

УДК 621.384.6

А.Н. ДОВБНЯ, А.С. МАЗМАНИШВИЛИ, Н.Г. РЕШЕТНЯК  
 Национальный Научный Центр "Харьковский физико-технический институт", Харьков, Украина

### ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ИЗ ОСЕВОГО В РАДИАЛЬНОЕ В СОЛЕНОИДАЛЬНОМ ПОЛЕ ВТОРИЧНОЭМИССИОННОЙ ПУШКИ

*Представлены 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. Изучена зависимость итогового вертикального распределения на внутренней стенке цилиндрической мишени и цилиндра Фарадея от распределения магнитного поля вдоль оси системы. Полученные результаты численного моделирования согласуются с данными эксперимента.*

*Ключевые слова:* электронный пучок, магнетронная пушка, численное моделирование.

A.N. DOVBNYA, A.S. MAZMANISHVILI, N.G. RESHETNYAK  
 National Science Center "Kharkov Institute of Physics & Technology", Kharkov, Ukraine

### TRANSFORMATION OF THE MOTION OF AN ELECTRON BEAM FROM AN AXIAL TO A RADIAL IN THE SOLENOID FIELD OF THE SECONDARY-EMISSION MAGNETRON GUN

*The results of numerical calculations for magnetron guns with secondary-emission cathode electron beam generation. Studied the formation of the beam in the radial and axial direction during transportation in a magnetic field of the solenoid at energy of 55 keV. Beam transport was carried out in a system consisting of copper rings. The dependence of the final vertical distribution on the inner wall of the cylindrical target and Faraday cup on the distribution of the magnetic field along the axis of the system. These simulation results are consistent with experimental data.*

*Keywords:* electron beam, magnetron gun, numerical simulation.

A.M. DOVBNYA, O.S. MAZMANISHVILI, M.G. RESHETNYAK  
 Національний Науковий Центр "Харківський фізико-технічний інститут", Харків, Україна

### ПЕРЕТВОРЕННЯ РУХУ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА З ОСЬОВОГО В РАДІАЛЬНИЙ В СОЛЕНОІДАЛЬНОМУ ПОЛІ ВТОРИННОЕМІСІЙНОЇ МАГНЕТРОННОЇ ГАРМАТИ

*Представлено результати чисельних розрахунків по генерації електронного пучка магнетронною гарматою з вторинноемісійним катодом. Вивчено формування пучка в радіальному і осьовому напрямках при транспортуванні в магнітному полі соленоїда при енергії 55 кеВ. Транспортування пучка виконувалось в системі, що складається з мідних кілець. Вивчена залежність результуючого вертикального розподілу на внутрішній стінці циліндричної мішені та циліндрі Фарадея від розподілу магнітного поля вздовж осі системи. Отримані результати чисельного моделювання узгоджуються з даними експерименту.*

*Ключові слова:* електронний пучок, магнетронна гармата, чисельне моделювання.

#### Постановка проблемы

Интерес к физике процессов со скрещенными электрическим и магнитным полями обусловлен их широким применением в вакуумной электронике больших мощностей, ускорительной технике и т.д. Представляет интерес использование в этих областях в качестве источников электронов магнетронных пушек с холодными вторичноэмиссионными катодами [1, 2]. Принцип работы таких пушек основан на вторичноэмиссионном разноможении электронов, образовании электронного облака и формировании электронного пучка в скрещенных электрическом и магнитном полях [3].

В ННЦ ХФТИ был создан ускоритель электронов на основе магнетронной пушки с холодным металлическим вторичноэмиссионным катодом [4]. Проведен цикл исследований по формированию радиального электронного пучка и измерению его параметров при транспортировке частиц в магнитном поле соленоида. В данной работе представлены результаты исследований по формированию радиального электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом при его транспортировке в спадающем магнитном поле соленоида.

Для получения электронного пучка использовались магнетронная пушка с диаметром анода 78 мм и диаметром катода 36 мм. Основное магнитное поле для генерации и транспортировки электронного пучка создается соленоидом, состоящим из 4-х секций. Регулируя ток в катушках, можно было изменять амплитуду и продольное распределение магнитного поля вдоль оси пушки и канала транспортировки пучка, что позволяло получать различные режимы формирования электронного пучка. Для локального изменения скорости спада результирующего магнитного поля использовалось рассеянное поле, которое создавалось с помощью постоянного магнита, размещенного на оси системы посередине 6-го кольца. Путем вариации токов в обмотках секций соленоида формировалось основное магнитное поле. Проведенное измерение суммарного магнитного поля соленоида и рассеянного поля кольцевого магнита от длины  $z$  показало, что оно резко неоднородно.

