

УДК 621.384.6

А. С. МАЗМАНИШВИЛИ, Н. Г. РЕШЕТНЯК

### ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ В РАДИАЛЬНОМ И ОСЕВОМ НАПРАВЛЕНИЯХ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, ЭМИТИРОВАННОГО ВТОРИЧНОЭМИССИОННОЙ МАГНЕТРОННОЙ ПУШКОЙ

Представлено експериментальні дані і результати чисельних розрахунків по генерації електронного пучка енергії 55 кеВ магнетронною гарматою з вторинноemisійним катодом. Вивчено формування розподілу пучка при транспортуванні в спадаючому магнітному полі соленоїда. Транспортування пучка здійснювалося в системі, що складається з мідних кілець, зміщеною від зрізу магнетронної гармати. Вивчена залежність підсумкового вертикального розподілу на внутрішній стінці циліндричної мішені і циліндрі Фарадея від розподілу магнітного поля уздовж осі системи. Наводяться результати чисельного моделювання руху трубчастого електронного потоку. Отримані результати моделювання узгоджуються з даними експерименту.

**Ключові слова:** електронний пучок, магнетронна гармата, магнітне поле, чисельне моделювання електронного потоку, управління радіальним рухом електронного пучка.

Представлены экспериментальные данные и результаты численных расчетов по генерации электронного пучка энергии 55 кэВ магнетронной пушкой с вторичноemisсионным катодом. Изучено формирование распределения пучка при транспортировке в спадающем магнитном поле соленоида. Транспортировка пучка осуществлялась в системе, состоящей из медных колец, смещенной от среза магнетронной пушки. Изучена зависимость итогового вертикального распределения на внутренней стенке цилиндрической мишени и цилиндра Фарадея от распределения магнитного поля вдоль оси системы. Приводятся результаты численного моделирования движения трубчатого электронного потока. Полученные результаты моделирования согласуются с данными эксперимента.

**Ключевые слова:** электронный пучок, магнетронная пушка, магнитное поле, численное моделирование электронного потока, управление радиальным движением электронного пучка.

Experimental data and results of numerical calculations on the generation of an electron beam of energy 55 keV by a magnetron gun with a secondary-emission cathode are presented. The formation of the beam distribution during transport in a decreasing magnetic field of a solenoid is studied. The beam was transported in a system consisting of copper rings displaced from the shear of the magnetron gun. The dependence of the final vertical distribution on the inner wall of the cylindrical target and the Faraday cylinder on the distribution of the magnetic field along the axis of the system is studied. The results of numerical simulation of the motion of a tubular electron beam are presented. The obtained results of the simulation are consistent with the experimental data.

**Keywords:** electron beam, magnetron gun, magnetic field, numerical simulation of the electron beam, control of the radial motion of the electron beam.

**Введение.** Изучение электронных пучков различной конфигурации и интенсивности связаны с их применением в высоковольтной импульсной СВЧ электронике, электронно-лучевых технологиях, ускорительной технике и т.д. [1, 2]. На практике разрабатываются и внедряются в промышленное производство пучковые технологии обработки материалов. Для решения этих задач широко используются ускорители интенсивных электронных пучков с энергией электронов 100...400 кэВ [3, 4].

В НИЦ ХФТИ проводятся исследования с источниками электронов с холодными катодами, работающими в режиме вторичной эмиссии. В качестве источника электронов используется магнетронная пушка. На основе магнетронной пушки со вторично-emиссионным катодом создан ускоритель электронов [5], в котором используется осевой электронный пучок для облучения металлических мишеней [6].

В данной работе представлены результаты исследований по формированию в радиальном и осевом направлениях электронного пучка, генерируемого магнетронной пушкой, при его транспортировке в спадающем магнитном поле соленоида, и построена математическая модель движения электронного потока в этом поле.

**Экспериментальная установка и методика исследований.** На ускорителе электронов проведены исследования по формированию радиального элек-

тронного пучка магнетронной пушкой с вторично-emиссионным катодом. Основное магнитное поле для генерации и транспортировки пучка создавалось соленоидом, состоящим из 4 катушек М1, М2, М3, М4. Регулируя ток в катушках соленоида можно было изменять амплитуду и продольное распределение магнитного поля вдоль оси системы, а также скорость спада магнитного поля соленоида.

На рис. 1 приведены три распределения продольного магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки (кривые Н1, Н2, Н3), при которых проводились эксперименты.

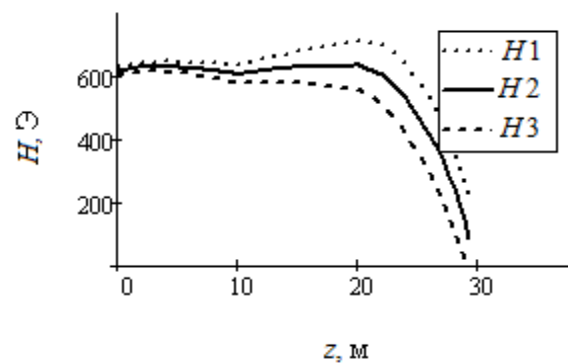


Рис. 1 – Розподілення продольного магнітного поля вздовж осі магнетронної пушки і каналу транспортування пучка

Транспортировка пучка осуществлялась в системе, состоящей из 14 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. На середине 6-го кольца располагался цилиндр Фарадея, который служил для измерения тока в осевом направлении.

