

А. С. МАЗМАНИШВИЛИ, Н. Г. РЕШЕТНЯК, А. Ю. СИДОРЕНКО, И. А. ЧЕРТИЩЕВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПАДАЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, ФОРМИРУЕМОГО МАГНЕТРОННОЙ ПУШКОЙ

Представлены результаты исследований и расчетов по формированию и управлению радиального 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 и поля управляющего магнита. Приведены результаты численного моделирования движения трубчатого электронного потока. Полученные результаты моделирования согласуются с данными эксперимента. Показана возможность регулировки места попадания пучка на вертикальную стенку при вариации амплитуды управляющего магнитного поля.

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

Введение. В настоящее время во многих странах разрабатываются и внедряются в промышленное производство пучковые методы обработки материалов потоками энергии. Для решения этих задач широко используются 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 с целью изменения их микроструктуры и фазового состава путем поверхностной обработки металлов электронным пучком [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 в 2–2,5 раза [4]. Решение подобных задач управления электронным пучком требует реализации нужной геометрии магнитного поля для формирования устойчивого пучка электронов при его передаче вдоль канала ускорителя.

В НИЦ 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, 5].

Целью настоящей работы является изучение распределения частиц по вертикальной оси Z (прямая задача) и регулирование этого распределения с помощью управляющего магнитного поля дополнительного соленоида (обратная задача).

Постановка задачи. В работе рассматривается пучок электронов с энергией E , начинающих движение параллельно оси Z на некотором расстоянии R_0 от неё. Частицы формируются магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом, после чего подвергаются действию магнитного поля, создаваемого заданным набором соленоидов. В дополнительном соленоиде путем вариации тока в его обмотке создается градиент поля, приводящий к изменению траекторий частиц. Место достижения заданного радиуса R_U фиксируется и определяется

значение координаты Z_U . Требуется определить координату Z_U как функцию заданного радиуса R_U .

Методы исследования. Проведены исследования по формированию радиального электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом и измерению его параметров при транспортировке пучка в спадающем магнитном поле соленоида [3, 5]. Источник электронов размещается в вакуумном объеме. Для получения электронного пучка использовались магнетронная пушка с диаметром анода 78 мм и диаметром катода 38 мм. Магнитное поле для генерирования и транспортировки электронного пучка создается соленоидом, состоящим из 4 секций. Питание секций осуществляется от источников постоянного тока. Регулируя ток в каждой из катушек, можно изменять амплитуду и продольное распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка. Это позволило получать различные режимы формирования электронного пучка. Транспортировка пучка осуществлялась в системе, состоящей из 14 медных колец с внутренним диаметром ~66 мм и, находящейся на расстоянии ~85 мм от среза магнетронной пушки. Ширина колец составила 8 мм, а расстояние между ними – 1,5 мм. Для измерения азимутальной однородности радиального электронного пучка 11-е кольцо было разрезано на 4 идентичных сегмента. Система находилась в магнитном поле, создаваемом соленоидом. Кроме того, для создания локального изменения скорости спада магнитного поля соленоида использовалось рассеянное магнитное поле, которое создавалось кольцевыми магнитами из SmCo5, размещенными на оси системы за 14-м кольцом.

Эксперименты проводились для случая, когда направление полей кольцевых магнитов и соленоида было встречное при напряжениях на катоде 30...70 кВ. Градиент спада магнитного поля изменялся от 50 Ое/см до 300 Ое/см.

Математическая модель исследования. Математическую модель данной задачи можно рассматривать на основе гамильтониана, который 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.

Данный магнитный потенциал с учетом азимутальной симметрии пока запишем в виде $A(r, z) = Brf(z)$, где $f(z)$ – функция продольной координаты; B – напряженность магнитного поля в выбранной рассматриваемой точке. Функция магнитного поля $A(r, z)$ может задаваться как из теоретических допущений, так и на основе эмпирических наблюдений. При численных расчетах в процессе выполнения пошаговых алгоритмов необходимо каждый раз для текущей координаты z задавать значение этой функции $A(r, z)$, а также определять значение её производной $\partial A(r, z) / \partial z$.

