

---



---

**ЕЛЕКТРОНІКА І ЕЛЕКТРОТЕХНІКА**


---



---

УДК 621.384.6

А.Н. ДОВБНЯ, А.С. МАЗМАНИШВИЛИ, Н.Г. РЕШЕТНЯК  
 Национальный Научный Центр «Харьковский физико-технический институт»

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПАДАЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА ДЛЯ  
 УПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫМИ И ПОПЕРЕЧНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ  
 ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА**

*Представлены результаты численных экспериментов по генерации электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом. Изучено формирование его распределения при транспортировке в спадающем магнитном поле соленоида. Транспортировка пучка осуществлялась в системе, состоящей из медных колец, находящихся на расстоянии 85 мм от среза магнетронной пушки. Приводятся результаты численного моделирования по движению трубчатого электронного потока в магнитном поле соленоида. Изучена зависимость итогового вертикального распределения на внутренней стенке цилиндрической мишени от начальных состояний при генерации. Полученные результаты моделирования согласуются с данными эксперимента.*

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

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

**USE DROP-DOWN SOLENOID MAGNETIC FIELD FOR CONTROL OF PARAMETERS  
 LONGITUDINAL AND TRANSVERSE BEAM**

*The results of numerical experiments on electron beam generation magnetron guns with secondary-emission cathode electron are presented. The formation of its distribution during transport in a decreasing magnetic field of the solenoid is studied. Transportation of the beam carried in the system, consisting of copper rings, 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.*

A.M. DOVBNYA, O.S. MAZMANISHVILI, M.G. RESHETNYAK  
 Національний Науковий Центр «Харківський фізико-технічний інститут»

**ВИКОРИСТАННЯ СПАДАЮЧОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОЇДА ДЛЯ УПРАВЛІННЯ  
 ПОВЗДОВЖНЬОМИ І ПОПЕРЕЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА**

*Представлено результати чисельних експериментів по генерації електронного пучка магнетронною гарматою з вторинноемісійним катодом. Вивчено формування його розподілу при транспортуванні в спадаючому магнітному полі соленоїда. Транспортування пучка здійснювалось в системі, що складається з мідних кілець, які знаходяться на відстані 85 мм від зрізу магнетронної гармати. Наводяться результати чисельного моделювання по руху трубчастого електронного потоку. Вивчено залежність підсумкового вертикального розподілу на внутрішній стінці циліндричної мішені від початкових станів при генерації. Отримані результати моделювання узгоджуються з даними експерименту.*

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

**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 большой интерес использование в этих областях в качестве источников электронов магнетронных пушек с холодными вторичноэмиссионными катодами [1, 2]. Принцип работы таких пушек основан на вторичноэмиссионном размножении электронов, образовании электронного облака и

формировании электронного пучка в скрещенных электрическом и магнитном полях [3]. В данной работе представлены экспериментальные и теоретические результаты исследований по формированию радиального электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом при его транспортировке в спадающем магнитном поле соленоида. На основании построенной математической модели движения электронного потока в этом поле изучена возможность облучения внутренней цилиндрической поверхности.

#### Экспериментальная установка и методика исследований

В НИЦ ХФТИ был создан ускоритель электронов на основе магнетронной пушки с холодным металлическим вторичноэмиссионным катодом. В работе проведены исследования по формированию радиального электронного пучка и измерению его параметров при транспортировке частиц в спадающем магнитном поле соленоида. Блок-схема установки приведена на рис. 1.

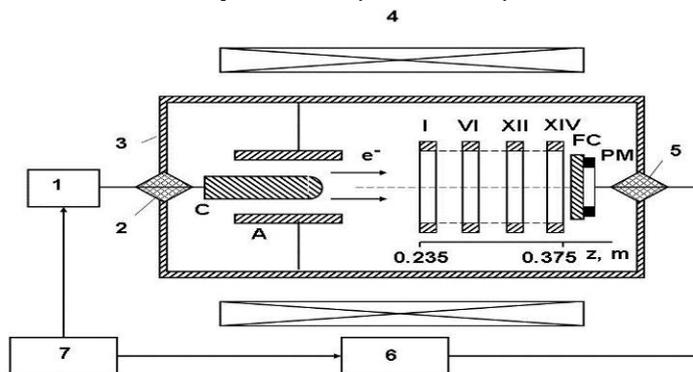


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки. 1 – импульсный генератор, 2, 5 – проходные изоляторы, 3 – вакуумная камера, 4 – соленоид, 6 – измерительная система, 7 – блок синхронизации, С – катод, А – анод, FC – цилиндр Фарадея, PM – постоянные магниты, I–XIV – металлические кольца (ламели) измерительной системы

