

УДК 621.384.6

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

*А.Н. ДОВБНЯ, Н.А. ДОВБНЯ, А.С. МАЗМАНИШВИЛИ, Н.Г. РЕШЕТНЯК*

---

Представлены экспериментальные данные и результаты численных расчетов по генерации электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом. Изучено формирование пучка в радиальном и осевом направлениях при транспортировке в магнитном поле соленоида при энергии 55 кэВ. 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 цилиндре Фарадея от распределения магнитного поля вдоль оси системы. Приводятся результаты численного моделирования по движению трубчатого электронного потока. Полученные результаты моделирования согласуются с данными эксперимента.

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

### 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. [1–3]. Круг задач, для решения которых применяются электронные пучки, постоянно расширяется, при этом для генерации электронных пучков используются электронные эмиттеры различных типов.

На практике разрабатываются и внедряются в промышленное производство пучковые технологии обработки материалов. Этими методами достигается повышение износостойкости, коррозионной стойкости, усталостной прочности материалов, полировка поверхности и т.д. Для решения этих задач широко используются ускорители интенсивных электронных пучков с энергией электронов 100...400 кэВ [4, 5].

В ННЦ ХФТИ проводятся исследования с источниками электронов с холодными катодами, работающими в режиме вторичной эмиссии. В качестве источника электронов используется магнетронная пушка. Вторичноэмиссионный механизм генерации пучка, вследствие его слаборазрушающего действия на материал катода, обуславливает сохранение эмиссионных свойств электронного источника в течение длительного времени. На основе магнетронной пушки со вторичноэмиссионным катодом создан ускоритель электронов [5], в котором используется осевой электронный пучок для облучения металлических мишеней.

В данной работе представлены результаты исследований по формированию в радиальном и осевом

направлениях электронного пучка, генерируемого магнетронной пушкой, при его транспортировке в магнитном поле соленоида, и построена математическая модель движения электронного потока в этом поле.

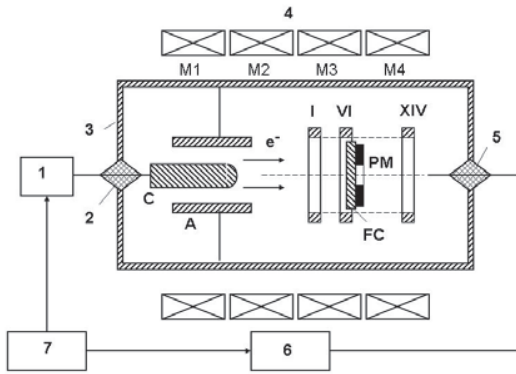
### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На ускорителе электронов проведены исследования по формированию радиального электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом и измерению его параметров при транспортировке пучка в спадающем магнитном поле соленоида.

Блок-схема установки приведена на рис. 1.

Для питания магнетронной пушки использовался импульсный генератор (1), который обеспечивал получение импульса напряжения с выбросом на вершине ~150 кВ, амплитудой плоской части импульса ~100 кВ и длительности импульса ~15 мкс. Источник электронов (С – катод, А – анод) размещался в вакуумном объеме 3. Для получения электронного пучка использовалась магнетронная пушка с диаметром анода 78 мм и диаметром катода 36 мм. Магнитное поле для генерации и транспортировки электронного пучка создавалось соленоидом (4), состоящим из 4 секций. Питание секций осуществлялось от источников постоянного тока.

Регулируя ток в катушках соленоида можно было изменять амплитуду и продольное распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и ка-



1 – высоковольтный импульсный генератор; магнетронная пушка с вторичноэмиссионным катодом С и анодом А; 2, 5 – изоляторы; 3 – вакуумная камера; 4 – соленоид (катушки М1, М2, М3, М4); 6 – компьютерная измерительная система; 7 – блок синхронизации; FC – цилиндр Фарадея; PM – постоянные магниты; I–XIV – металлические кольца

Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

нала транспортировки пучка, а также скорость спада магнитного поля соленоида. Это позволило получать различные режимы формирования электронного пучка. На рис. 2 приведены три распределения продольного магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки (кривые Н1, Н2, Н3), при которых проводились эксперименты.