В общем случае формулировка начальных условий вместе с гамильтонианом, включающим магнитный потенциал $A(r, z)$, оказывается достаточной для решения прямой задачи о построении траектории частицы и, тем самым, для решения прямой задачи о динамике электронного пучка. С другой стороны, целенаправленно регулируя распределение магнитного поля (см. рис. 1), оказывается возможным управлять параметрами результирующего пучка.

Для канонических импульсов p_r , p_z , p_ϑ запишем: $p_r = mr\dot{r}$, $p_z = m\dot{z}$, $p_\vartheta = mr^2\dot{\vartheta}$, где точкой над переменными обозначено дифференцирование по текущему времени. Используем гамильтонову форму уравнений движения для координат и импульсов электрона, имеющих общий вид

$$\begin{cases} \dot{r} = \partial H / \partial p_r, \\ \dot{z} = \partial H / \partial p_z, \\ \dot{\vartheta} = \partial H / \partial p_\vartheta, \\ \dot{p}_r = -\partial H / \partial r, \\ \dot{p}_z = -\partial H / \partial z, \\ \dot{p}_\vartheta = -\partial H / \partial \vartheta. \end{cases} \quad (2)$$

Это дает

$$\begin{cases} \dot{r} = p_r / m, \\ \dot{z} = p_z / m, \\ \dot{\vartheta} = \frac{1}{mr} \left(\frac{p_\vartheta}{r} - e_0 Brf(z) \right), \\ \dot{p}_r = \frac{1}{m} \left(\frac{p_\vartheta}{r} - e_0 Brf(z) \right) \left(\frac{p_\vartheta}{r^2} + e_0 Bf(z) \right), \\ \dot{p}_z = \frac{1}{m} \left(\frac{p_\vartheta}{r} - e_0 Brf(z) \right) \left(e_0 Br \frac{\partial}{\partial z} f(z) \right), \\ \dot{p}_\vartheta = 0. \end{cases} \quad (3)$$

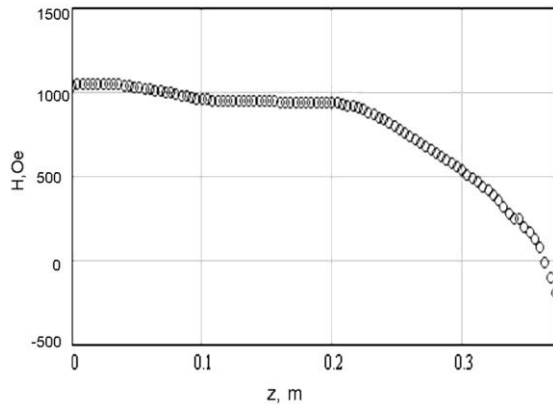
В результате дифференцирования (3) получаем уравнения для координат, а также для канонических импульсов, в которых выбирается в качестве постоянной амплитуды B некоторое значение магнитного поля на оси соленоида, например, его максимальное значение. Примем во внимание, что в системе уравне-

ний (3) фигурируют величины, значения которых отличаются на многие порядки. С целью уравновесить эти десятичные порядки перейдем, используя скорость света c , от текущего времени t к переменной $s = ct$. Эту переменную можно интерпретировать как пройденный путь частицей, а производную по s будем обозначать штрихом. Кроме этого, для канонических импульсов p_r , p_z , p_ϑ осуществим замену $p_r = e_0 Bq_r$, $p_z = e_0 Bq_z$, $p_\vartheta = e_0 Bq_\vartheta$. К дифференциальным уравнениям (3) необходимо присоединить начальные условия для r_0 , z_0 , ϑ_0 , а также для q_{r0} , q_{z0} , $q_{\vartheta 0}$. В каждой из строк системы (3) можно выделить ларморовский множитель $\mu = e_0 B / mc$, а также $f(z)$ – функцию продольной координаты, и, соответственно, $Bf(z)$ – функцию, описывающую напряженность магнитного поля вдоль оси z . Амплитуду B удобно один раз выбрать таким образом, чтобы можно было пользоваться функцией $Bf(z)$ на всем интервале возможных значений z . Кроме того, будем считать, что на основании опытных данных построены функции $f(z)$ и $\partial f(z) / \partial z$, описывающие магнитное поле на оси соленоида.