Для питания магнетронной пушки использовался импульсный генератор (1), который обеспечивал получение импульса напряжения  $\sim 150$  кВ. Источник электронов (С – катод, А – анод) размещается в вакуумном объеме. Для получения электронного пучка использовались магнетронная пушка с диаметром анода 78 мм и диаметром катода 36 мм. Основное магнитное поле  $H_0$  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 магнетронной 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 постоянных магнитов из  $\text{SmCo}_5$ , размещенных на оси системы за 14-м кольцом. Путем изменения ориентации поля соленоида формировались дополнительные магнитные поля  $H_+$  и  $H_-$ . Проведенное измерение магнитного поля рассеяния кольцевых магнитов от длины  $z$  показало, что оно резко неоднородно – уменьшается в 2,5 раза на расстоянии 12 мм ( $H \sim 300$  Э) от поверхности магнитной сборки и в дальнейшем плавно затухает. 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  $\sim 1,5$  мм. За 14-м кольцом на расстоянии  $\sim 1,5$  мм расположен цилиндр Фарадея FC, который служит для измерения тока в осевом направлении. Измерительная система находится в магнитном поле, создаваемом соленоидом. Обработка результатов измерения параметров импульса напряжения, токов в радиальном и осевом направлениях проводилась с помощью регистрирующей системы (6). Для выполнения моделирующих расчетов построено программное средство, позволяющее рассчитать траектории движения электронов в заданном магнитном поле. Устойчивость численного алгоритма решения связана с шагом  $\Delta s$  решения, где  $s=ct$  ( $t$  – текущее время), и ларморовским параметром задачи  $\mu$ . Таким образом, при выполнении условия  $\mu \Delta s \ll 1$  имеет место сходимость численного решения системы к его аналитическому аналогу. Условие  $\mu \Delta s \ll 1$  будет выполняться, если  $\Delta s \ll 0.0001$  м. 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 (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  $G(z)$  распределения частиц по вертикали  $z=z_u$ , найденная по выполнению заданного условия – достижение радиальной компонентой  $r$  траектории частиц заданного значения  $r_u=0.033$  м). В свою очередь, сформированную гистограмму  $G(z)$  необходимо сравнить с распределением токов на ламелях.

**Сравнение экспериментальных данных и результатов численного моделирования**

Проведены исследования по формированию электронного пучка в радиальном направлении при транспортировке его в спадающем магнитном поле соленоида.

На рис. 2 приведены основные характеристики магнитной системы: распределение продольного магнитного поля (основного  $H_0$  и двух результирующих полей  $H_+$  и  $H_-$ ) вдоль канала транспортировки пучка, при которых проводились эксперименты.

На рис. 3 приведены логарифмические производные создаваемых магнитных полей, которые характеризуют скорость спада магнитного поля в периферийной области движения частиц.

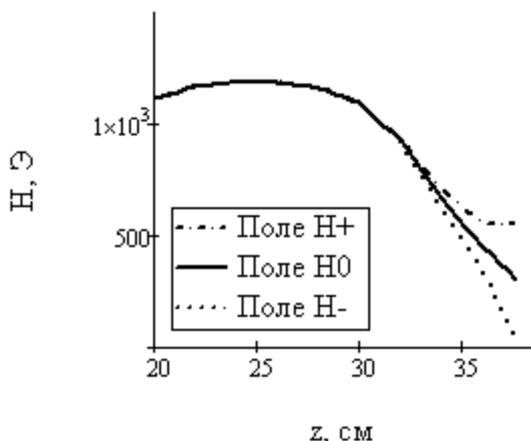


Рис. 2. Конфигурация магнитных полей;  $H_0$  – основное поле,  $H_+$  и  $H_-$  – дополнительные поля

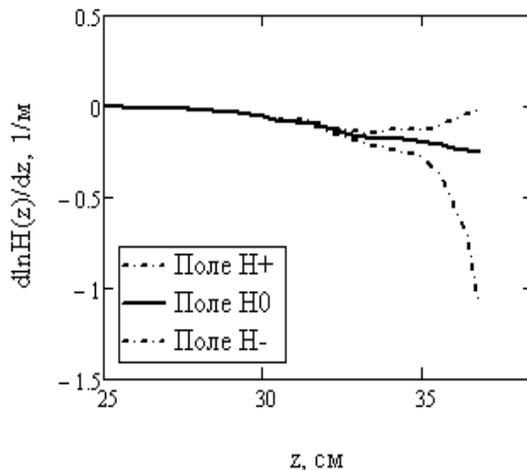


Рис. 3. Логарифмические производные  $d \ln H(z)/dz$  магнитных полей в периферийной области

