

УДК 621.384.6

А.Н. ДОВБНЯ, А.С. МАЗМАНИШВИЛИ, Н.Г. РЕШЕТНЯК, В.П. РОМАСЬКО,
И.А. ЧЕРТИЩЕВ

Национальный Научный центр Харьковский физико-технический институт

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ В РАДИАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, ГЕНЕРИРУЕМОГО МАГНЕТРОННОЙ ПУШКОЙ:
ЭКСПЕРИМЕНТ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Представлены результаты экспериментов и численных расчетов по генерации электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом в диапазоне энергий электронов 35...65 кэВ. Изучено формирование пучка в радиальном направлении при его транспортировке в спадающем магнитном поле соленоида. Транспортировка пучка осуществлялась в системе, состоящей из медных колец с внутренним диаметром 66 мм, находящейся на расстоянии 85 мм от среза магнетронной пушки. Приводятся результаты численного моделирования по движению трубчатого электронного потока. Изучена зависимость итогового вертикального распределения на внутренней цилиндрической стенке от параметров исходного распределения. Полученные результаты моделирования согласуются с данными эксперимента.

Ключевые слова: магнетронная пушка, вторичноэмиссионный катод, электронный пучок, математическое моделирование, гистограмма, распределение магнитного поля.

А.М. ДОВБНЯ, О.С. МАЗМАНИШВІЛІ, М.Г. РЕШЕТНЯК, В.П. РОМАСЬКО, І.О. ЧЕРТИЩЕВ

Національний Науковий центр Харківський фізико-технічний інститут

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ В РАДІАЛЬНОМУ НАПРЯМКУ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА,
ГЕНЕРУЄМОГО МАГНЕТРОННОЮ ГАРМАТОЮ: ЕКСПЕРИМЕНТ ТА МАТЕМАТИЧНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ.**

Представлені результати експериментів і чисельних розрахунків по генерації електронного пучка магнетронною гарматою з вторинноемісійним катодом в діапазоні енергій електронів 35...65 кэВ. Вивчено формування пучка в радіальному напрямі при його транспортуванні в спадаючому магнітному полі соленоїда. Транспортування пучка здійснювалося в системі, що складається з мідних кілець із внутрішнім діаметром 66 мм, що знаходиться на відстані 85 мм від зрізу магнетронної гармати. Наводяться результати чисельного моделювання по руху трубчастого електронного потоку. Вивчена залежність підсумкововертикального розподілу на внутрішній циліндровій стінці від параметрів початкового розподілу. Отримані результати моделювання узгоджуються з даними експерименту.

Ключові слова: магнетронна гармата, вторинноемісійний катод, електронний пучок, математичне моделювання, гистограма, розподіл магнітного поля.

A.N. DOVBNYA, A.S. MAZMANISHVILI, N.G. RESHETNYAK, V.P. ROMAS'KO, I.A. CHERTISHCHEV

National Science Center "Kharkov Institute of Physics & Technology"

**RESEARCH FORM IN THE RADIAL DIRECTION OF THE ELECTRON BEAM
GENERATED BY THE MAGNETRON GUN: EXPERIMENT AND MATHEMATICAL MODELING**

The results of numerical experiments on electron beam generation magnetron guns with secondary-emission cathode electron energies in the range 35...65 keV are presented. The formation of its distribution during transport in a decreasing magnetic field of the solenoid are studied. Transportation of the beam carried in the system, consisting of copper rings with internal diameter of 66 mm, at a distance of 85 mm from the edge of the magnetron gun. The results of numerical simulation of the movement of the electron beam tube are presented. The dependence of the final vertical distribution on the inner wall of the cylindrical target from the initial state in the generation is studied. These simulation results are consistent with experimental data.

Keywords: magnetron gun, secondary-emission cathode, electron beam, mathematical modeling, a histogram of the distribution of the magnetic field.