Кроме того, для локального изменения скорости спада магнитного поля соленоида использовалось рассеянное магнитное поле, создаваемое кольцевыми магнитами из материала SmCo5, размещенными на оси системы за цилиндром Фарадея.

Приведенные на рис. 1 кривые амплитудного распределения получены путем изменения магнитного поля, создаваемого катушкой M4. При этом поле H1 создавалось путем суммирования поля катушки M4 и остальных катушек, H3 – путем вычитания поля M4 из поля остальных катушек, наконец, поле H2 создавалось при выключенной катушке M4. Далее удобно пользоваться параметром вариации k таким, что  $-1 \leq k \leq 1$ . Тогда, варьируя ток в катушке M4, можно было получать поле H<sub>k</sub> такое, что

$$H_k = H2 + k(H1 - H2), \quad (1)$$

при этом  $H1 = H_{+1}$  и  $H3 = H_{-1}$ .

**Подготовка данных к математическому моделированию.** Из нижеприведенных уравнений движения электрона в магнитном поле (5) следует, что амплитуду  $f(z)$  магнитного поля как функцию продольной координаты  $z$  необходимо задавать в аналитическом виде. То же относится и к её производной  $\partial f(z)/\partial z$ . Поэтому для проведения моделирующих расчетов была составлена отдельная процедура, позволяющая на основании измеренного массива магнитного поля (рис. 1) восстанавливать распределение амплитуды магнитного поля вдоль оси  $z$ . Аналитическое представление для этих функций возможно восстановить, опираясь на формулу

$$A(z) = \frac{z - z_r}{4\sqrt{(z - z_r)^2 + R^2}} - \frac{z - z_l}{4\sqrt{(z - z_l)^2 + R^2}}, \quad (2)$$

в которой  $A(z)$  – соленоидальная функция магнитного поля,  $R$  – радиус,  $z_l$  и  $z_r$  – левая и правая границы катушки, и аналогично для каждого из катушек. Набор из  $M$  экземпляров такого рода соленоидальных функций не образует полного базиса, пригодного для решения. Однако если учесть, что катушки следуют последовательно вдоль оси  $z$ , а левые и правые фронты спада магнитного поля в каждой из них достаточно малы относительно продольных размеров, то можно принять, что в совокупности свойства каждой из этих функций близки к свойствам тета-функций Хэвисайда, пригодных для использования их в качестве базиса.

Сопоставляя имеющиеся две группы данных, можно записать уравнения для амплитуд магнитного

поля  $\{H_m\}$  в каждой из точек измерения  $\{z_n\}$ ,  $n = 0, 1, \dots, N$ , вдоль оси  $z$ :

$$\sum_{m=1}^M H_m A_m(z_n) = X_n, \quad (3)$$

в которых последовательностью  $\{X_n\}$ , обозначена совокупность результатов измерения объемом  $N + 1$ . В качестве решения можно рассматривать набор оценок значений величин  $\{H_m\}$ ,  $m = 0, 1, \dots, M$ .

На рис. 2 приведен результат выполненного восстановления на примере поля H2, характеризующий качество аппроксимации.

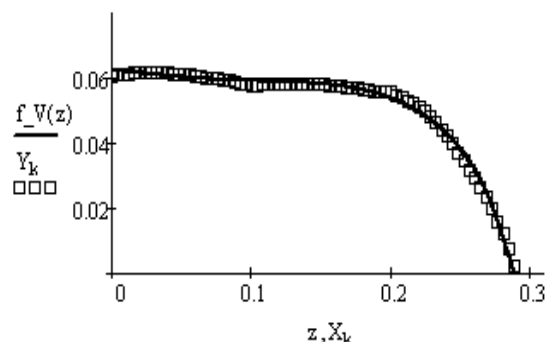


Рис. 2 – Пример аппроксимации амплитуды магнитного поля вдоль оси  $z$ ; квадратики – поле H2, линия – результату аппроксимации  $f_V(z)$

На основании полученного аналитического выражения для функции аппроксимации  $f_V(z)$  соответствующую производную  $\partial f(z)/\partial z$  можно получить, опираясь на выражение (2).

Пример результата расчетов, в которых использовано аналитическое выражение для производной  $dA(z)/dz$ , основанное на формуле (2), приведен на рис. 3.