На рис. 4 приведены результаты численного моделирования движения электронов в магнитных полях. Зависимости получены для трех случаев магнитного поля: основного  $H_0$  (средний ряд), а также дополнительных полей  $H_+$  (верхний ряд) и  $H_-$  (нижний ряд), создаваемых изменением ориентации основного поля. Были проведены экспериментальные исследования по формированию электронного пучка в радиальном направлении в спадающем магнитном поле соленоида  $H_0$ .

На рис. 5 приведены гистограммы распределения токов в радиальном направлении. Из рисунков видно, что при таком распределении магнитного поля максимальный ток приходился на 14-ое кольцо и составлял ~40% тока пучка. Ток в радиальном направлении регистрировался с 14-го по 9-ое кольцо. Магнитное поле в области расположения 14-го металлического кольца было спадающее с градиентом спада поля ~0,011 Т/см. В проведенных исследованиях было использовано рассеянное магнитное поле кольцевых магнитов (рис. 1), что позволило увеличить градиент спада магнитного поля. Экспериментально обнаружено, что при распределении магнитного поля (рис. 4, нижняя кривая) ток в радиальном направлении на 14-е кольцо составлял ~70% полного тока пучка при энергии электронов ~42 кэВ. Магнитное поле в области расположения 14-го кольца имело градиент спада ~0,03 Т/см при напряженности магнитного поля на середине кольца ~0,04 Т. Ток в радиальном направлении на 13-е кольцо составил ~15%, а на 12-е равнялся ~4%, а ток, идущий в осевом направлении, составлял ~11% тока пучка. Тем самым показано, что величина тока в радиальном направлении и его распределение вдоль длины колец зависит от амплитуды и распределения магнитного поля вдоль оси системы и градиента спада поля.

Были проведены эксперименты, в которых магнитное поле имеет выброс  $H_+$  (рис. 4, верхний ряд) – направление полей кольцевых магнитов и соленоида совпадает. На рис. 5 приведена гистограмма распределения токов в радиальном и осевом направлениях. Из рисунка видно, что ток в радиальном направлении на 14-ое кольцо составлял ~10%, а ток, идущий в осевом направлении, составлял ~90% тока пучка. Магнитное поле в области расположения 14-го кольца было ~0,06 Т с градиентом нарастания поля ~0,02 Т/см. На рис. 6 приведены результаты численного моделирования движения электронного пучка в магнитных полях. Зависимости получены для основного магнитного поля  $H_0$ , на которое наложено дополнительное поле, создаваемое магнитом. Величина суммарного поля изменялась от  $H_-$  (при  $k=-1$ ) до  $H_+$  (при  $k=1$ ). Цилиндр Фарадея был размещен на расстоянии  $z_{FC}=0,38$  м.

Из рис. 6 видно, что частицы при  $k=-1$  все попадают на внутреннюю стенку, а начиная со значения коэффициента управления (вариации)  $k \approx -0.5$  часть их попадает на цилиндр Фарадея. При  $k \approx -0.1$  и более практически все частицы оказываются на цилиндре Фарадея.

