2} \right). \end{aligned}$$

Уравнения (1) образуют треугольную матрицу и решаются методом обратного хода. Сделав допущение о том, что пучок обладает осевой симметрией, можно

принять координату, соответствующую половине полного тока пучка, т.е.  $\frac{1}{2}I_{\max}$  (см. рис. 4, кривую  $I(x)$ ), в качестве координаты оси электронного пучка ( $x = x_0$ ) и определить размерность системы уравнений (1).

Следует принять во внимание, что экспериментально получаемое одномерное распределение  $dI/dx$ , так же как и пространственное распределение плотности тока, показанное на рис. 2, не будет обладать симметрией относительно точки  $x_0$ . Это особенно хорошо видно по кривой функции  $dI/dx$ , представляющей собой интегральную проекцию пучка на вертикальную плоскость (см. рис. 4, кривую  $dI/dx$ ). Очевидно, что данное обстоятельство не позволит корректно восстановить осесимметричное распределение  $J(r)$  по снятой кривой набегания  $I(x)$ , поэтому необходимо приведение функции  $dI/dx$  к осесимметричному виду в соответствии с выражением

$$\frac{dI_{\text{симм}}(x)}{dx} \Big|_{[-x_N, x_N]} = \frac{dI(x) + dI(-x)}{2dx}. \quad (2)$$

В результате преобразования (2) функция  $dI_{\text{симм}}/dx$  становится симметричной относительно точки  $x_0$  (рис. 4, кривая  $dI_{\text{симм}}/dx$ ). После численного решения системы (1) вычислим распределение плотности тока  $J(x, 0)$ , соответствующее искомому  $J(r)$ . Зависимость  $J(x, 0)$  показана на рис. 4 кривой  $J(x, 0)$ . Для сопоставления полученного распределения  $J(r)$  с исходным на рис. 4 приведена кривая  $J(x)$ , соответствующая средней плоскости пучка. Полученные в соответствии с приведенной методикой по экспериментально снятым кривым набегания радиальные распределения плотности тока могут быть использованы для восстановления пространственного распределения плотности тока технологических электронных пучков.

Для решения настоящей задачи может применяться следующий алгоритм. Экспериментальное измерение кривых набегания и вычисление распределений  $J(r)$  по схеме, представленной на рис. 1, б, проводится как минимум для двух сечений пучка  $J_1(r), J_2(r)$  (рис. 5, а, б). Затем функции исследуются с целью выявления признаков подобия. Для этого необходимо сопоставить экстремумы и точки перегиба исходных функций, а также их первых и вторых производных. Поиск подобных точек в зависимостях  $J_1(r), J_2(r)$  при известном расстоянии вдоль оси  $z$  между плоскостями, для которых распределения были сняты, позволяет трассировать траектории электронов для этих точек и при достаточной гладкости получаемого распределения восстановить фазовую диаграмму пучка, т.е. зависимость углов наклона траекторий электронов пучка  $\theta_c$  от их радиальных координат  $r_c$ . Определенная вычислительным путем фазовая диаграмма  $\theta_c(r)$  может быть использована в качестве исходных данных для расчета траекторий.