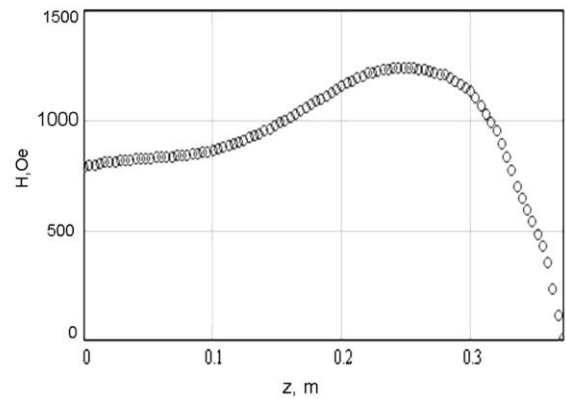
При построении вычислительного алгоритма необходимо обеспечить с одной стороны его безусловную сходимость, а с другой стороны – быстроту его временной реализации, для того, чтобы провести моделирование для достаточно большого количества частиц (порядка 1000).

Устойчивость численного алгоритма решения связана с пространственным шагом интегрирования Δs и ларморовским параметром μ . При выполнении условия $\mu \Delta s \ll 1$ можно ожидать сходимость численного решения системы (3) к его аналитическому аналогу. Поскольку $e_0 / mc = 586.69$, то при $B = 0.2$ Тл, получим $e_0 B / mc = 117.34$ м⁻¹. Тогда условие $\mu \Delta s \ll 1$ будет выполняться, если $\Delta s \ll 0.0001$ м. Теперь с вычислительной точки зрения, задача может быть сформулирована как задача Коши, т.е. задача нахождения решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями. Результатом будет являться траектория электрона (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.

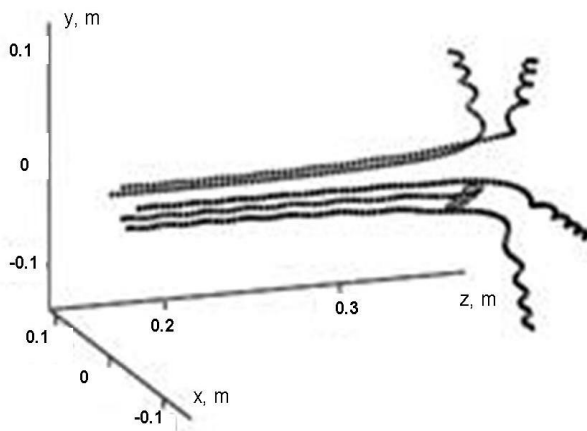
Результаты численного моделирования. На рис. 1 приведены два распределения продольного магнитного поля (рис. 1, а–б) вдоль оси магнетронной пушки и в канале транспортировки пучка. На рис. 1, в–г приведено семейство из пяти траекторий электронов для этих распределений магнитного поля.



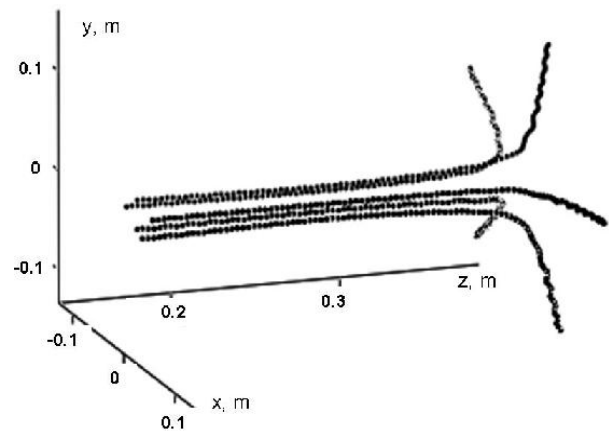
a



б



в



г

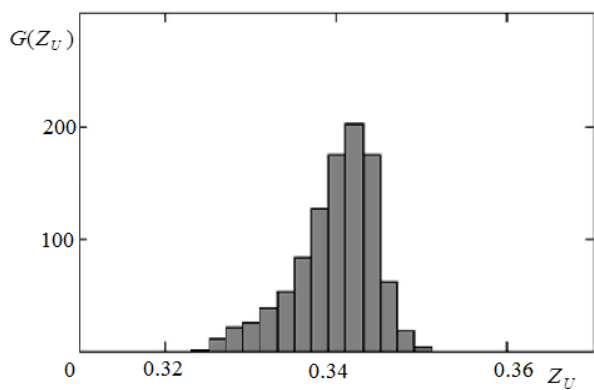
Рис. 1 – Распределение магнитного поля вдоль оси системы и канала транспортировки пучка (*a, б*) и траектории электронов (*в, г*) для этих распределений магнитного поля