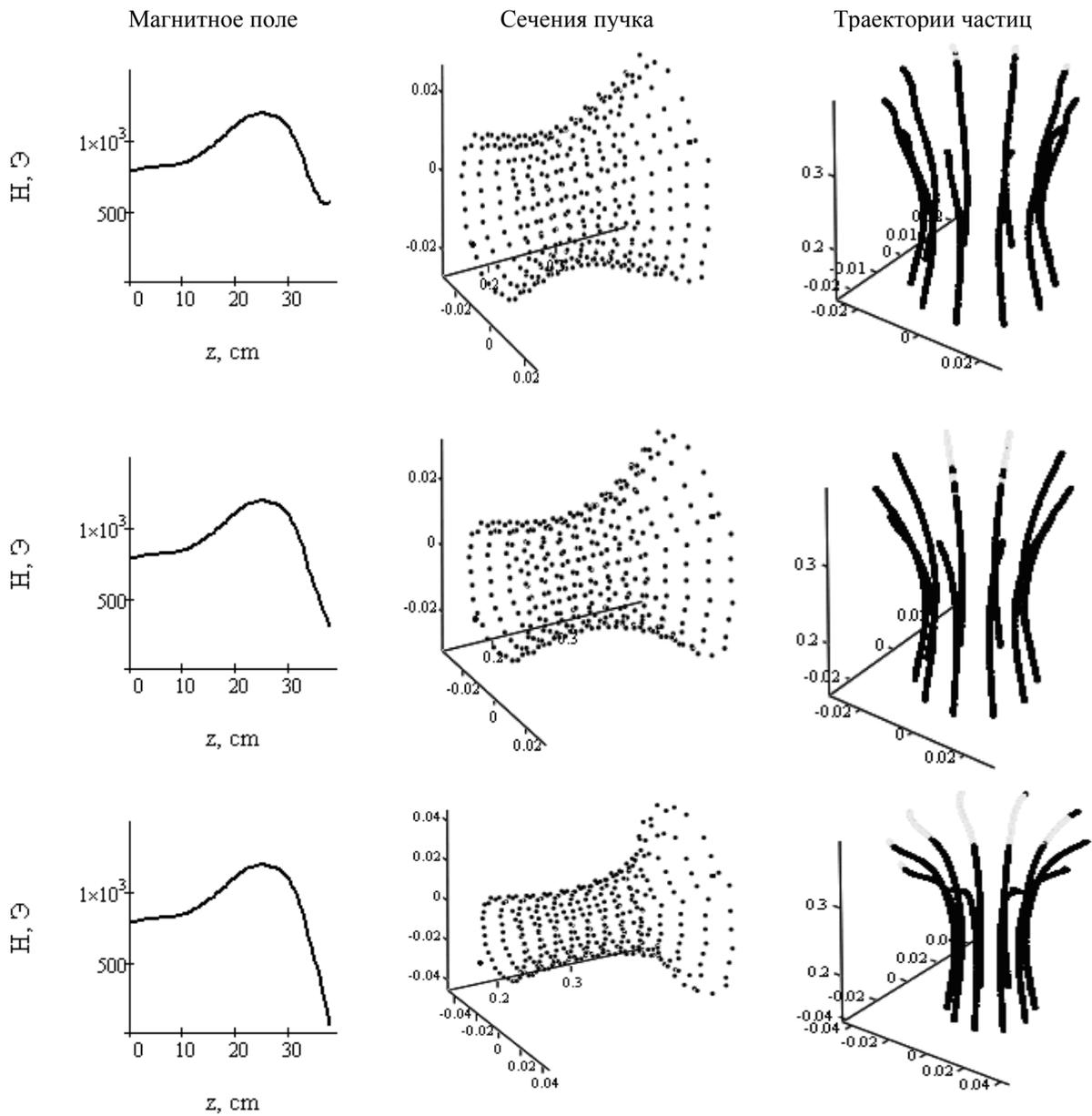


Рис. 4. Результаты моделирования движения частиц; сверху – поле  $H_+$ , посредине – основное поле  $H_0$ , снизу – поле  $H_-$ .