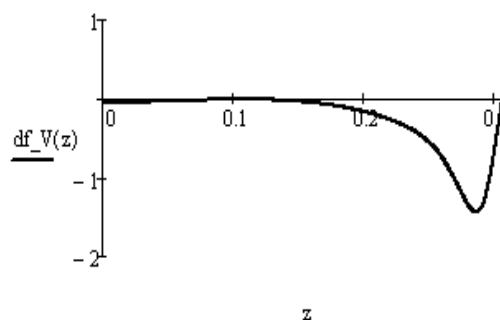


Рис. 3 – Пример результата расчета производной  $dA(z)/dz$ , основанного на аналитической формуле

В качестве начальных условий для электронного пучка принималось: начальный радиус  $r_0 = 20$  мм (средний радиус кольца эмиссии);  $z_0 = 14$  мм (место эмиссии по вертикали); координата  $z'_0$  определялась энергией частиц. При этом начальное распределение

по азимуту  $\vartheta_0$  задавалось равномерным на  $(0, \pi)$ , а разброс отклонения частиц по радиусу  $r_0$  подчинялся нормальному закону со среднеквадратическим отклонением  $\Delta r_0 = 1$  мм.

Эскиз двумерной нормальной плотности распределения эмитируемых  $N = 500$  частиц в  $(x, y)$ -плоскости катода с параметрами  $r_0 = 20$  мм и  $\Delta r_0 = 1$  мм приведен на рис. 4.

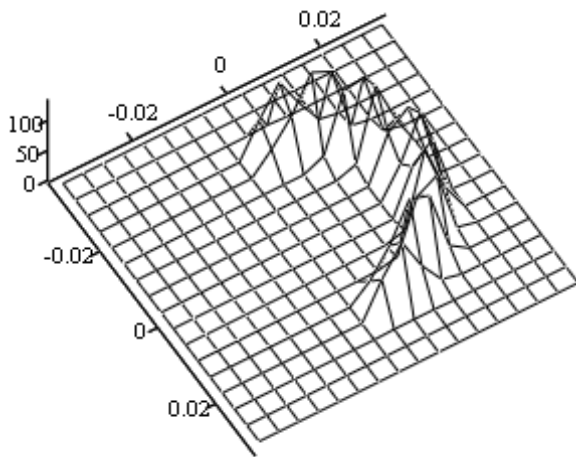


Рис. 4 – Плотность распределения электронов в  $(x, y)$ -плоскости катода пушки

**Математическое моделирование.** Для понимания и интерпретации физических процессов, сопровождающих механизм такого формирования электронного пучка, был проведен теоретический анализ.

**Постановка задачи.** Рассматривается задача, в которой поток электронов с энергией  $E$ , движущихся параллельно оси (или под углом к ней) на некотором расстоянии  $r_0$  от неё на старте, распространяется в заданном соленоидальном магнитном 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  $r'_0$ , а также по другим начальным координатам.

С вычислительной точки зрения задача может быть сформулирована как задача Коши, то есть задача нахождения решений системы обыкновенных дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями.

Гамильтониан рассматриваемой задачи в полярной системе координат  $(r, z, \vartheta)$  имеет вид

$$H = \frac{p_r^2 + p_z^2}{2m} + \frac{1}{2m} \left( \frac{p_\vartheta}{r} - e_0 A \right)^2, \quad (4)$$

где  $e_0$ ,  $m$  – заряд и масса покоя электрона,  $p_r$ ,  $p_z$ ,  $p_\vartheta$  – канонические импульсы,  $A$  – магнитный потенциал, который с учетом азимутальной симметрии записывается в виде  $A = A(r, z) = Brf(z)$ ,

где  $f(z)$  – амплитудная функция магнитного поля,  $B$  – напряженность магнитного поля в начальной точке.

В результате для уравнений движения запишем

$$\begin{cases} \dot{r} = \frac{p_r}{m}, \\ \dot{z} = \frac{p_z}{m}, \\ \dot{\vartheta} = \frac{1}{m} \left( \frac{p_\vartheta}{r} - e_0 Brf(z) \right) \frac{1}{r}, \\ \dot{p}_r = -\frac{1}{m} \left( \frac{p_\vartheta}{r} - e_0 Brf(z) \right) \left( -\frac{p_\vartheta}{r^2} - e_0 Bf'(z) \right), \\ \dot{p}_z = -\frac{1}{m} \left( \frac{p_\vartheta}{r} - e_0 Brf(z) \right) \left( -e_0 Br \frac{\partial}{\partial z} f(z) \right), \\ \dot{p}_\vartheta = 0. \end{cases} \quad (5)$$

К уравнениям (5) необходимо присоединить начальные условия для  $r_0$ ,  $z_0$ ,  $\vartheta_0$ , а также для  $p_{r0}$ ,  $p_{z0}$ ,  $p_{\vartheta0}$ . Устойчивость численного алгоритма решения связана с шагом  $\Delta s$ , где  $s = ct$  – пройденный частицей путь ( $t$  – текущее время,  $c$  – скорость света), и ларморовским параметром  $\mu = e_0 B / mc$ . Поэтому при выполнении условия  $\mu \Delta s \ll 1$  обеспечивается сходимость численного решения системы к его аналитическому аналогу. Условие  $\mu \Delta s \ll 1$  будет выполняться, если  $\Delta s \ll 0.1$  мм.