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 (рис. 1). 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.

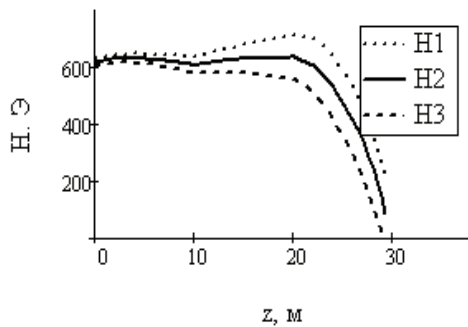


Рис. 2. Распределение продольного магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка

Измерительная система находится в магнитном поле, создаваемом соленоидом. Кроме того, для локального изменения скорости спада магнитного поля соленоида использовалось рассеянное магнитное поле, создаваемое кольцевыми магнитами из материала SmCo<sub>5</sub>, размещенными на оси системы за цилиндром Фарадея (рис. 1).

Приведенные на рис. 2 кривые амплитудного распределения получены путем изменения магнитного поля, создаваемого катушкой М4. При этом поле Н1 создавалось путем суммирования поля катушки М4 и остальных катушек, Н3 – путем вычитания поля М4 из поля остальных катушек, наконец, поле Н2 создавалось при выключенной катушке М4. Далее удобно пользоваться параметром вариации  $k$  таким, что  $-1 \leq k \leq 1$ . Тогда, варьируя ток в катушке М4, можно было получать поле  $H_k$  такое, что

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

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

## 2. 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. 2), а также известным геометрическим характеристикам использованных катушек соленоида, восстанавливать распределение амплитуды магнитного поля вдоль оси  $z$ . Аналитическое представление для функции  $f(z)$  возможно восстановить, опираясь на известную формулу [6]

$$A(z) = \frac{1}{4} \left( \frac{z - z_r}{\sqrt{(z - z_r)^2 + R^2}} - \frac{z - z_l}{\sqrt{(z - z_l)^2 + R^2}} \right), \quad (2)$$

в которой  $A(z)$  – соленоидальная функция магнитного поля,  $R$  – радиус,  $z_l$  и  $z_r$  – левая и правая границы катушки, и аналогично для каждой 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  $\{H_m\}$ ,  $m = 0, 1, \dots, M$ .

При подготовке расчетов по моделированию применен метод наименьших квадратов [6], на основании которого в качестве решения принимается такое решение, которое наилучшим образом приближается к точному в смысле его наименьшего среднеквадратичного отклонения. В результате получаем искомое решение  $\{H_m\}$ ,  $m = 0, 1, \dots, M$ .

На рис. 3 приведен результат выполненного восстановления на примере поля Н2, характеризующий качество аппроксимации.

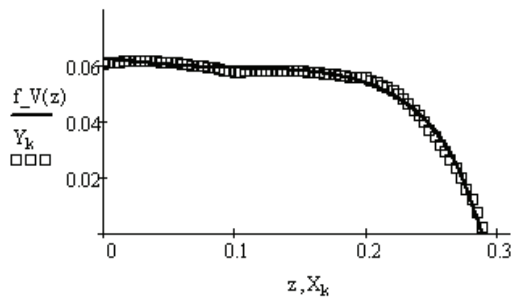


Рис. 3. Пример аппроксимации амплитуды магнитного поля вдоль оси  $z$ ; квадратики – поле Н2, линия – результат аппроксимации  $f_V(z)$

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. 4.