Измерительная система для исследования распределения тока в радиальном направлении состоит из 14-ти медных колец с внутренним диаметром 66 мм и шириной 8 мм, которые изолированы друг относительно друга и земли. Расстояние между кольцами ~1,5 мм. Перед постоянным магнитом расположен цилиндр Фарадея (FC), который служит для измерения тока в осевом направлении. Обработка результатов измерения параметров импульса напряжения, токов в радиальном и осевом направлениях проводилась с помощью регистрирующей системы.

Численно проведено изучение динамики движения электронов для количества частиц, равного 500, в суммарном магнитном поле. В работе в качестве результата расчета использовалась итоговая гистограмма распределения частиц по вертикали  $z=z_U$ , определяемая по выполнению заданного условия – достижение радиальной компонентой  $r$  траектории частиц заданного значения  $r_U=33$  мм. В свою очередь, сформированную гистограмму необходимо сравнить с распределением токов на измерительных ламелях.

**Изложение основного материала исследования**

**Экспериментальные данные и результаты численного моделирования.** Проведены исследования по формированию электронного пучка в радиальном направлении при транспортировке его в суммарном магнитном поле, создаваемого соленоидом и магнитом. При выполнении моделирующих расчетов коэффициент вариации  $k$  магнитного поля соленоида изменялся в диапазоне от 0.6 до 1.2.

На рис. 1 приведены массивы опытных данных (для двух значений коэффициента вариации  $k$ ) по распределению амплитуды магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки (квадратики) и результат его аппроксимации.

Были проведены экспериментальные исследования по формированию электронного пучка в радиальном направлении в спадающем магнитном поле соленоида и постоянного магнита. В 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.

В качестве начальных условий для электронного пучка принималось: начальный радиус  $r_0=20$  мм (средний радиус кольца эмиссии);  $z_0=13$  мм (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  $\theta_0$  задавалось равномерным на  $(0, \pi)$ , а разброс отклонения частиц по радиусу от  $r_0$  подчинялся нормальному закону со среднеквадратическим отклонением  $\Delta r_0 = 1$  мм.

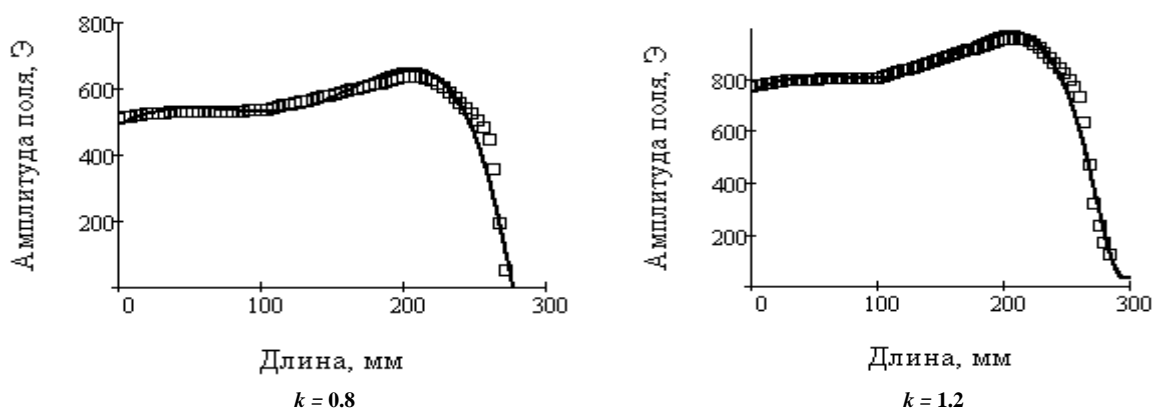


Рис. 1. Распределение магнитного поля (квадратики) и результат аппроксимации опытных данных

На рис. 2 показаны поперечные сечения пучка частиц при их распространении вдоль оси  $z$  в магнитном поле (коэффициент вариации  $k=1.0$ ), а также стартовая и финишная гистограммы числа частиц на  $(x,y)$ -плоскости при объеме выборки  $N=300$ . Видно, что при распространении частицы испытывают совместно с радиальным движением также и азимутальный поворот.