Введение

В настоящее время во многих странах разрабатываются и внедряются в промышленное производство пучковые методы обработки материалов потоками энергии. Для решения этих задач широко используется ускорители интенсивных электронных пучков с энергией электронов 100...400 кэВ [1, 2]. В данном направлении можно выделить ряд актуальных задач, например, модификация поверхностных

свойств металла [3]. Так, например, при обработке электронным пучком некоторых типов сталей, применяемых в автомобильной промышленности, получено увеличение микротвердости от 2 до 5 раз и, соответственно, срока службы. Обработка электронным пучком лопаток газовых турбин позволяет увеличить срок службы более чем в 2 раза [4]. Решение подобных задач управления электронным пучком требует реализации нужной геометрии магнитного поля для формирования устойчивого пучка электронов при его транспортировке.

В ННЦ ХФТИ был создан ускоритель электронов [5] на основе магнетронной пушки с металлическим холодным вторичноэмиссионным катодом. Принцип таких пушек основан на вторичноэмиссионном размножении электронов, образовании электронного облака и формировании электронного пучка в скрещенных электрическом и магнитном полях [3].

В данной работе приведены результаты изучения влияния начального состояния на итоговое распределение электронного пучка, генерируемого магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом. Представлены экспериментальные и теоретические результаты исследований по формированию радиального электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом при его транспортировке в спадающем магнитном поле соленоида, и построена математическая модель движения электронного потока в этом поле. Изучена возможность облучения внутренней цилиндрической поверхности. Показано, что при рассмотрении потоков частиц с фазовым объемом исходных величин увеличенного размера, в частности, с большим вертикальным размером Δz_0 и большего разброса по импульсам P_{z0} и P_{r0} можно ожидать соответствующее увеличение вертикального участка Δz_U , на котором реализуется выполнение условия попадания на заданный радиус.

Экспериментальная установка и результаты исследований

В работе проведены исследования по формированию радиального электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом и измерению его параметров при транспортировке пучка в спадающем магнитном поле соленоида. Эксперименты проводились на установке, описанной в [6].

Для питания магнетронной пушки использовался импульсный генератор, который обеспечивал получение импульса напряжения с выбросом на вершине ~ 100 кВ, амплитуда плоской части импульса ~ 70 кВ, длительность импульса ~ 20 мкс. Источник электронов размещается в вакуумном объеме. Для получения электронного пучка использовались магнетронная пушка с диаметром анода 78 мм и диаметром катода 36 мм. Магнитное поле для генерации и транспортировки электронного пучка создается соленоидом, состоящим из 4-х секций. Питание секций осуществляется от источников постоянного тока. Регулируя ток в каждой из катушек можно было изменять амплитуду и продольное распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка. Это позволяло получать различные режимы формирования электронного пучка.

Транспортировка пучка осуществлялась в системе, состоящей из 14-ти медных колец с внутренним диаметром ~ 66 мм, находящейся на расстоянии ~ 85 мм от среза магнетронной пушки. Ширина колец 8 мм, расстояние между ними 1,5 мм. Система находится в магнитном поле, создаваемом соленоидом. Кроме того, для создания локального изменения скорости спада магнитного поля соленоида использовали рассеянное магнитное поле, которое создавалось кольцевыми магнитами из материала $SmCo_5$, размещенными на оси системы за 14 кольцом.

На рис. 1а приведено распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка, при котором проводились исследования. На рис. 1б показано распределение токов на 12, 13 и 14 измерительных ламелях.