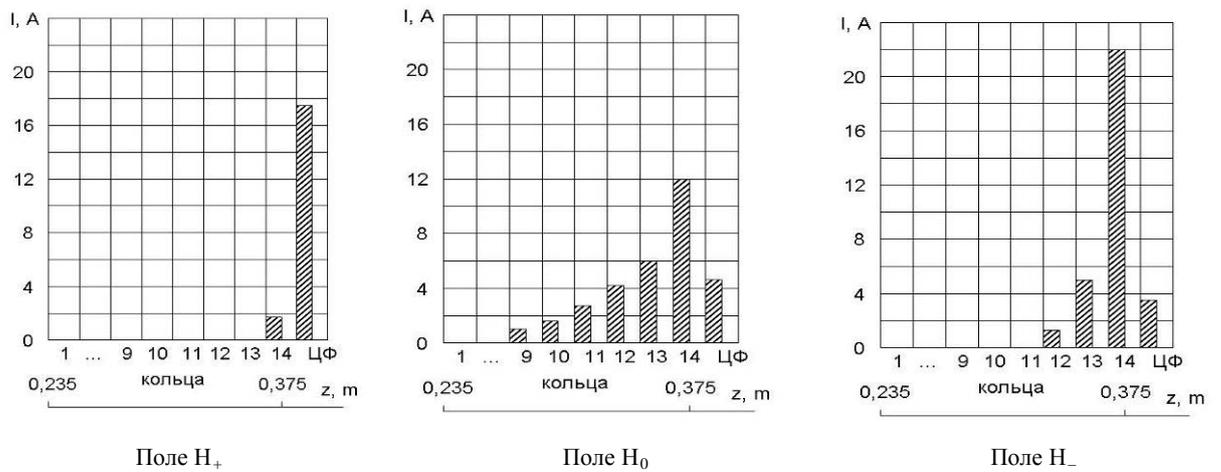


Рис. 5. Гистограммы токов, регистрируемых на ламелях внутренней стенки

Таким образом, увеличение амплитуды полного магнитного поля приводит к росту доли частиц, движущихся в осевом направлении. Путем вариации амплитуды и распределения магнитного поля можно регулировать ток в радиальном направлении вдоль длины трубы, и, следовательно, место электронного облучения.

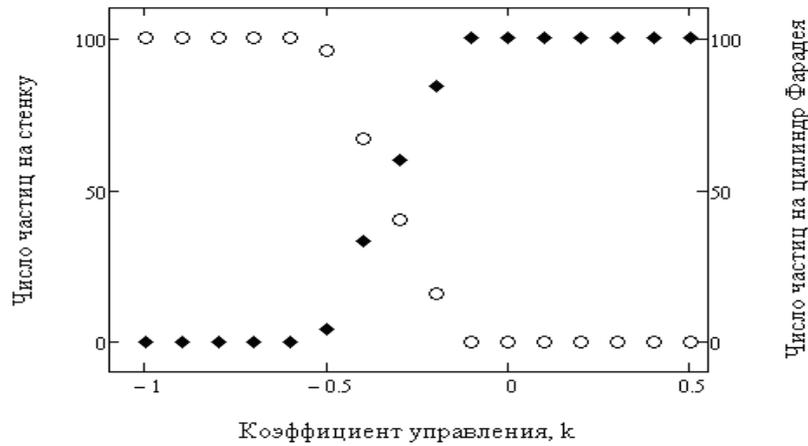


Рис. 6. Зависимости доли результирующих частиц (в %) от коэффициента управления  $k$  магнитного поля от  $H_-$  до  $H_+$ ; кружочки – попадание на стенку, квадратики – на цилиндр Фарадея

На рис. 7 приведены типичные траектории движения электронов. Видно, что радиус частиц пересекает внутренний радиус  $r_u=33$  мм, достигая стенки трубы. В дальнейшем необходимо провести исследование различных режимов работы магнетронной пушки при энергии электронов  $80\div 100$  кэВ и выбрать оптимальные характеристики электронного облучения.

На рис. 8 показана расчетная зависимость места попадания центра пучка части от коэффициента управления  $k$ . В интервале значений  $-1.0 < k < -0.7$  пучок частиц попадает на поверхность внутренней стенки. Из рисунка следует возможность устойчивого управления места облучения электронным пучком.

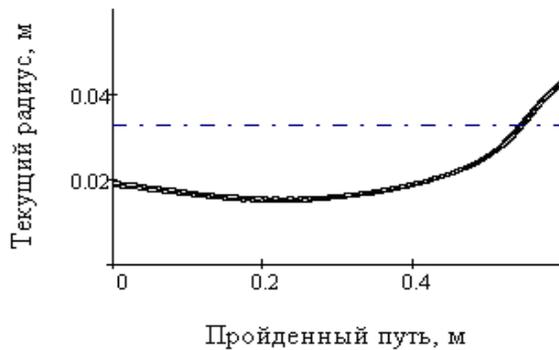


Рис. 7. Типичные зависимости текущего радиуса  $r$  (для трех частиц) от пройденного пути  $s$  (штрих-пунктиром указан внутренний радиус  $r_u=33$  мм)

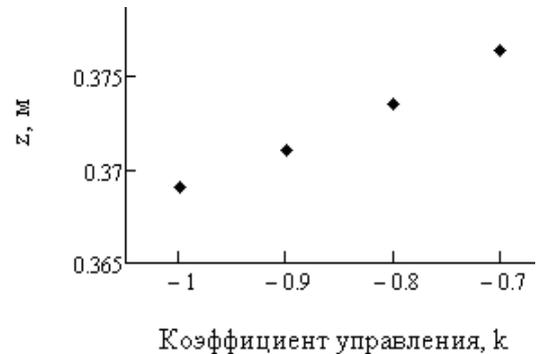


Рис. 8. Зависимость средней вертикальной координаты  $z$  на стенке от коэффициента вариации  $k$  магнитного поля

На рис. 9 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  $r_u=33$  мм. Из приведенных гистограмм  $G(z)$  вертикальных значений  $z_u$  видно, что поток электронов попадает на вертикальный участок, протяженность которого  $\Delta z_u$  порядка сантиметра.