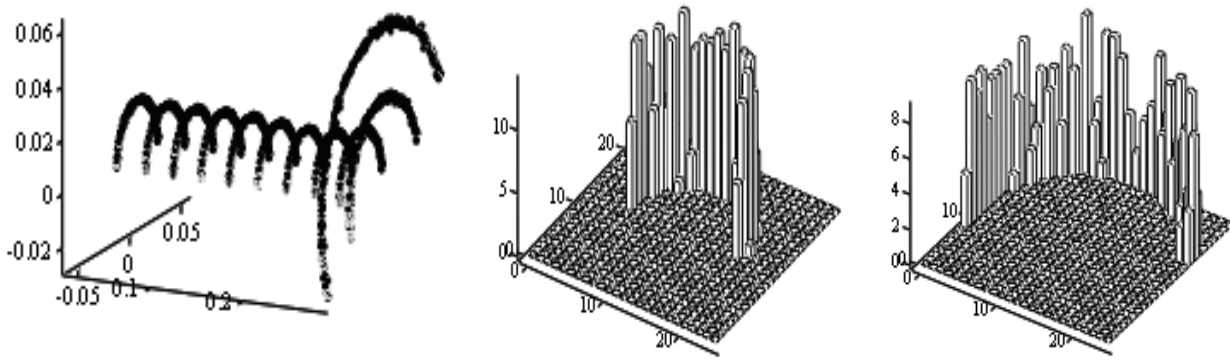


Рис. 2. Поперечные сечения пучка частиц (слева), стартовая (посередине) и финишная (справа) гистограммы числа частиц на (x,y)-плоскости