Начальные значения y этих частиц статистически одинаковы, кроме значений по ϑ_0 , которые равномерны на $(0, 2\pi)$. Частицы пучка инжектировались с начальным радиусом r_0 , равномерно распределенным от 18 мм до 20 мм. Видно, что частицы, пролетев однородную область магнитного поля, по мере прохождения области его спада разворачиваются по радиусу. При этом, частицы испытывают прецессию вокруг силовых линий магнитного поля, обусловленную начальными условиями. Напряжение на катоде составляло ~ 42 кВ.

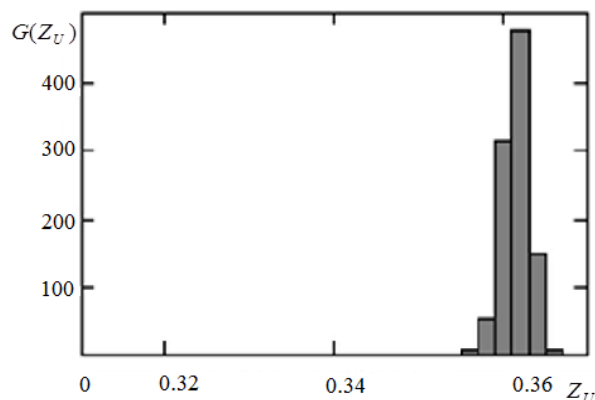
Зафиксируем теперь момент, когда радиальная компонента достигнет значения $R_U = 33$ мм. При достижении каждым электроном этого уровня в данный момент формируется массив продольных координат Z_U . На рис. 2, *a-б* приведены две расчетные гистограммы $G(Z_U)$ электронов при достижении ими порогового радиуса R_U . Данные гистограммы были рассчитаны для двух зависимостей амплитуд магнитного поля, соответствующих приведенным на рис. 1, *a-б*. Соответствующие распределения токов на измерительных ламелях показано на рис. 2, *в-г*. Как видно из рис. 2, *г*, при таком распределении магнитного поля $\sim 70\%$ тока

пучка в радиальном направлении попадало на одно кольцо шириной 8 мм. Ток в радиальном направлении регистрировался с 14-го по 11-е кольца. Градиент спада магнитного поля в районе 14-го кольца составил ~ 280 Oe/cm при напряженности магнитного поля ~ 400 Oe. Сопоставляя данные рис. 2, можно заключить о хорошем соответствии координат сканирования пучком при $R_U = 33$ мм. Исследования показали, что при уменьшении градиента спада поля до ~ 110 Oe/cm, в области 14-го кольца, ток в радиальном направлении на кольцо уменьшился на $\sim 80\%$. При этом увеличились токи в радиальном направлении с 13-го кольца по 10-е кольцо соответственно. Изменяя амплитуду и распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка можно было управлять током вдоль длины колец.

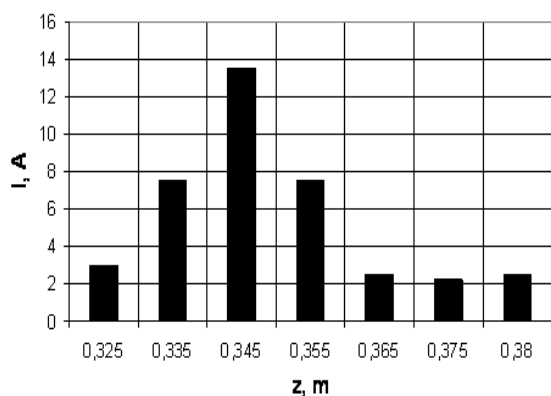
При распределении магнитного поля (рис. 1, *a*) максимум тока смещался с 14-го кольца на 11-е и составил $\sim 35\%$ тока пучка. Градиент спада магнитного поля в области 11-го кольца составил ~ 100 Oe/cm при напряженности магнитного поля на середине кольца ~ 300 Oe.