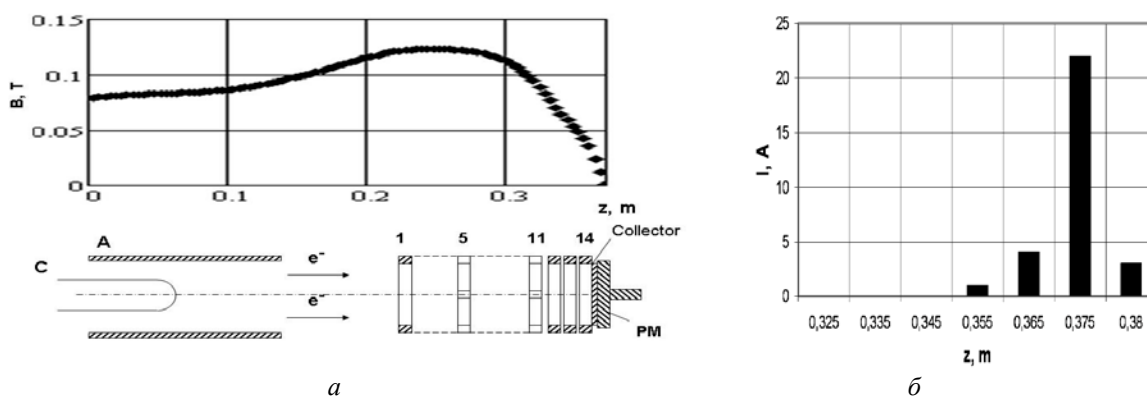


Рис. 1. Распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка; и расположение элементов пушки и системы измерения тока пучка A – анод, C – катод, 1-14 металлические кольца, PM – постоянные магниты (а); распределения токов на измерительных ламелях (б)

Проведенные экспериментальные исследования в диапазоне энергий электронов 35...65 кэВ показали, что величина тока пучка в радиальном направлении и его распределение вдоль длины металлических колец зависит от амплитуды распределения магнитного поля вдоль оси системы и градиента спада поля. Как видно из рис. 1б, при таком распределении магнитного поля ~70% тока пучка в радиальном направлении попадало на одно кольцо шириной 8 мм (рис. 1б). Ток в радиальном направлении регистрировался с 14 по 12 кольцо. Градиент спада магнитного поля в районе 14 кольца составил ~2,8 Т/м при напряженности магнитного поля 0,04 Т на середине 14-го кольца. Исследования показали, что при уменьшении градиента спада магнитного поля до ~1,1 Т/м в области 14-кольца ток в радиальном направлении на кольцо уменьшился на 80 %. При этом увеличивались токи в радиальном направлении с 13-го кольца по 10-е соответственно. Изменяя амплитуду и распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка, можно было регулировать ток вдоль длины колец. Таким образом, изменяя амплитуду и распределение магнитного поля, можно регулировать ток в радиальном направлении вдоль длины трубы, и, следовательно, место электронного облучения.

Результаты моделирования и их обсуждение

При моделировании рассматривалась задача, в которой поток электронов с энергией E , движущихся параллельно оси (или под углом к ней) на некотором расстоянии r_0 от неё, влетают в заданное соленоидальное магнитное поле. Требуется определить координату z на заданном радиусе r для каждого из электронов. Обобщением является та же задача, но для пучка исходных электронов с заданным стартовым распределением по r_0 и по направлениям r'_0 .

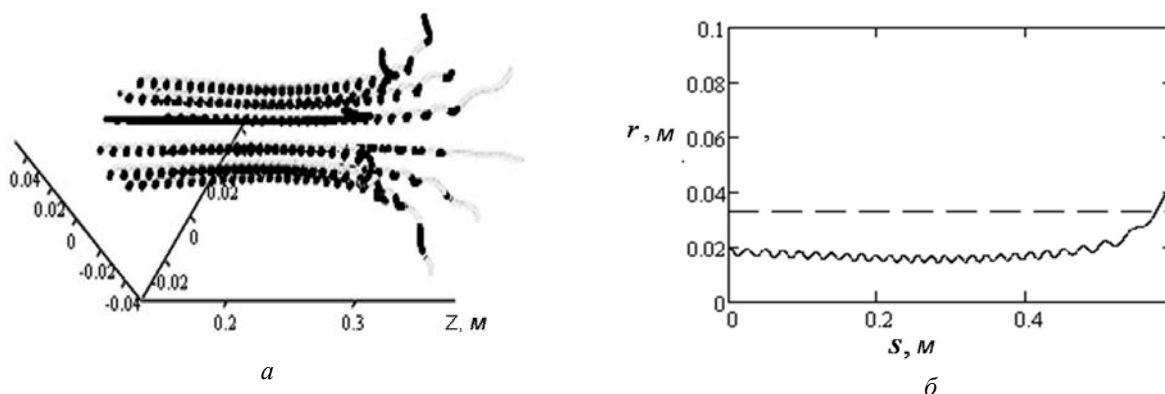


Рис. 2. Пучок из 10 траекторий электронов (а); зависимость радиальной компоненты r от пройденного пути S , пунктиром указан пороговый уровень достижения мишени $r_U = 0.033$ м (б)

На рис. 2 приведены набор типичных траекторий частиц пучка (а) и пример радиальной компоненты траектории до попадания на стенку радиусом $r_U = 0.033$ м (б).