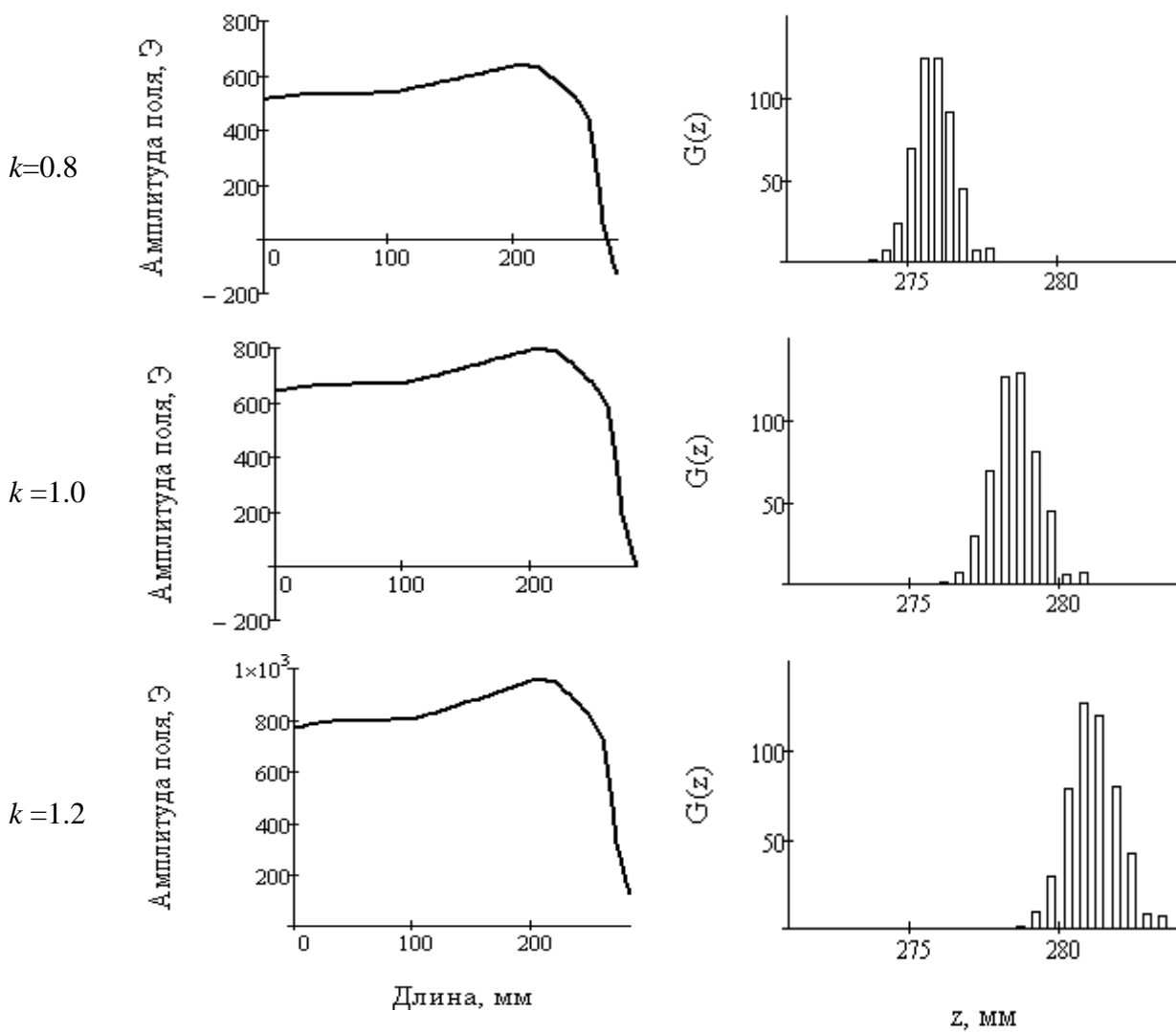


Рис. 3. Слева: распределения амплитуды поля  $H(z)$ , в котором частицы пучка испытывают движение. Справа: итоговые гистограммы  $G(z)$  значений вертикальных координат  $z=z_U$  при выполнении условия попадания ( $r=r_U=33$  мм) на мишенную стенку. Объем выборки  $N=500$ . Указан коэффициент вариации магнитного поля  $k = 0.8, 1.0$  и  $1.2$

На рис. 3 показаны распределения амплитуды поля  $H(z)$ , в котором частицы пучка, распространяясь вдоль оси  $z$  в спадающем магнитном поле, испытывают радиально-азимутальное движение, и итоговые гистограммы  $G(z)$  значений вертикальных координат при выполнении условия попадания  $r=r_U=33$  мм на мишенную стенку (при объеме выборки  $N=500$ ). Можно видеть, что смещение частиц вдоль вертикальной координаты на мишенной стенке обусловлено скоростью спада амплитуды суммарного поля  $H(z)$  на участке постоянного магнита. Тем самым, увеличение коэффициента вариации  $k$  поля соленоида обуславливает увеличение вертикальной координаты попадания пучка частиц на мишенной стенке.

Дальнейшее увеличение соленоидального магнитного поля ( $k>1.1$ ) приводит к тому, что практически весь поток электронов попадал на цилиндр Фарадея ( $z_{FC}=283$  мм), при этом лишь малая его часть попадала на ламель 6-го кольца и не превышала  $\sim 5\%$  тока пучка. Такой режим формирования пучка осуществлялся при магнитном поле в области расположения колец напряженностью 650 Э и градиентом спада поля 350 Э/см.

На рис. 4 приведены относительные интенсивности потоков частиц, попадающих на цилиндр Фарадея и на стенку мишени, в зависимости от коэффициента вариации  $k$  магнитного поля. Было обнаружено, что при  $k=0.6$  половина всех частиц попадает на стенку мишени.

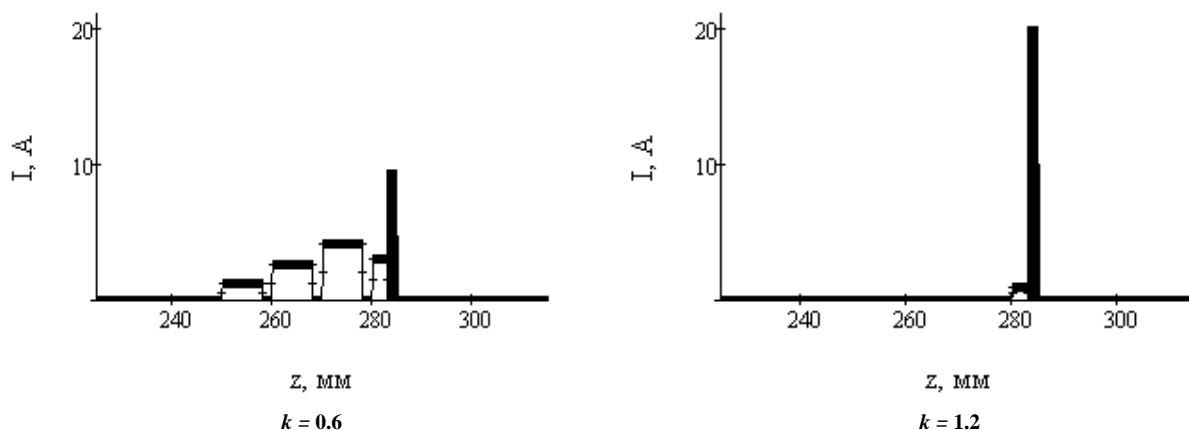


Рис. 4. Распределения токов на ламелях и цилиндре Фарадея. Черным цветом указано попадание на цилиндр Фарадея

Сопоставление данных эксперимента (токов на ламелях и цилиндре Фарадея) и численных результатов (гистограмм  $G(z)$  вертикальных значений  $z_U$  частиц при достижении ими заданного радиального уровня  $r_U=33$  мм) говорит о достаточно хорошем их соответствии.