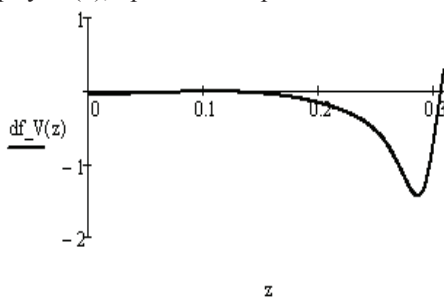


Рис. 4. Пример результата расчета производной  $dA(z) / dz$ , основанного на аналитической формуле

В качестве начальных условий для электронного пучка принималось: начальный радиус  $r_0 = 0.020$  м (средний радиус кольца эмиссии);  $z_0 = 0.014$  м (место эмиссии по вертикали); координата  $z'_0$  определялась энергией частиц (в полученных зависимостях энергия  $E$  частиц равнялась 55 кэВ). При

этом начальное распределение по азимуту  $\mathcal{G}_0$  задавалось равномерным на  $(0, 2\pi)$ , а разброс отклонения частиц по радиусу от  $r_0$  подчинялся нормальному закону со среднеквадратическим отклонением  $\Delta r_0 = 0.001$  м.

Эскиз двумерной гауссовской плотности распределения эмиттируемых частиц в плоскости катода с параметрами  $r_0 = 0,020$  м и  $\Delta r_0 = 0,001$  м приведен на рис. 5.

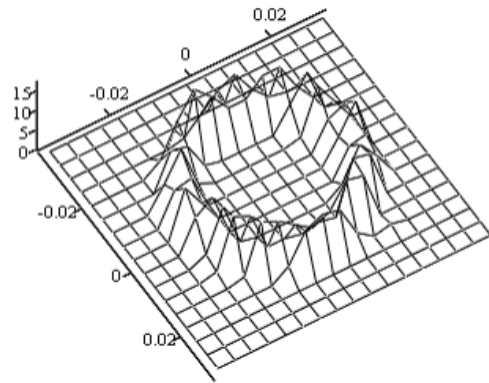


Рис. 5. Плотность распределения электронов в  $(X, Y)$ -плоскости катода пушки

### 3. 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.

Гамильтониан рассматриваемой задачи в полярной системе координат  $(r, z, \mathcal{G})$  имеет вид

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

где  $e_0$ ,  $m$  – заряд и масса покоя электрона,  $p_r$ ,  $p_z$ ,  $p_\mathcal{G}$  – канонические импульсы,  $A$  – магнитный потенциал, который с учетом азимутальной симметрии пока 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

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

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), 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.

С вычислительной точки зрения задача может быть сформулирована как задача Коши, т.е. задача нахождения решений системы обыкновенных дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями. При проведении численных расчетов использовался метод Рунге-Кутты. Было установлено, что относительная точность расчета была не хуже, чем 0.005.

#### 4. 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 радиальной плотности (средний начальный радиус, равный  $r_0=0.018$  м, и среднеквадратичное отклонение  $\Delta r_0=0.001$  м), а также азимутального угла вылета, равномерно распределенного на  $(0, 2\pi)$ .

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 (например, достижение радиальной компонентой

$r$  некоторого значения  $r_U$ ), можно, зафиксировать значения других компонент траектории электрона и сформировать в момент выполнения указанного условия распределение результирующего пучка.

На рис. 6 и 7 приведены два семейства характеристик пучка частиц для двух параметров вариации магнитного поля  $k=0.4$  и  $k=0.9$  (рис. 6, а и рис. 7, а). Из этих рисунков видно, что частицы пучка, распространяясь вдоль оси  $z$  в спадающем магнитном поле, испытывают радиально-азимутальное движение.

Примеры горизонтальных сечений потока траекторий показаны на рис. 6, б и 7, б, а набор из 10 траекторий – на рис 6, в и 7, в.

Из фазовых  $(r, z)$ -карт движения электронов, показанных на рис. 6, г и 7, г, можно видеть схему достижения частицей внутренней стенки мишени радиусом  $r_U=0.033$  м.

Примеры зависимостей радиальной компоненты движения  $r=r(s)$  от пройденного пути  $s$  для выбранных частиц с энергией  $E = 55$  кэВ и начальным радиусом  $r_0=0.018$  м приведены на рис. 6, д и 7, д, на которых также горизонтальной линией показан уровень достижения по радиусу значения радиуса мишени  $r_U=0.033$  м.