При проведении численных расчетов использовался метод Рунге-Кутты. Было установлено, что относительная точность расчета была не хуже, чем 0.005.

**Результаты моделирования и их обсуждение.** Численно проведено изучение динамики движения электронов для количества частиц, равного  $N = 1000$ , в соленоидальном магнитном поле. При такой величине объема выборки по форме статистических гистограмм возможно получать информацию о различных характеристиках пучка частиц и судить о виде соответствующих плотностей распределения частиц.

Условия расчетов выбирались в различных вариантах, связанных с возможностью вариации магнитного поля. В настоящей работе приводятся данные, отвечающие магнитным полям с коэффициентами вариации  $k = 0.4$  и  $k = 0.9$ , которые оказались наиболее интересными с точки зрения их интерпретации. Значения всех координат задавались фиксированными, кроме радиуса (средний начальный радиус, равный  $r_0 = 20$  мм, и среднеквадратичное отклонение  $\Delta r_0 = 1$  мм), а также азимутального угла вылета, равномерно распределенного на  $(0, \pi)$ .

Результатом расчетов будет являться набор из  $N$  траекторий электронов, отвечающих для каждого из них набору начальных условий (или пучок таких траекторий). Потребовав выполнения заданного условия, можно, зафиксировать значения других компонент траектории электрона и сформировать в

момент выполнения указанного условия распределение результирующего пучка.

На рис. 5 приведено семейство характеристик движения пучка частиц для параметра вариации магнитного поля  $k = 0.4$ .

На рис. 5, а показано распределение амплитуды поля, в котором частицы пучка, распространяясь вдоль оси  $z$  в спадающем магнитном поле, испытывают радиально-азимутальное движение.

Примеры горизонтальных сечений потока траекторий показаны на рис. 5, б, а набор из 10 траекторий – на рис. 5, в.

Из фазовой  $(r, z)$ -карты движения электронов, показанных на рис. 5 г, можно видеть схему дости-

жения частицей внутренней стенки мишени радиусом  $r_U = 33$  мм.

Примеры зависимостей радиальной компоненты движения  $r = r(s)$  от пройденного пути  $s$  для выбранных частиц с энергией  $E = 55$  кэВ и начальным радиусом  $r_0 = 20$  мм приведены на рис. 5, д, на которых также горизонтальной линией показан уровень достижения по радиусу значения радиуса мишени  $r_U = 33$  мм.

На рис. 5, е показаны массивы  $\{z_U\}$  объемом  $N = 500$  значений координаты  $z$ , отвечающих условию попадания  $z = z_U$ .