Из расчетов следует, что для обоих вариантов магнитного поля поток электронов попадает на вертикальный участок, протяженность которого  $\Delta z_U$  составляет доли миллиметров. Такая концентрация обусловлена спадающим характером магнитного поля соленоида и исходным распределением частиц по радиальной координате  $r_0$ .

В работе было выполнено исследование зависимости средней точки  $Z_{sr}$  и среднеквадратичного размера распределения пучка на стенке мишени от коэффициента вариации  $k$  магнитного поля.

Из рис. 5 можно видеть, что искомая зависимость  $Z_{sr} = Z_{sr}(k)$  носит монотонный и почти линейный характер, что указывает на возможность устойчивой регулировки попадания пучка на мишень.

Из рис. 6 следует, что при заданных начальных условиях моделирования среднеквадратичные размеры  $S_{sr}$  электронного пучка на мишенной стенке не превышают 1 миллиметр для выбранных значений  $k$ .

При рассмотрении потоков частиц с фазовым объемом исходных величин увеличенного размера, в частности, с большим разбросом по импульсам, можно ожидать увеличение вертикального участка  $\Delta z_U$ , на котором реализуется выполнение условия попадания. 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 ( $\Delta z_0=15$  мм).

Итак, зафиксировано, что для принятых начальных условий частиц и рассматриваемого режима 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  $z_U$ .

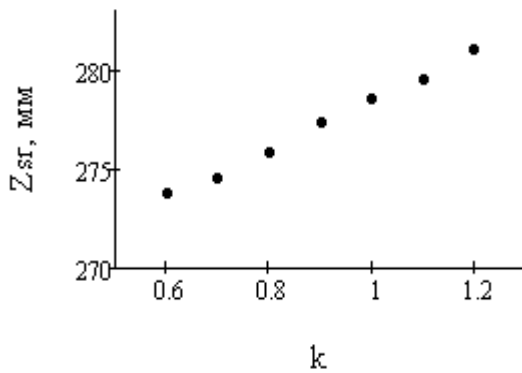


Рис. 5. Зависимость средней точки  $Z_{sr}$  распределения пучка электронов на стенке мишени от коэффициента вариации  $k$  магнитного поля

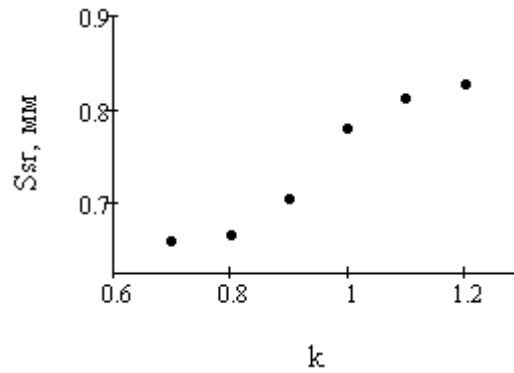


Рис. 6. Зависимость среднеквадратичного размера  $S_{sr}$  распределения пучка электронов на стенке мишени от коэффициента вариации  $k$  магнитного поля

### Выводы

Из проведенных исследований следует, что возможно устойчивое формирование электронного пучка в радиальном и осевом направлениях при транспортировке в магнитном поле соленоида. Получены решения прямой задачи моделирования траекторий электронов для заданных начальных условий и параметров системы. Показано, что поток электронов попадает на вертикальный участок, среднеквадратичный размер которого не превышает 1 мм. Полученные численные зависимости согласуются с экспериментальными результатами. Показана возможность регулировки места попадания пучка на вертикальную стенку при вариации амплитуды управляющего магнитного поля.

### Список использованной литературы

1. 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. – Вып. 7. – С. 88-91.
2. 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.
3. Довбня А.Н. Получение линейных электронных пучков в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом в режиме автозапуска / А.Н. Довбня, П.И. Гладких, В.В. Закутин и др. // ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования. – 1997. – Вып. 2, 3 (29, 30). – С. 204-206.
4. Довбня А.Н. Исследование формирования пучка в ускорителе электронов с вторичноэмиссионным источником / А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк и др. // Вісник Харківського університету. Серія: Фізична "Ядра, частинки, поля". – 2006. – № 732. – Вып. 2(30). – С. 96-100.