При моделировании рассматривалась задача, в которой поток электронов с энергией E , движущихся параллельно оси (или под углом к ней) на некотором расстоянии r_0 от неё, влетают в заданное соленоидальное магнитное поле. Требуется определить координату z на заданном радиусе r для каждого из электронов. Обобщением является та же задача, но для пучка исходных электронов с заданными стартовыми распределениями по r_0 и z_0 , а также по направлениям r'_0 и z'_0 .

Гамильтониан рассматриваемой задачи в цилиндрической системе координат (r, z, ϑ) имеет вид

$$H = \frac{p_r^2 + p_z^2}{2m} + \frac{1}{2m} \left(\frac{p_\vartheta}{r} - e_0 A \right)^2, \quad (1)$$

где e_0 , m – заряд и масса покоя электрона, p_r , p_z , p_ϑ – канонические импульсы, A – магнитный потенциал, который с учетом азимутальной симметрии пока записывается в виде $A = A(r, z) = B r f(z)$, где $f(z)$ – амплитудная функция магнитного поля, B – напряженность магнитного поля в начальной точке. В результате для уравнений движения запишем

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{r} = \frac{p_r}{m}, \\ \dot{z} = \frac{p_z}{m}, \\ \dot{g} = \frac{1}{m} \left(\frac{p_g}{r} - e_0 B r f(z) \right) \frac{1}{r}, \\ \dot{p}_r = -\frac{1}{mr} \left(p_g - e_0 B r^2 f(z) \right) \left(-\frac{p_g}{r^2} - e_0 B f(z) \right), \\ \dot{p}_z = -\frac{1}{m} \left(p_g - e_0 B r^2 f(z) \right) \left(-e_0 B \frac{\partial}{\partial z} f(z) \right), \\ \dot{p}_g = 0. \end{array} \right. \quad (2)$$

К уравнениям (2) необходимо присоединить начальные условия для r_0, z_0, g_0 и для p_{r0}, p_{z0}, p_{g0} . Устойчивость численного алгоритма решения связана с шагом Δs решения, где $s = ct$ (t – текущее время), и ларморовским параметром $\mu = e_0 B / mc$. Таким образом, при выполнении условия $\mu \Delta s \ll 1$ можно ожидать сходимость численного решения системы к его аналитическому аналогу. Условие $\mu \Delta s \ll 1$ будет выполняться, если $\Delta s \ll 0.0001 m$. С вычислительной точки зрения задача может быть сформулирована как задача Коши. Результатом будет являться траектория электрона (или пучок таких траекторий) отвечающий множеству начальных условий. Потребовав выполнения заданного условия (например, достижение радиальной компонентой r некоторого значения r_U) можно, зафиксировав значения других компонент траектории электрона, сформировать результирующий пучок и изучить его свойства.

Численно проведено изучение динамики движения электронов для количества частиц, равного 1000, в магнитном поле соленоида. В работе в качестве результата расчета использовалась итоговая гистограмма $G(z_U)$ распределения частиц по вертикали $z = z_U$, найденная по выполнению заданного условия – достижение радиальной компонентой r некоторого заданного значения $r_U = 0.033m$. В свою очередь, эту гистограмму $G(z_U)$ необходимо сравнить с распределением токов на ламелях (рис. 1г).

На рис. 3 показаны полученные зависимости для распределения $G(z_U)$ результирующего пучка (рис. б, з) на мишени от радиальных размеров катода (рис. а, в).