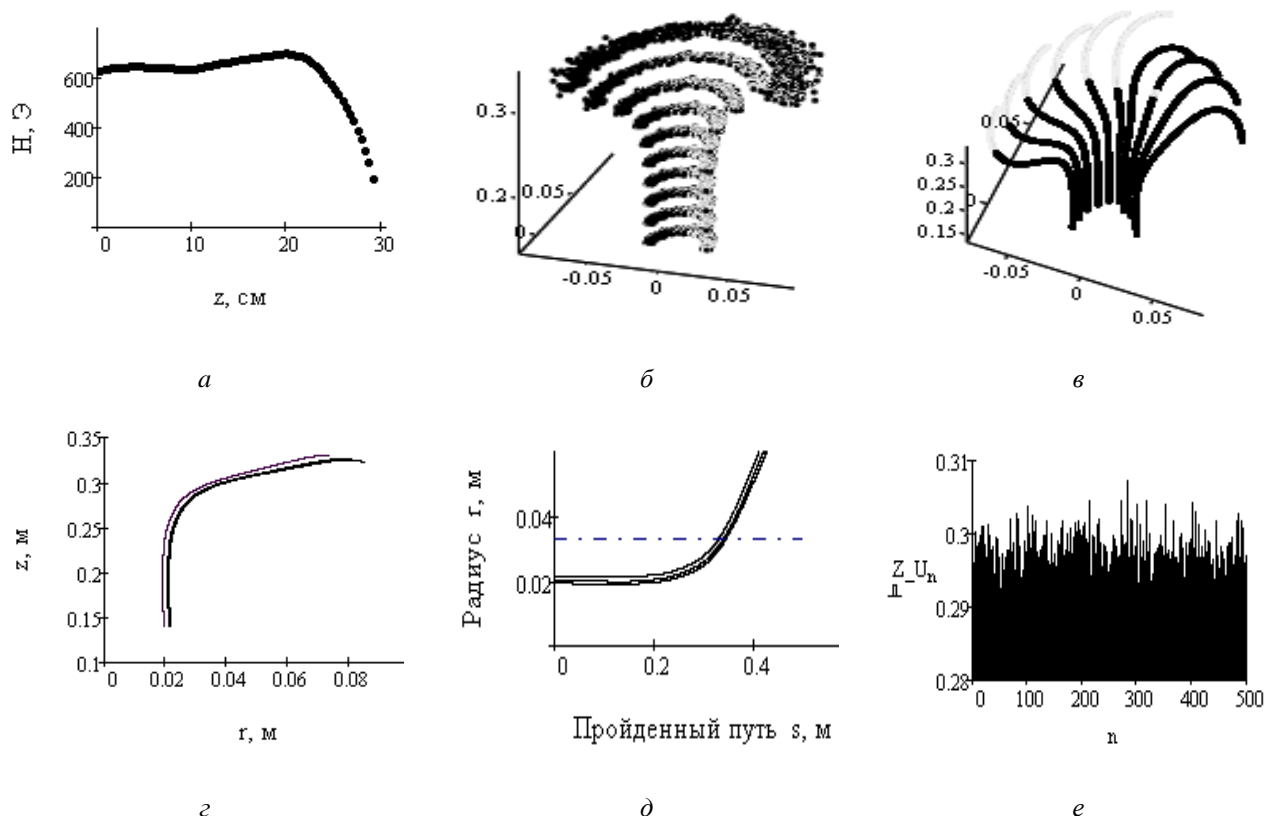


Рис. 5 – Расчетные характеристик пучка. Параметр поля  $k = 0.4$ ; а – конфигурация магнитного поля; б – горизонтальные сечения пучка; в – траектории частиц; г – фазовая  $(r, z)$ -карта траекторий; д – зависимость радиальной компоненты движения  $r$  от пройденного пути  $s$  для выбранных частиц; е – массив значений координаты  $z$  при попадании на стенку

На рис. 6 приведены два сечения пучка частиц, отвечающие стартовому значению  $r_0 = 20$  мм и значению на финише в момент достижения мишени радиуса  $r_U = 33$  мм. Видно, что вместе с радиальным движением частицы испытывают поворот по азимуту.

На рис. 7 показаны полученные гистограммы  $G(z)$  распределения результирующего пучка для различных значений коэффициента управления  $k$  магнитного поля. Гистограммы построены для массива вертикальных значений  $z_U$ , отвечающих достижению радиального уровня  $r_U$  мм. Из расчетов следует, что для обоих вариантов магнитного поля

поток электронов попадает на вертикальный участок, протяженность которого  $\Delta z_U$  составляет единицы миллиметров.

Полученная концентрация обусловлена спадающим характером магнитного соленоидального поля и исходным распределением частиц по координате  $r_0$ .

Сопоставление приводимых на рис. 8–9 данных эксперимента (токов на ламелях и цилиндре Фарадея) и численных результатов (гистограмм вертикальных значений  $z_U$  частиц при достижении ими заданного радиального уровня  $r_U$  мм) говорит о достаточно хорошем их соответствии.

Итак, обнаружено, что для рассматриваемых условий моделирования изменение конфигурации магнитного поля влияет только на общее смещение пучка электронов, но не приводит к заметному уширению вида итогового распределения потока частиц на стенке мишени по координате  $z$ .

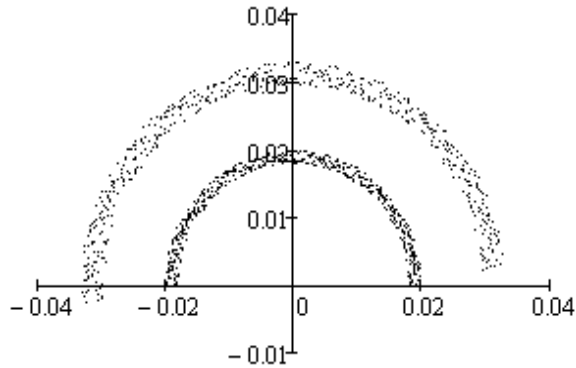


Рис. 6 – Поперечные сечения исходного массива частиц на старте ( $r_0 = 20$  мм) и массива на финише ( $r_U = 33$  мм)

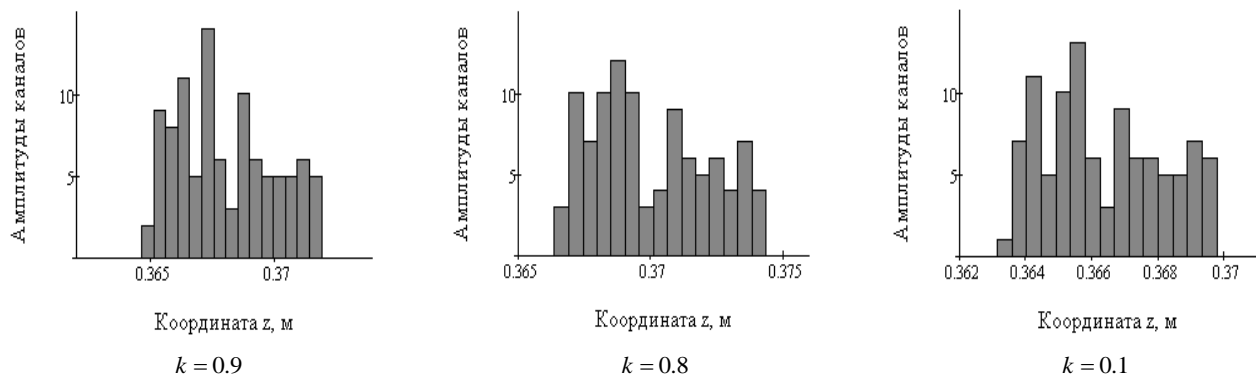


Рис. 7 – Гистограммы  $G(z)$  вертикального распределения частиц при их попадании на внутреннюю стенку радиусом  $r_U = 33$  мм для различных значений коэффициента управления  $k$  магнитного поля