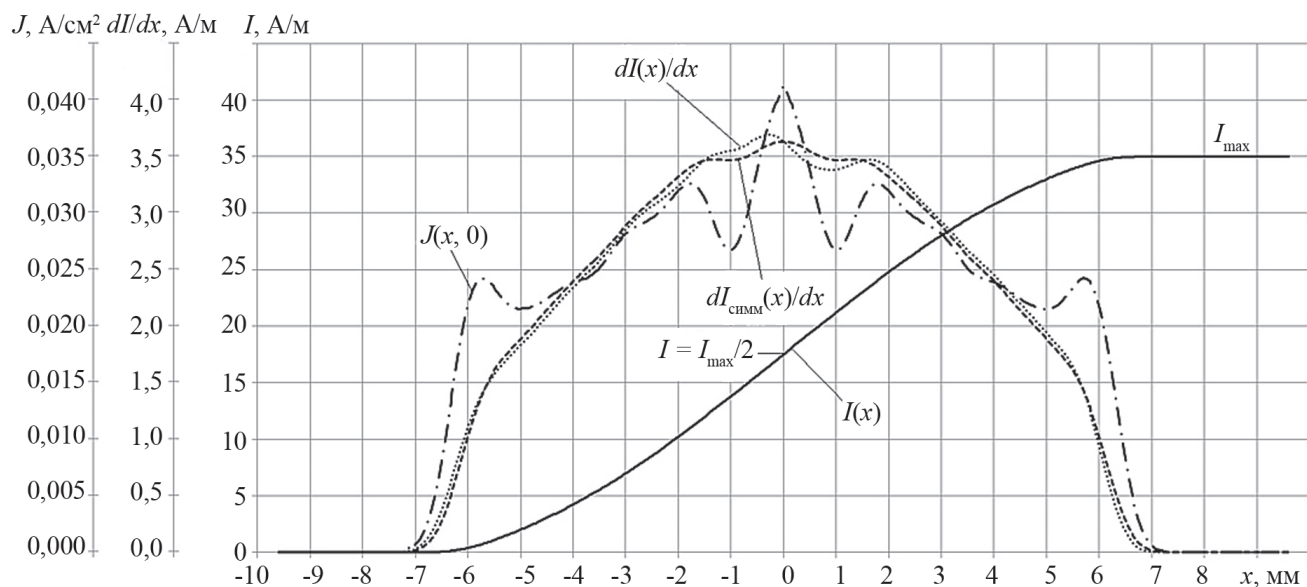


Рис. 4. Восстановление радиального распределения плотности тока по кривой набегания

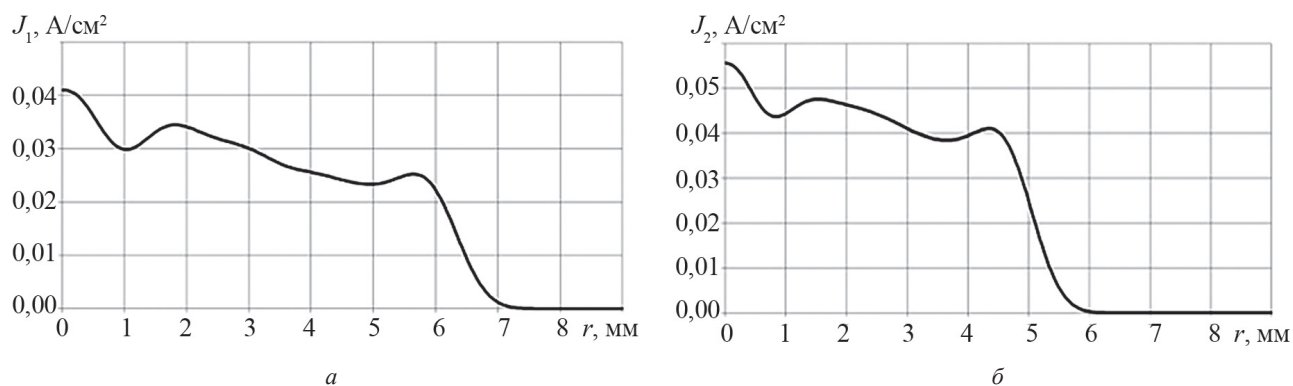


Рис. 5. Пространственное распределение плотности тока:

а —  $J_1(r)$  сечение 1; б —  $J_2(r)$  сечение 2, расположенное на 20 мм ниже сечения 1

## Заключение

Предложена вариация зондового метода для измерения пространственного распределения плотности тока электронного пучка и показана его актуальность для выявления отклонений пучка от осевой симметрии. Установлены ограничения метода, обусловленные термической стойкостью медного экрана датчика (плавление начинается при превышении плотности теплового потока значения  $1 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>) и длительным временем сканирования, составляющим не менее 15...20 с при использовании стандартных технологических систем перемещения.