На рис. 6, е и 7, е показаны массивы  $\{z_U\}$  объемом  $N=500$  значений координаты  $z$ , отвечающих условию попадания на стенку мишени радиусом  $r_U=0.033$  м.

#### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

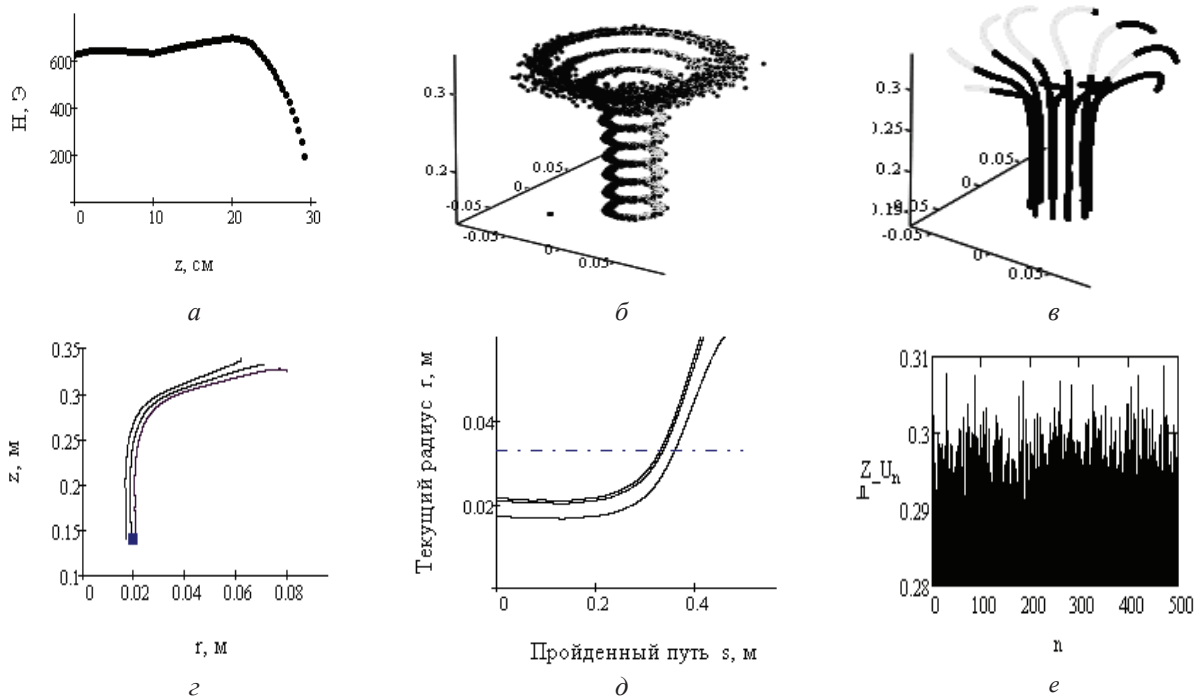
В проведенных исследованиях в диапазоне энергий электронов 35...55 кеВ получено, что ток пучка в радиальном и осевом направлениях зависит от амплитуды и распределения магнитного поля вдоль оси системы.

На рис. 8, а и 9, а приведены гистограммы распределения токов в вертикальном направлении на ламелях и цилиндре Фарадея для различных распределений магнитного поля ( $k=0.4$  и  $k=0.9$ ).

В экспериментах получено, что при распределении магнитного поля ( $k=0.4$ ), 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 0.042 Т.