В проведенных исследованиях в диапазоне энергий электронов 35...55 кэВ получено, что ток пучка в радиальном и осевом направлениях зависит от амплитуды и распределения магнитного поля вдоль оси системы транспортировки частиц. 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.

Сопоставление приводимых на рис. 8–9 данных эксперимента (токов на ламелях и цилиндре Фарадея) и численных результатов (гистограмм вертикальных значений  $z_U$  частиц при достижении ими заданного радиального уровня  $r_U$ ) говорит о достаточно хорошем их соответствии.

Итак, обнаружено, что для рассматриваемых условий моделирования изменение конфигурации магнитного поля влияет только на общее смещение пучка электронов, но не приводит к заметному

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** На рис. 7 приведены гистограммы распределения токов в вертикальном направлении на ламелях и цилиндре Фарадея для различных распределений магнитного поля.

В экспериментах получено, что при распределении магнитного поля (параметр вариации  $k = 0.4$ ), как видно из рис. 8, а, поток электронов регистрировался с 4-го по 6-е кольца и составлял ~50% тока пучка. Ток, идущий на цилиндр Фарадея, составлял ~50% тока пучка. Магнитное поле в области расположения колец было 420 Т.

С увеличением соленоидального магнитного поля ( $k = 0.9$ ) практически весь поток электронов попадал на цилиндр Фарадея (рис. 9, а), при этом малая его часть попадала на 6-е кольцо и составляла ~5% тока пучка. Такой режим формирования пучка осуществлялся при магнитном поле в области расположения колец напряженностью 650 Э и градиентом спада поля 350 Э/см. Это не дало возможности изменить характер движения потока частиц с осевого на радиальный.

уширению вида итогового распределения потока частиц на стенке мишени по координате  $z$ .

В работе было выполнено исследование зависимости средней точки  $Z_{sr}$  распределения пучка на стенке мишени от коэффициента вариации  $k$  магнитного поля. Из рис. 10 можно видеть, что искомая зависимость носит монотонный и почти линейный характер, что указывает на возможность устойчивого регулирования места попадания пучка на мишень.

На рис. 11 приведены относительные интенсивности потоков частиц, попадающих на цилиндр Фарадея и на стенку мишени, в зависимости от коэффициента вариации  $k$  магнитного поля. Из рисунка видно, что при  $k < 0.1$  практически все частицы попадают на стенку мишени. В расчетах рассматривался также вариант начальных условий с увеличенным значением среднеквадратичного отклонения пучка при эмиссии ( $\Delta r_0 = 3$  мм). Для него влияние увеличения разброса на старте проявилось лишь в соответствующем уширении расчетной гистограммы попадания частиц на стенку мишени ( $\Delta z_U = 15$  мм).

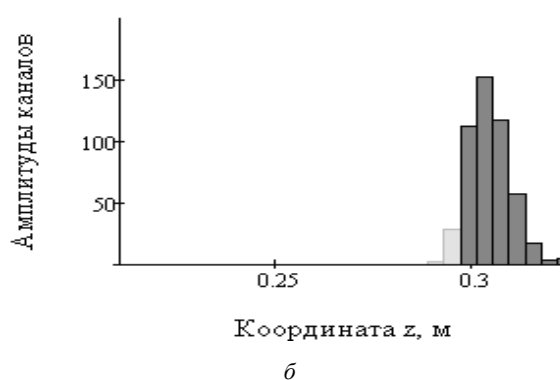
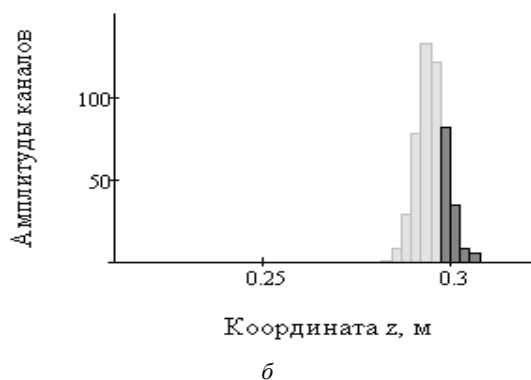
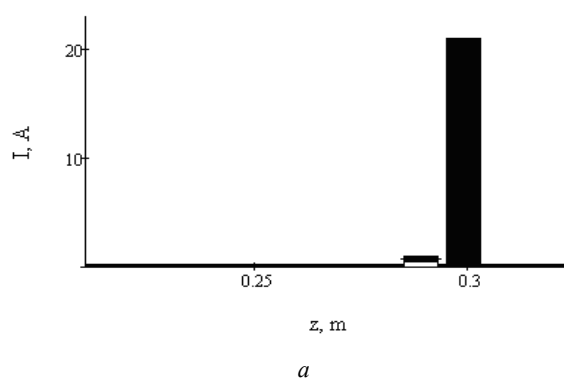
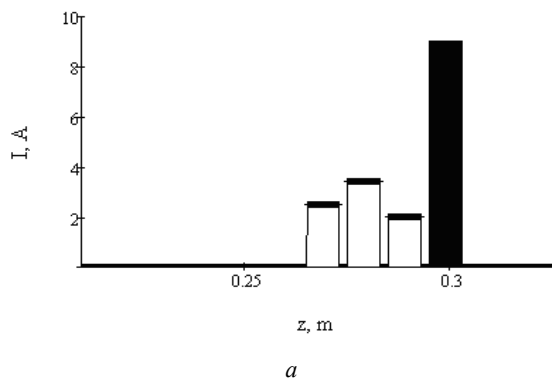