Представлена экспериментальная методика измерения радиального распределения плотности тока  $J(r)$  по сечению электронных пучков, базирующаяся на методе прямого края и вычислительной обработке временных зависимостей тока (кривых набегания). Экспериментально обоснована возможность применения методики для измерения характеристик пучков мощностью до 6 кВт с плотностью мощности до  $1,8 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> при использовании коллекто-

ра из меди толщиной 6 мм. Показано, что методика необходима для математического восстановления объемного распределения плотности тока с использованием основных положений электронной оптики.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» за счет средств гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20015).

## Литература

1. Steigerwald K.H. e. a. An International History of Electron Beam Welding. Pro-Beam AG&Co, 2007.
2. Gockel J., Beuth J., Taminger K. Integrated Control of Solidification Microstructure and Melt Pool Dimensions in Electron Beam Wire Feed Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V // Additive Manufacturing. 2014. V. 1 — 4. Pp. 119—126.
3. Гуденко А.В., Драгунов В.К., Слива А.П. Методика определения режимов послойной электронно-лучевой наплавки проволоки для аддитивных технологий // Вестник МЭИ. 2017. № 5. С. 8—14.

4. **Meissner C.** Standardizing the Art of Electron Beam Welding // *Sci. and Technol. Rev.* 2008. No. 3.

5. **Смалюк В.В.** Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. Новосибирск: Параллель, 2009.

6. **Логачев П.В. и др.** Методы неразрушающей диагностики пучков заряженных частиц в ускорителях // *Физика элементарных частиц и атомного ядра.* 2016. Т. 47. Вып. 2. С. 443—500.

7. **Зуев И.В., Углов А.А.** Об измерении диаметра электронного луча методом вращающегося зонда // *Физика и химия обработки материалов.* 1967. № 5. С. 110—112.

8. **Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А.** Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978.

9. **Акопьянц К.С., Назаренко О.К., Гумовский В.В., Чернякин В.П.** Система диагностики электронного луча в установках для электронно-лучевой сварки // *Автоматическая сварка.* 2002. № 10. С. 30—33.

10. **Palmer T.A., Elmer J.W.** Characterization of Electron Beams in Multiple Welders Using the Enhanced Modified Faraday Cup // *Proc. Intern. Institute of Welding Conf. Quebec City (Canada), 2006.* Pp. 1—37.

11. **А.с. № 295215 СССР.** Способ определения распределения плотности пространственного заряда в потоках заряженных частиц / Г.М. Герштейн, М.Г. Медокс // *Бюл. изобрет.* 1971. № 7.

12. **Шарафутдинов А.Ф.** Диагностика электронных пучков низких энергий по переходному излучению: автореф. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2004.

13. **Л КАРД** [Официальный сайт] [http://www.lcard.ru/download/e14\\_140\\_users\\_guide.pdf](http://www.lcard.ru/download/e14_140_users_guide.pdf) (дата обращения 13.05.2017).

14. **Голубков М.П., Кабанов А.Н.** О пределах изменений диаметра электронного зонда // *Труды МИЭМ.* 1974. Вып. 35. С. 4—12.

15. **Терещенко С.А.** Методы вычислительной томографии. М.: Физматлит, 2004.

## References

1. **Steigerwald K.H. et al.** An International History of Electron Beam Welding. Pro-Beam AG&Co, 2007.

2. **Gockel J., Beuth J., Taminger K.** Integrated Control of Solidification Microstructure and Melt Pool Dimensions in Electron Beam Wire Feed Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing.* 2014;1 — 4:119—126.

3. **Gudenko A.V., Dragunov V.K., Sliva A.P.** Metodika Opredeleniya Rezhimov Posloynoy Elektronno-luchevoy Naplavki Provoloki dlya Additivnykh Tekhnologiy. *Vestnik MPEI.* 2017;5:8—14. (in Russian).

4. **Meissner C.** Standardizing the Art of Electron Beam Welding. *Sci. and Technol. Rev.* 2008;3.

5. **Smalyuk V.V.** Diagnostika Puchkov Zaryazhennykh Chastits v Uskoritelyakh. Novosibirsk: Parallel', 2009. (in Russian).

6. **Logachev P.V. i dr.** Metody Nerazrushayushchey Diagnostiki Puchkov Zaryazhennykh Chastits v Uskoritelyakh. *Fizika Elementarnykh Chastits i Atomnogo Yadra.* 2016;47;2:443—500. (in Russian).

7. **Zuev I.V., Uglov A.A.** Ob Izmerenii Diametra Elektronno Lucha Metodom Vrashchayushchegosya Zonda. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov.* 1967;5:110—112. (in Russian).

8. **Rykalin N.N., Zuev I.V., Uglov A.A.** Osnovy Elektronno-luchevoy Obrabotki Materialov. M.: Mashinostroenie, 1978. (in Russian).

9. **Akop'yants K.S., Nazarenko O.K., Gumovskiy V.V., Chernyakin V.P.** Sistema Diagnostiki Elektronno Lucha v Ustanovkakh dlya Elektronno-luchevoy Svarki. *Avtomaticheskaya Svarka.* 2002;10:30—33. (in Russian).

10. **Palmer T.A., Elmer J.W.** Characterization of Electron Beams in Multiple Welders Using the Enhanced Modified Faraday Cup. *Proc. Intern. Institute of Welding Conf. Quebec City (Canada), 2006:*1—37.

11. **A.s. 295215 SSSR.** Sposob Opredeleniya Raspredeleniya Plotnosti Prostranstvennogo Zaryada v Potokakh Zaryazhennykh Chastits / G.M. Gershteyn, M.G. Medoks. *Byul. Izobret.* 1971;7. (in Russian).

12. **Sharafutdinov A.F.** Diagnostika Elektronnykh Puchkov Nizkikh Energii po Perekhodnomu Izlucheniyu: Avtoref. ... Kand. Fiz.-mat. Nauk. Tomsk, 2004. (in Russian).

13. **L KARD** [Ofits. Sayt] [http://www.lcard.ru/download/e14\\_140\\_users\\_guide.pdf](http://www.lcard.ru/download/e14_140_users_guide.pdf) (Data Obrashcheniya 13.05.2017). (in Russian).

14. **Golubkov M.P., Kabanov A.N.** O Predelakh Izmereniy Diametra Elektronno Lucha. *Trudy MIEM.* 1974;35:4—12. (in Russian).

15. **Tereshchenko S.A.** Metody Vychislitel'noy Tomografii. M.: Fizmatlit, 2004. (in Russian).

## Сведения об авторах

**Кожеченко Алексей Сергеевич** — ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: [KozhechenkoAS@mpei.ru](mailto:KozhechenkoAS@mpei.ru)

**Щербakov Алексей Владимирович** — доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: [ShcherbakovAV@mpei.ru](mailto:ShcherbakovAV@mpei.ru)

**Родякина Регина Владимировна** — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов НИУ «МЭИ», e-mail: [reginarodyakina@mail.ru](mailto:reginarodyakina@mail.ru)

**Гапонова Дарья Александровна** — студентка НИУ «МЭИ», e-mail: [GaponovaDA@mpei.ru](mailto:GaponovaDA@mpei.ru)

## Information about authors

**Kozhechenko Aleksey S.** — Assistant of Power Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnologies Dept., NRU MPEI, e-mail: [KozhechenkoAS@mpei.ru](mailto:KozhechenkoAS@mpei.ru)

**Shcherbakov Aleksey V.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Power Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnologies Dept., NRU MPEI, e-mail: [ShcherbakovAV@mpei.ru](mailto:ShcherbakovAV@mpei.ru)

**Rodyakina Regina V.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Metal Technology Dept., NRU MPEI, e-mail: [reginarodyakina@mail.ru](mailto:reginarodyakina@mail.ru)

**Gaponova Daria A.** — Student of NRU MPEI, e-mail: [GaponovaDA@mpei.ru](mailto:GaponovaDA@mpei.ru)

*Статья поступила в редакцию 26.06.2017*