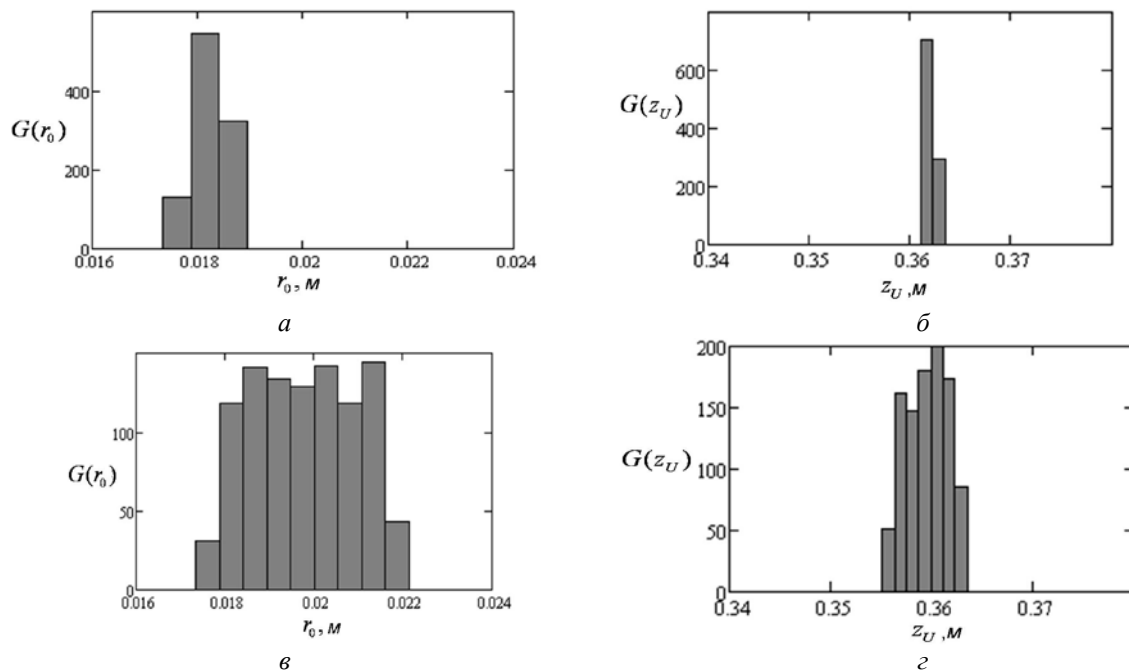


Рис. 3. Влияние толщины распределения по радиусу r_0 электронного кольца на старте $G(r_0)$ (рис. а, в) для катода толщиной 1 мм и 4 мм, и итоговые гистограммы $G(z_U)$ (рис. б, з)

Аналогичные зависимости, но для стартового вертикального распределения, показаны на рис. 4. Зависимости итоговых гистограмм $G(z_U)$ от распределения по r'_0 на старте показаны на рис. 5.

Из приведенных на рис. 3–5 гистограмм $G(z_U)$ вертикальных значений z_U при достижении радиального уровня $r_U=0.033$ м видно, что поток электронов попадает на вертикальный участок, протяженность которого Δz_U порядка миллиметра. При рассмотрении потоков частиц с фазовым объемом исходных величин увеличенного размера, в частности, с большим вертикальным размером Δz_0 и большего разброса по импульсам p_{z0} , p_{r0} и $p_{\theta0}$ можно ожидать соответствующее увеличение вертикального участка Δz_U , на котором реализуется выполнение условия попадания на заданный радиус. При рассмотрении потоков частиц с фазовым объемом исходных величин увеличенного размера можно ожидать соответствующее увеличение вертикального участка Δz_U , на котором реализуется выполнение условия попадания на заданный радиус. Оптимизацией распределения магнитного поля (создаваемого соленоидом и кольцевыми магнитами) и его градиента спада можно добиться увеличения попадания электронов на одно кольцо (до ~72 % тока пучка).

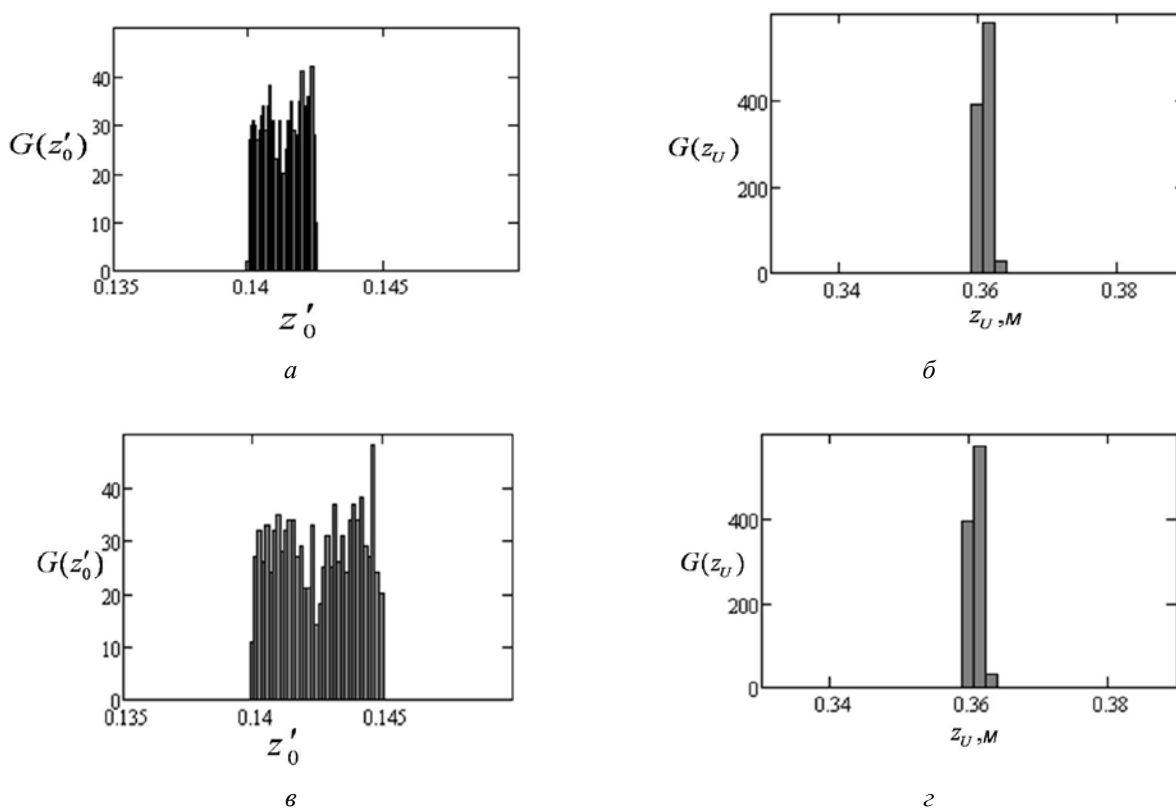


Рис. 4. Вертикальное распределение $G(z'_0)$ по направлениям z'_0 на старте (а – толщина электронного кольца 2 мм, в – толщина электронного кольца 5 мм) и итоговые гистограммы $G(z_U)$ (рис. б, г)

Зависимости итоговых гистограмм $G(z_U)$ от распределения по r'_0 на старте показаны на рис. 5.