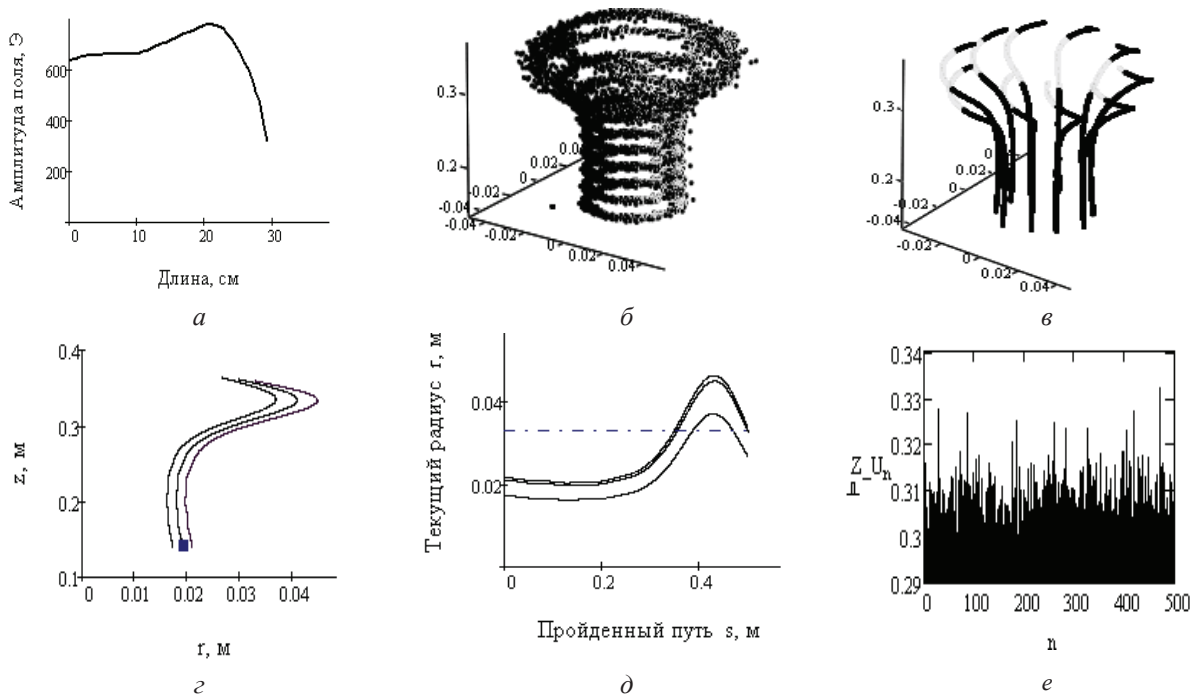
С увеличением соленоидального магнитного поля ( $k=0.9$ ) практически весь поток электронов попадал на цилиндр Фарадея (рис. 9, а), при этом малая его часть попадала на 6-е кольцо и составляла ~5% тока пучка. Такой режим формирования пучка осуществлялся при магнитном поле в области расположения колец напряженностью 0.065 Т и градиентом спаде поля 0.035 Т/см. Это не дало возможности изменить характер движения потока частиц с осевого на радиальный.





*a* – конфигурация амплитуды 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 мишенную стенку

Рис. 6. Расчетные зависимости характеристик пучка. Параметр поля  $k=0.4$



*a* – конфигурация амплитуды 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 мишенную стенку

Рис. 7. Расчетные зависимости характеристик пучка. Параметр поля  $k=0.9$

На рис. 8, *б* и 9, *б* приведены результаты расчета гистограмм вертикальных значений  $z_U$  частиц при достижении ими заданного радиального уровня  $r_U=0.033$  м.

Из расчетов следует, что для обоих вариантов магнитного поля поток электронов попадает на вер-

тикальный участок, протяженность которого  $\Delta z_U$  составляет единицы миллиметров. Такая концентрация обусловлена спадающим характером магнитного соленоидального поля и исходным распределением частиц по координате  $r_0$ .