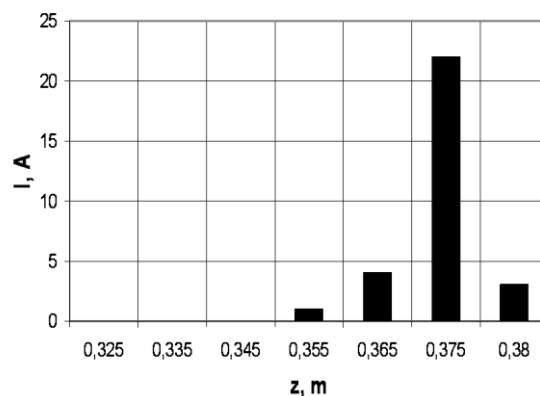
a



б



в



г

Рис. 2 – Расчетные гистограммы значений Z_U электронов при достижении ими порогового радиуса R_U (*a*, *б*) и экспериментальные распределения токов на измерительных ламелях (*в*, *г*)

Выводы. В работе представлены результаты экспериментальных исследований и моделирующих расчетов по формированию и управлению радиального электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом в диапазоне энергий электронов 35...70 кэВ, и измерению его параметров при транспортировке в суммарном спадающем магнитном поле соленоида и поля управляющего постоянного магнита. Приводятся результаты численного моделирования движения трубчатого электронного потока.

Показано, 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 при выбранных начальных условиях для пучка электронов и распределений продольного магнитного поля вдоль оси пушки и канала транспортировки поток электронов попадает на вертикальный участок, длина которого около сантиметра.

Полученные результаты моделирования согласуются с данными эксперимента. Показана возможность регулирования места попадания пучка на вертикальную стенку при изменении амплитуды управляющего магнитного поля.

Список литературы: 1. 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 Accelerators in Medicine and Industry. – St.-Petersburg. Russia. – 2001. – P. 412–417. 2. Школьников Э. Я. Сильноточный ускоритель электронов микросекундной длительности для радиационно-технологических целей / Э. Я. Школьников // Тр. XI Международного совещания применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. – Санкт-Петербург. Россия. – 2005. – С. 126–128. 3. Быстров П. А. Методика и программа «Bean scanning» расчета процессов в системе развертки релятивистского электронного пучка с широким энергетическим спектром / П. А. Быстров, Н. Е. Розанов // ВАНТ. – 2012. – №4, 80. – С. 87–91. 4. 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. 5. Глухих В. А. Модификация поверхностных свойств материалов с помощью мощных импульсных электронных пучков / В. А. Глухих, О. П. Печерский, В. И. Энгелько, Б. П. Яценко // Сборник докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург, 1–4 октября 2001. – С. 445–447. 6. 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.

Bibliography (transliterated): 1. Engelko V., G. Mueller, A. Andreev *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): 412–417. Print. 2. Shkol'nikov E.Ya. "Sil'notochniy uskoritel' elektronov mikrosekundnoy dlitel'nosti dlya radiacionno-technologicheskikh tsely." *Tr. XI Megdunarodnogo sovetshaniya primeneniya uskoriteley zaryagennih chastic v promishlennosti i medicine.* (St.-Petersburg, Russia, 2005): 126–128. Print. 3. Bistrov P. A. and N. E. Rozanov. "Metodika i programma «Bean scanning» rascheta processov v sisteme razvertki relyativistskogo elektronnoy puchka s shirokim energeticheskim spektrom." *VANT.* No. 4, 80. 2012. 87–91. Print. 4. Dovbnya A. N., S. D. Lavrinenko and V. V. Zakutin. "Modifikatsiya poverhnosti cirkonia i splava Zr1%Nb elektronnim puchkom uskoritelya na osnove magnetronnoy pushki." *VANT. Ser.: Fizika radiacionnogo materialovedeniya.* No. 2 (72), vip. 97. (2011). 39–45. Print. 5. Gluhii V. A., O. P. Pecherskiy, V. I. Engel'ko and B. P. Yacenko. "Modifikatsiya poverhnostnih svoystv materialov s pomosh'yu motshnih impul'snih elektronnih puchkov." *Sbornik dokladov X Megdunarodnogo sovetshaniya po primeneniyu uskoriteley zaryagennih chastic v promishlennosti i medicine.* (St.-Petersburg, Russia, 2001): 445–447. Print. 6. Dovbnya A. N., N. G. Reshetnyak and V. V. Zakutin. "Issledovanie formirovaniya puchka v uskoritele elektronov s vtorichniemissionnim istochnikom." *Visnyk "HNU". Ser.: Yadra, chastinki, polya.* No. 732, vip. 2(30). 2006. 96–100. Print.