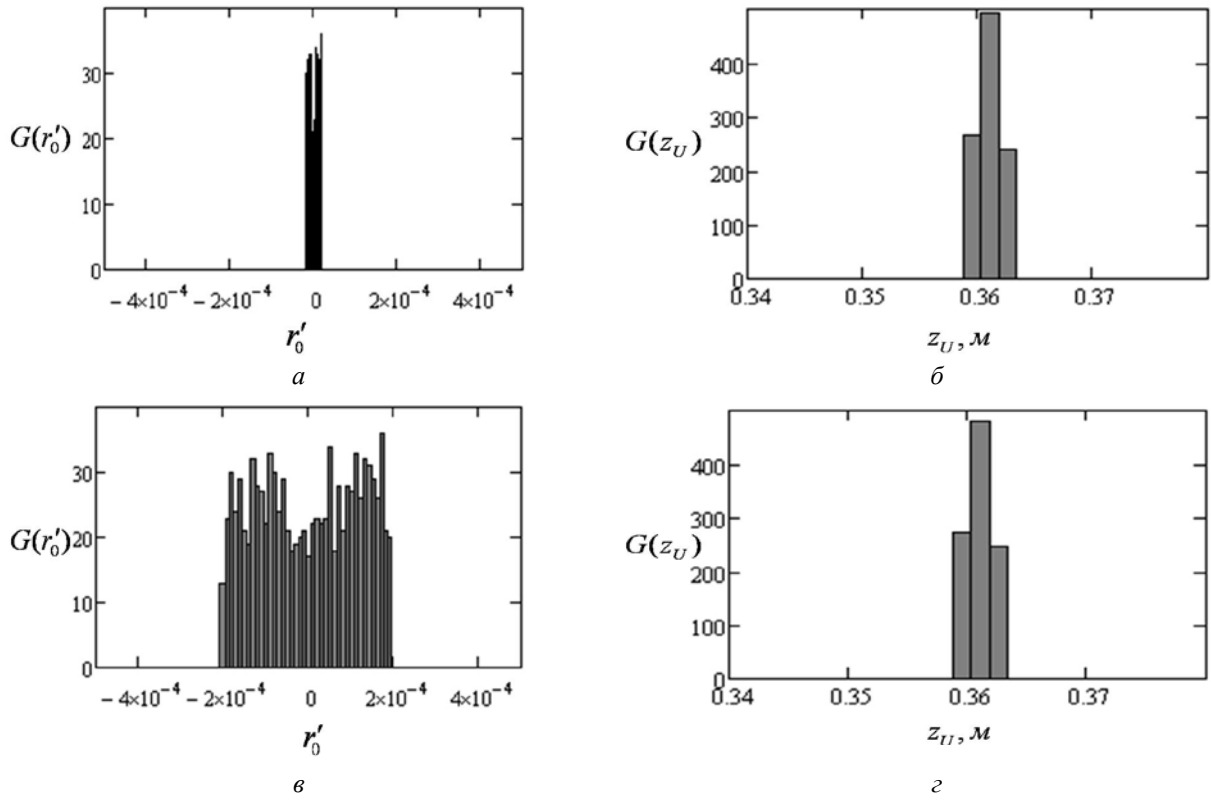


Рис. 5. Влияние распределения $G(r'_0)$ по r'_0 на старте (кривые а, в) и гистограммы $G(z_U)$ (рис. б, z)

Зависимости итоговых гистограмм $G(z_U)$ от энергии E эмитируемых частиц приведены на рис. 6.