Сопоставление приводимых на рис. 8 и 9 данных эксперимента (токов на ламелях и цилиндре Фарадея)

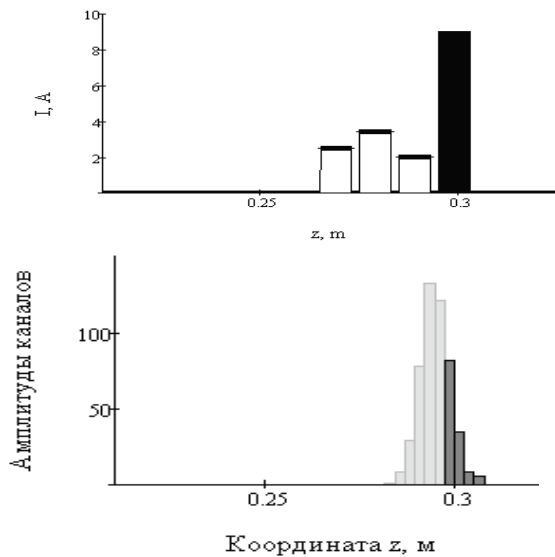


Рис. 8. Распределения токов на ламелях и цилиндре Фарадея (а) и расчетные гистограммы попадания частиц на мишенную стенку (б). Черным цветом указано попадание на цилиндр Фарадея

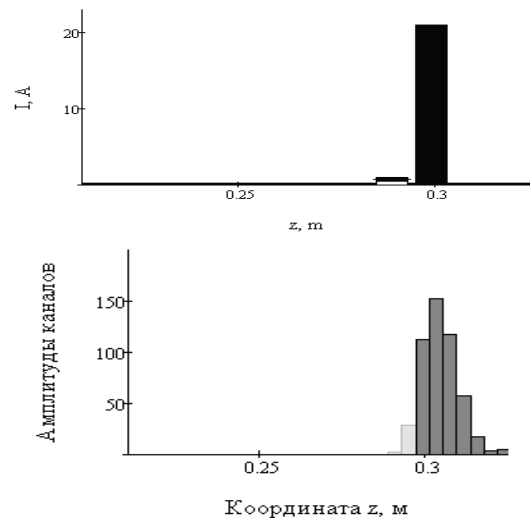


Рис. 9. Распределения токов на ламелях и цилиндре Фарадея (а) и расчетные гистограммы попадания частиц на мишенную стенку (б). Черным цветом указано попадание на цилиндр Фарадея

и численных результатов (гистограмм вертикальных значений  $z_U$  частиц при достижении ими заданного радиального уровня  $r_U=0.033$  м) 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  $z$ .

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 регулировки 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 ( $\Delta r_0=0.003$  м). Для него влияние увеличения разброса на старте проявилось лишь в соответствующем уширении расчетной гистограммы попадания частиц на стенку мишени ( $\Delta z_U=0.015$  м).

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.

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.

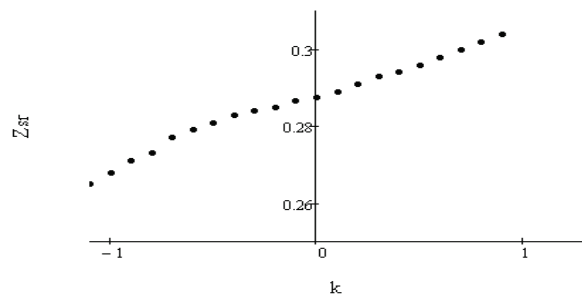


Рис. 10. Зависимость средней точки  $Z_{sr}$  распределения пучка электронов на стенке мишени от коэффициента вариации  $k$  магнитного поля

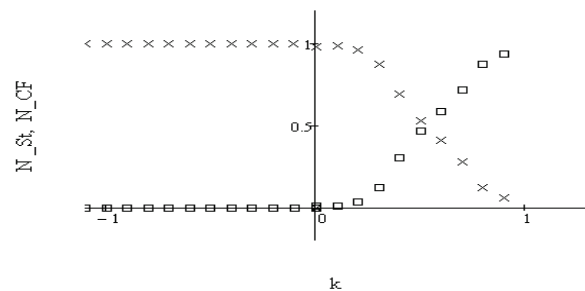


Рис. 11. Доли частиц, попадающих на цилиндр Фарадея (крестики) и на мишенную стенку (кружочки) в зависимости от коэффициента вариации  $k$  магнитного поля

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. 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. Показана возможность регулировки места попадания пучка на вертикальную стенку при вариации амплитуды управляющего магнитного поля.

### Литература

- [1] Волколутов Ю.Я., Довбня А.Н., Закутин В.В., Митроченко В.В., Красноголовец М.А., Решетняк Н.Г., Ромасько В.П., Чурюмов Г.И. Генерация электронных пучков в магнетронном диоде с металлическим вторичноэмиссионным катодом // ЖТФ. – 2001. – Т.71. – В.7. – С.88 – 91.
- [2] 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.-P.4502-4514.
- [3] Aizatsky N.I., Churyumov G.I., Dovbnya A.N., Zakutin V.V., Reshetnyak N.G., Starchevskiy Y.L. Generation and formation of axially symmetrical tubular electron beam in a cold metal secondary-emission cathode magnetron gun. Part 1. Experiment // IEEE Transaction and electron device, Vol. 63, №4, April, 2016. – P.1704-1709.
- [4] Engelko V., Mueller G., Andreev A., Berutchev N., Komarov O., Petuchov A., Tkatchenko K. Pulsed electron beam facilities (GESA) for surface treatment of materials / Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Applied Charged Particle Accelerators in Medicine and Industry (St.-Petersburg, Russia, 2001). – P.412-417.
- [5] А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк, В.П. Ромасько, И.А. Чертищев, В.Н. Борискин, Н.А. Довбня, Т.А. Коваленко. Исследование формирования пучка в ускорителе электронов с вторичноэмиссионным источником // Вісник ХНУ. Сер.: Ядра, частинки, поля. – 2006. – № 732, вип. 2(30). – С. 96–100.
- [6] Маделунг Э. Математический аппарат физики. – М.: Госиздат физ.-мат. литературы. – 1960. – 619 с.

Поступила в редколлегию 12.05.2016



**Довбня Анатолий Николаевич**, член-корреспондент Национальной Академии Наук Украины, доктор физ.-мат. наук, профессор, директор НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ. Область научных интересов: физика высоких энергий, применение ускоренных пучков электронов в промышленности и медицине.



**Довбня Наталья Анатольевна**, младший научный сотрудник НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ. Область научных интересов: математическое моделирование и применение электронных пучков.



**Мазманишвили Александр Сергеевич**, доктор физ.-мат. наук, профессор, старший научный сотрудник НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ. Область научных интересов: физика высоких энергий, применение ускоренных пучков.



**Решетняк Николай Григорьевич**, кандидат физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ. Область научных интересов: техника ускорения, формирования и использования потоков заряженных частиц.

УДК 621.384.6

**Дослідження формування в радіальному та вісьовому напрямках електронного пучка, що ермітований вторинноемісійною магнетронною гарматою / А.М. Довбня, Н.А. Довбня, О.С. Мазманишвілі, М.Г. Решетняк // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2016. – Том 15, № 2. С. 116 – 122.**

Наведено дослідницькі дані і результати чисельних експериментів з генерації електронного пучка магнетронною гарматою з вторинноемісійним катодом при енергії 55 кеВ. Вивчено формування його розподілу в ході транспортування в магнітному полі соленоида. Наводяться результати чисельного моделювання за рухом трубчастого електронного потоку.

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

Іл. 11.: Бібліогр.: 06 найм.

UDC 621.384.6

**Study of secondary-emission cathode magnetron gun emitted electron beam formation in radial and axial directions / A.N. Dovbnya, N.A. Dovbnya, A.S. Mazmanishvili, N.G. Reshetnyak // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2016. – Vol. 15, № 2. – P. 116 – 122.**

The present paper describes experimental and theoretical data on radial electron beam energy of 55 keV formed by a magnetron gun with a secondary-emission cathode. Numerical simulation data on the tubular electron flux motion in a decreasing magnetic solenoidal field are presented. Results of numerical modeling on the movement of the electron beam tube are given.

*Keywords:* magnetron gun, secondary-emission cathode, electron beam, magnetic-field distribution, mathematical simulation, histogram.

Fig. 11.: Ref.: 06 items.