Поступила (received) 05.09.2015

Выводы. В работе представлены результаты экспериментальных исследований и моделирующих расчетов по формированию и управлению радиального электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом в диапазоне энергий электронов 35...70 кэВ, и измерению его параметров при транспортировке в суммарном спадающем магнитном поле соленоида и поля управляющего постоянного магнита. Приводятся результаты численного моделирования движения трубчатого электронного потока.

Показано, 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 при выбранных начальных условиях для пучка электронов и распределений продольного магнитного поля вдоль оси пушки и канала транспортировки поток электронов попадает на вертикальный участок, длина которого около сантиметра.

Полученные результаты моделирования согласуются с данными эксперимента. Показана возможность регулирования места попадания пучка на вертикальную стенку при изменении амплитуды управляющего магнитного поля.

Список литературы: 1. 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 Accelerators in Medicine and Industry.* – St.-Petersburg. Russia. – 2001. – P. 412–417. 2. Школьников Э. Я. Сильноточный ускоритель электронов микросекундной длительности для радиационно-технологических целей / Э. Я. Школьников // *Тр. XI Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине.* – Санкт-Петербург. Россия. – 2005. – С. 126–128. 3. Быстров П. А. Методика и программа «Bean scanning» расчета процессов в системе развертки релятивистского электронного пучка с широким энергетическим спектром / П. А. Быстров, Н. Е. Розанов // *ВАНТ.* – 2012. – №4, 80. – С. 87–91. 4. 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 5. Глухих В. А. Модификация поверхностных свойств материалов с помощью мощных импульсных электронных пучков / В. А. Глухих, О. П. Печерский, В. И. Энгелько, Б. П. Яценко //

Сборник докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург, 1–4 октября 2001. – С. 445–447. 6. Довбня А. Н. Исследование формирования пучка в ускорителе электронов с вторичноэмиссионным источником / А. Н. Довбня, В. В. Закутин, Н. Г. Реуштыняк и др. // *Вісник «ХНУ».* Сер.: Ядра, частинки, поля. – 2006. – № 732, вып. 2(30). – С. 96–100.

Bibliography (transliterated): 1. Engelko V., G. Mueller, A. Andreev 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): 412–417. Print. 2. Shkol'nikov E.Ya. "Sil'notochniy uskoritel' elektronov mikrosekundnoy dlitel'nosti dlya radiacionno-technologicheskikh tsely." *Tr. XI Megdunarodnogo sovetshaniya primeneniya uskoriteley zaryagennih chastic v promishlennosti i medicine.* (St.-Petersburg, Russia, 2005): 126–128. Print. 3. Bistrov P. A. and N. E. Rozanov. "Metodika i programma «Bean scanning» rascheta processov v sisteme razvertki relyativistskogo elektronnoy puchka s shirokim energeticheskim spektrom." *VANT.* No. 4, 80. 2012. 87–91. Print. 4. Dovbnya A. N., S. D. Lavrinenko and V. V. Zakutin. "Modifikatsiya poverhnosti cirkonia i splava Zr1%Nb elektronnim puchkom uskoritelya na osnove magnetronnoy pushki." *VANT. Ser.: Fizika radiacionnogo materialovedeniya.* No. 2 (72), vip. 97. (2011). 39–45. Print. 5. Gluhii V. A., O. P. Pecherskiy, V. I. Engel'ko and B. P. Yacenko. "Modifikatsiya poverhnostnih svoystv materialov s pomosh'yu motshnih impul'snih elektronnih puchkov." *Sbornik dokladov X Megdunarodnogo sovetshaniya po primeneniyu uskoriteley zaryagennih chastic v promishlennosti i medicine.* (St.-Petersburg, Russia, 2001): 445–447. Print. 6. Dovbnya A. N., N. G. Reshetnyak and V. V. Zakutin. "Issledovanie formirovaniya puchka v uskoritele elektronov s vtorichniemissionnim istochnikom." *Visnyk "HNU". Ser.: Yadra, chastinki, polya.* No. 732, vip. 2(30). 2006. 96–100. Print.

Поступила (received) 05.09.2015