Рис. 8 – Распределения токов (а) и расчетные гистограммы попадания частиц на мишенную стенку (б). Черным цветом указано попадание на цилиндр Фарадея

Рис. 9 – Распределения токов (а) и расчетные гистограммы попадания частиц на мишенную стенку (б). Черным цветом указано попадание на цилиндр Фарадея

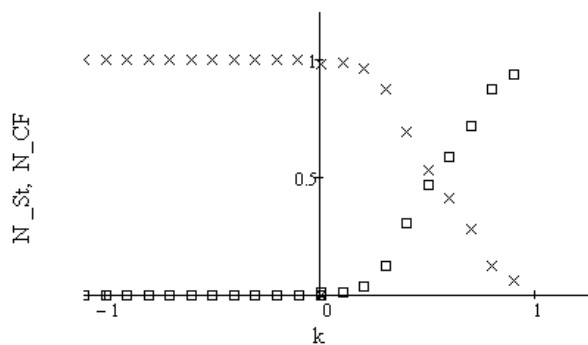
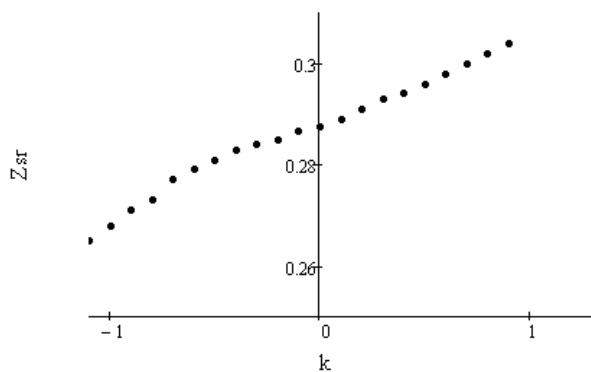


Рис. 10 – Зависимость средней точки  $Z_{sr}$  распределения пучка электронов на стенке мишени от коэффициента вариации  $k$  магнитного поля

Рис. 11 – Доли частиц, попадающих на цилиндр Фарадея (крестики) и на мишенную стенку (кружочки) в зависимости от коэффициента вариации  $k$  магнитного поля

При рассмотрении потоков частиц с фазовым объемом исходных величин увеличенного размера, в частности, с большим разбросом по импульсам, можно ожидать соответствующее увеличение вертикального участка  $\Delta z_U$ , на котором реализуется выполнение условия попадания.

**Выводы.** Из проведенных исследований следует, что возможно устойчивое формирование электронного пучка в радиальном и осевом направлениях при транспортировке в магнитном поле соленоида.

Экспериментально установлено, что величина тока в радиальном направлении и его распределение

вдоль металлических колец зависит от распределения магнитного поля вдоль оси системы. Численно получены решения прямой задачи моделирования траекторий электронов для заданных начальных условий и параметров системы. Показано, что поток электронов попадает на вертикальный участок, длина которого составляет несколько миллиметров. Полученные численные зависимости согласуются с экспериментальными результатами.

Таким образом, экспериментально установлена и численно изучена возможность регулировки места попадания пучка на вертикальную стенку при вариации амплитуды управляющего магнитного поля.