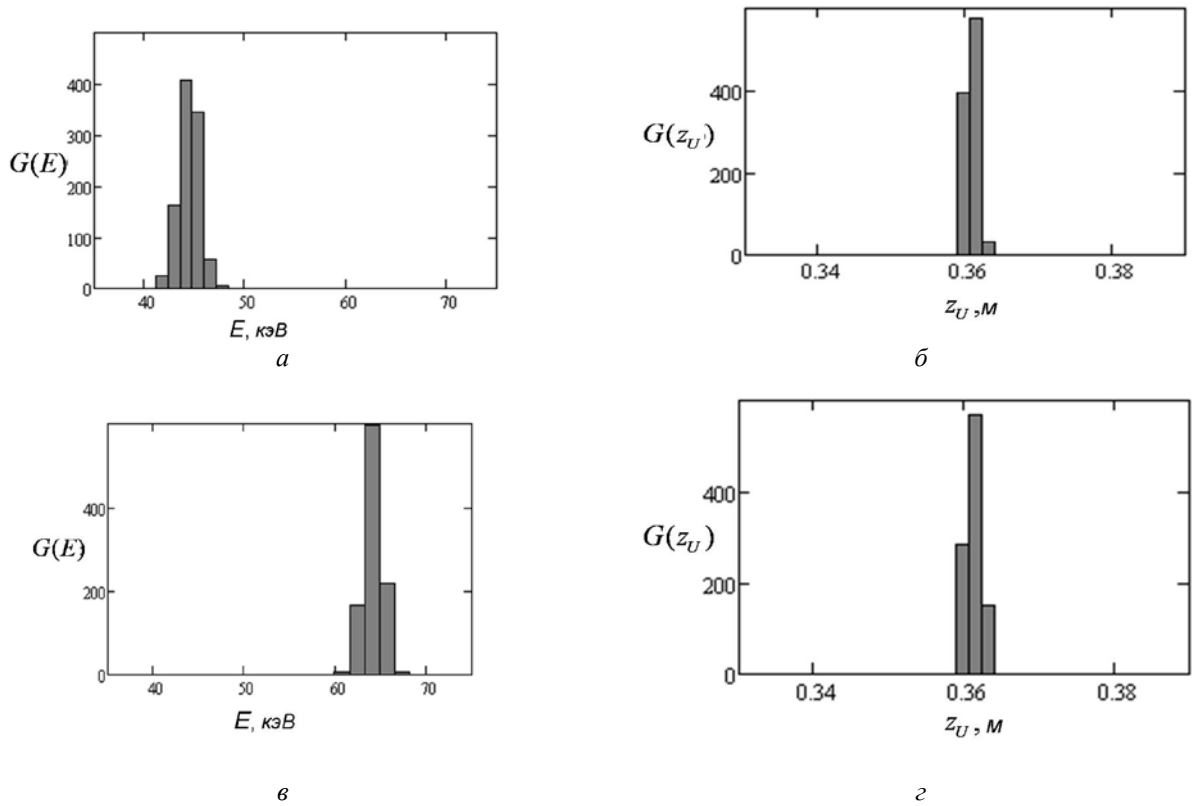


Рис. 6. Влияние энергетического распределения $G(E)$ на старте (рис. а, в), средняя энергия 45 кэВ и 65 кэВ, и итоговые гистограммы $G(z_U)$ (рис. б, z)

Видно, что для применяемых пролетных расстояний динамика частиц в радиальном направлении не связана с их энергией. Приведенные результаты указывают на возможность устойчивого формирования радиального электронного пучка с энергией в десятки килоэлектронвольт в спадающем магнитном поле соленоида.

Выводы

В работе представлены экспериментальные данные и результаты моделирующих расчетов по формированию в радиальном направлении электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом в диапазоне энергий электронов 35...65 кэВ и измерению его параметров при транспортировке в суммарном спадающем магнитном поле соленоида. Синтезированное программное средство позволило получать и интерпретировать характеристики результирующих электронных потоков. Полученные результаты численного моделирования согласуются с данными эксперимента. Отмечена возможность регулировки места попадания пучка на внутреннюю цилиндрическую поверхность при вариации амплитуды управляющего магнитного поля. Найдено, что величина тока и его распределение вдоль длины колец зависит от амплитуды распределения магнитного поля вдоль оси системы и градиента спада магнитного поля. Получено, что для выбранных начальных условий для пучка электронов и распределений продольного магнитного поля вдоль оси пушки и канала транспортировки поток электронов попадает на вертикальный участок, длина которого порядка сантиметра. Приведены решения прямой задачи моделирования траекторий электронов для заданных начальных условий и параметров. Полученные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности устойчивого формирования электронного пучка в радиальном направлении магнетронной пушкой с холодным вторичноэмиссионным катодом в спадающем магнитном поле соленоида.

Список использованной литературы

1. Engelko V., Mueller G., Andreev A. et al. Pulsed Electron Beam Facilities (GESA) for Surface Treatment / Proceedings of the 10th International Conference on Applied Charged Particle Accelerators in Medicine and Industry (St.-Petersburg, Russia, 2001).-P. 412 – 4172.
2. Школьников Э.Я. и др. Сильноточный ускоритель электронов микросекундной длительности для радиационно-технологических целей // Тр. XI Междунар. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, Россия, 2005, С.126.
3. А.Н.Довбня, С.Д.Лавриненко, В.В.Закутин и др. Модификация поверхности циркония и сплава Zr1%Nb электронным пучком ускорителя на основе магнетронной пушки. // ВАНТ. Серия «Физика радиационного материаловедения», 2011, № 2(72).-Вып.97.- с.39-45
4. В.А.Глухих, О.П.Печерский, В.И.Энгелько, Б.П.Яценко. Модификация поверхностных свойств материалов с помощью мощных импульсных электронных пучков. Сборник докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург, 1–4 октября, 2001, С. 445-447.
5. Довбня А.Н. Исследование формирования пучка в ускорителе электронов с вторичноэмиссионным источником / А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк и др. // Вісник «ХНУ». Сер.: Ядра, частинки, поля. – 2006. – № 732, вып. 2(30). – С. 96–100.
6. Буляк Е.В., Довбня А.Н., Довбня Н.А. и др. Формирование электронного пучка в радиальном направлении магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом: эксперимент и моделирование. // Вестник ХНТУ.-2014.-№ 3(50).-С.230–234.