При рассмотрении потоков частиц с фазовым объемом исходных величин увеличенного размера, в частности, с большим вертикальным размером  $\Delta z_u$  и большего разброса по импульсам  $p_{z0}$ ,  $p_{r0}$  и  $p_{\theta 0}$  можно ожидать соответствующее увеличение вертикального участка  $\Delta z_u$ , на котором реализуется выполнение условия попадания на заданный радиус.

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.

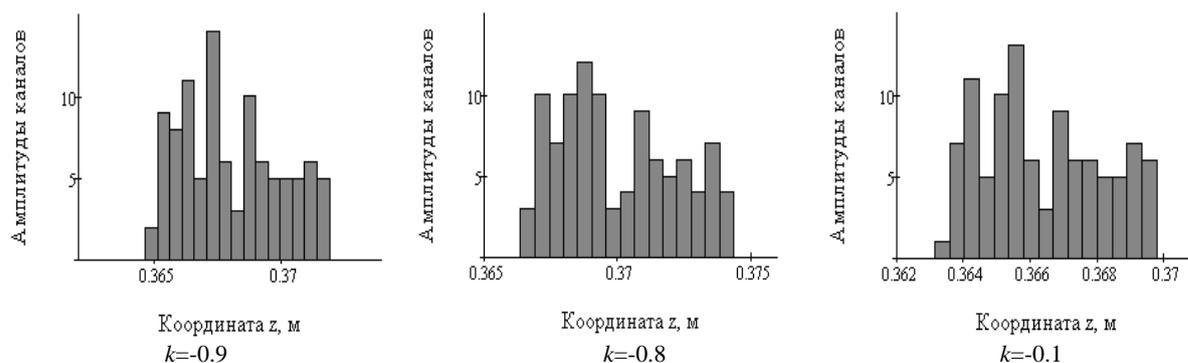


Рис. 9. Гистограммы  $G(z)$  вертикального распределения частиц при их попадании на внутреннюю стенку радиусом  $r_a=33$  мм для различных значений коэффициента управления  $k$  магнитного поля

### Выводы

В работе представлены экспериментальные данные и результаты моделирующих расчетов по формированию и управлению продольными и поперечными параметрами электронного пучка, эмитируемого магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом, и измерению его характеристик при транспортировке в результирующем магнитном поле. На основе математической модели движения электронного пучка рассмотрены характеристики результирующих электронных потоков. Для различных конфигураций магнитного поля приводятся результаты численного моделирования по движению трубчатого электронного тока. Показана возможность регулировки места попадания пучка на мишенную вертикальную стенку путем вариации амплитуды управляющего магнитного поля. Установлено, что величина тока и его распределение вдоль длины колец зависит от амплитуды магнитного поля и его градиента спада. Оптимизацией распределения магнитного поля (создаваемого соленоидом и кольцевыми магнитами) и его градиента спада было получено увеличение попадания электронов на одно кольцо (до  $\sim 70$  % тока пучка). В результате моделирования получено, что при выбранных начальных условиях для пучка частиц и распределений продольного магнитного поля вдоль оси транспортировки поток электронов попадает на вертикальный участок, длина которого порядка сантиметра.

### Список использованной литературы

1. Волколупов Ю.Я., Довбня А.Н., Закутин В.В., Красноголовец М.А., Митроченко В.В., Решетняк Н.Г., Ромасько В.П., Чурюмов Г.И. Генерация электронных пучков в магнетронном диоде с металлическим вторичноэмиссионным катодом // ЖТФ.-2001.-Т71.-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. Довбня А.Н., Закутин В.В., Решетняк Н.Г., Ромасько В.П., Чертищев И.А., Борискин В.Н., Довбня Н.А., Коваленко Т.А. Исследование формирования пучка в ускорителе электронов с вторичноэмиссионным источником // «Вісник Харківського університету», серія фізична «Ядра, частинки, поля».-2006.-№732.-Вып. 2(30).-С.96-100.