Список литературы

References (transliterated)

1. Saveliev Y. M. Self-excitation and characteristics of the crossed-fields emission electron source / Y. M. Saveliev, W. Sibbet, D. M. Parkes // Review of Scientific Instruments. – 1999. – Vol. 70, № 12. – P. 4502–4514.
2. Волколупов Ю. Я. Генерация электронных пучков в магнетронном диоде с металлическим вторичноэмиссионным катодом / Ю. Я. Волколупов, А. Н. Довбня, В. В. Закутин и др. // ЖТФ. – 2001. – Т 71. – В. 7. – С. 88–91.
3. Engelko V. Pulsed Electron Beam Facilities (GESA) for Surface Treatment / V. Engelko, G. Mueller, A. Andreev et al. Proceedings of the 10th International Conference on Applied Charged Particle Accelerations in Medicine and Industry. – St.-Petersburg. – 2001. – P. 412–417.
4. Школьников Э. Я. Сильноточный ускоритель электронов микросекундной длительности для радиационно-технологических целей / Э. Я. Школьников // Тр. XI Международного совещания применения ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. – Санкт-Петербург. – 2005. – С. 126–128.
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, вип. 2(30). – С. 96–100.
6. Довбня А. Н. Модификация поверхности циркония и сплава Zr 1%Nb электронным пучком ускорителя на основе магнетронной пушки / А. Н. Довбня, С. Д. Лавриненко, В. В. Закутин и др. // ВАНТ. Серия «Физика радиационного материаловедения». – 2011. – №2(72), вып. 97. – С. 39–45.
1. Saveliev Y. M., Sibbet W., Parkes D. M. Self-excitation and characteristics of the crossed-fields emission electron source. *Review of Scientific Instruments*. – 1999. – Vol. 70, № 12. – pp. 4502-4514.
2. Volkolupov Yu. Ya. Dovbnya A. N., Zakutin V. V. Generacia elektronnih puchkov v magnetronnom diode s metalicheskim vtovichnoemissnym katodom [Generation of electron beams in a magnetron diode with a metallic secondary-emission cathode]. *GTF*, 2001, T 71, vol. 7, pp. 88–91.
3. Engelko V., Mueller G., Andreev A. Pulsed Electron Beam Facilities (GESA) for Surface Treatment. *Proceedings of the 10th International Conference on Applied Charged Particle Accelerations in Medicine and Industry*. St.-Petersburg, 2001, pp. 412–417.
4. Shkol'nikov E.Ya. Sil'notochniy uskoritel' elektronov microsekundnoy dlitel'nosti dlya radiacionno-tehnologicheskikh celey. *Tr. XI Megdunarodnogo sovetshaniya primeneniya uskoriteley zaryagennih chastic v promishlennosti i medicine*. [Tr. XI International Meeting of Accelerators of Charged Particles in Industry and Medicine]. St.-Petersburg, Russia, 2005, pp. 126–128.
5. Dovbnya A. N., N. G. Reshetnyak and V. V. Zakutin. "Issledovanie formirovaniya puchka v uskoritele elektronov s vtovichniemissionnim istochnikom." *Visnyk "HNU". Ser.: Yadra, chastinki, polya*. [Bulletin "HNU". Ser. "Nuclei, Particles, Fields"]. No. 732, vip. 2(30). 2006, pp. 96–100.
6. Dovbnya A. N., Lavrinenko S. D. and Zakutin V. V. Modifikaciya poverhnosti cirkonia i splava Zr1%Nb elektronnim puchkom uskoritelya na osnove magnetronnoy pushki [Modification of the surface of zirconium and Zr 1% Nb alloy by an electron accelerator beam based on a magnetron gun] *VANT. Ser.: Fizika radiacionnogo materialovedeniya* [VANT. Series "Physics of Radiation Material Science"]. 2011, vol. 2 (72), iss. 97, pp. 39–45.

Поступила (received) 05.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Особливості формування в радіальному та осьовому напрямках електронного пучка, що емітований вторинноемісійною магнетронною гарматою / О. С. Мазманішвілі, М. Г. Решетняк // Вісник НТУ «ХП».** Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 28 (1250). – С. 53–59. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.

**Особенности формирования в радиальном и осевом направлениях электронного пучка, эмитированного вторичноэмиссионной магнетронной пушкой / А. С. Мазманішвілі, Н. Г. Решетняк // Вісник НТУ «ХП».** Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 28 (1250). – С. 53–59. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.

**Features of formation in radial and axial directions of electron beams emitted secondary-magnetron gun / A. S. Mazmanishvili, N. G. Reshetnyak // Bulletin of NTU "KhPI".** Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 28 (1250). – P. 53–59. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Мазманішвілі Александр Сергеевич** – доктор фізико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник ННЦ ХФТИ, г. Харьков; тел.: (067) 799-38-64; e-mail: mazmanishvili@gmail.com.

**Мазманішвілі Олександр Сергійович** – доктор фізико-математичних наук, професор, старший науковий співробітник ННЦ ХФТИ, м. Харків; тел.: (067) 799-38-64; e-mail: mazmanishvili@gmail.com.

**Mazmanishvili Oleksandr Serhiyovych** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, senior staff scientist NNC KhFTI, Kharkiv; tel.: (067) 799-38-64; e-mail: mazmanishvili@gmail.com.

**Решетняк Николай Григорьевич** – кандидат фізико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков; тел.: (068) 953-84-01; e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua.

**Решетняк Микола Григорович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», м. Харків; тел.: (068) 953-84-01; e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua.

**Reshetnyak Mikola Grygorovych** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, senior staff scientist National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkiv; tel.: (068) 953-84-01; e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua.